

DAVID RIVEST

**CULTURES INTERCALAIRES AVEC ARBRES  
FEUILLUS : EFFETS SUR LA DISPONIBILITÉ DE  
LA LUMIÈRE, LA QUALITÉ DU SOL ET LA  
PRODUCTIVITÉ DES PLANTES ASSOCIÉES**

Thèse présentée  
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval  
dans le cadre du programme de doctorat en biologie végétale  
pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.)

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

2008

## Résumé

Les systèmes de cultures intercalaires (SCI), qui combinent des plantes agricoles et des rangées d'arbres largement espacées les unes des autres, offrent de multiples bénéfices économiques et environnementaux, dans la mesure où les interactions arbre-culture sont bien maîtrisées. L'adoption à grande échelle de ces systèmes au Québec est cependant loin d'être acquise. Cette thèse visait à valider le potentiel des SCI pour le Québec, en accordant une attention particulière à la productivité de la culture intercalaire et des arbres, aux facteurs environnementaux qui la conditionnent et aux façons de l'optimiser.

Les effets de différents clones de peupliers hybrides (PH) sur le rendement du soya ont été analysés. Un faible rendement du soya a été observé à l'interface PH-soya en situation de forte densité d'arbres et de concurrence pour la lumière. La floraison et la formation des gousses se sont avérées plus sensibles à l'ombrage des arbres que le remplissage des grains. Suite à une éclaircie des PH, le rendement du soya était toutefois plus régulier dans l'allée. Les résultats suggèrent que la concurrence pour la lumière peut être maîtrisée en optant pour des clones de PH qui minimisent l'ombrage et en favorisant de larges espacements des arbres sur les rangées et entre elles.

Différents indices de qualité du sol ont aussi été évalués, dans un SCI avec soya et dans une plantation d'arbres sans culture intercalaire. À certaines dates, la disponibilité de l'azote et la biomasse microbienne étaient supérieures dans le traitement avec soya. On y a aussi observé un plus fort accroissement de la biomasse aérienne des PH, lesquels ont été plus efficaces à utiliser l'azote minéralisé. La qualité du sol à la base des PH, sous le paillis en polyéthylène, était inférieure à celle observée dans l'allée, contrairement à ce qui a été observé dans d'autres études portant sur des SCI sans paillis.

Enfin, les effets de la culture intercalaire sur la croissance et le statut nutritif de différents clones de PH ont été quantifiés dans différents SCI. Globalement, la croissance des PH dans le traitement de culture intercalaire était supérieure à celle observée dans le traitement sans culture intercalaire. Les différents clones ont répondu de façon similaire aux traitements. L'azote s'est avéré limitant pour la croissance des PH. Les résultats suggèrent que les PH ont bénéficié de la régie des cultures intercalaires.

En plus de démontrer le potentiel des SCI pour intensifier la production de bois en milieu agricole, cette étude indique que les premiers stades de l'association arbre-culture peuvent offrir une grande efficacité au plan de l'utilisation des ressources biophysiques.

## **Abstract**

Tree-based intercropping (TBI) systems, which combine widely spaced rows of trees and agricultural field crops, can offer many economic and environmental benefits if tree-crop interactions are adequately managed. However, the rate of adoption of these systems remains low in Québec. The present thesis aimed to provide scientific evidence to support the implementation of TBI systems in Québec. This research focuses on agricultural intercrop and tree productivities, the environmental conditions that control these productivities and the ways to optimize them.

The effects of different hybrid poplar (HP) clones on soybean yield were determined. Low soybean yield was observed at the HP-soybean interface under high tree density and light competition. Soybean flowering and pod formation were more affected by tree shading than seed filling. After HP thinning, a greater uniformity in soybean yield was observed. The results suggest that tree competition for light may be reduced by using HP clones that minimize shading and by favouring wide tree spacing both within and between rows.

Soil quality indices were also assessed in a TBI system comprising a soybean intercrop and a tree plantation without intercrop. Nitrogen availability and microbial biomass were higher in the intercropping treatment on some dates. The presence of a soybean intercrop was also associated with a higher aboveground biomass increment of HP, which used more efficiently the nitrogen derived from soil mineralization. Soil quality close to the tree bases, beneath the polyethylene mulch, was lower than that in the alleys, which contrasts with results obtained in other studies performed in unmulched TBI systems.

Finally, the effects of the intercrop on the growth and nutrient status of different HP clones were quantified in different TBI systems. Overall, the growth of HP in the intercropping treatment was higher than that in the treatment without intercrop. The different clones responded similarly to treatments. Nitrogen appeared as a growth-limiting nutrient for HP. The results suggest that HP were positively affected by intercrop management.

This study shows that TBI systems may provide an effective means of improving timber production in farmlands and suggests that their early stages of development may exhibit a high level of efficiency in the utilization of biophysical resources.

## **Avant-Propos**

Mes études doctorales ont été dirigées par Alain Olivier et co-dirigées par Alain Cogliastro. Elles ont été réalisées grâce au soutien financier du Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies, du Conseil national de recherches en sciences naturelles et en génie et du Programme de mise en valeur des ressources du milieu forestier du ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec.

Avec la collaboration de mes directeurs de recherche, j'ai joué un rôle de premier plan dans la planification, l'implantation et le suivi des expériences qui ont été menées dans le cadre de mon projet de doctorat. En plus de coordonner la majeure partie des travaux techniques réalisés sur les sites expérimentaux, j'ai pris part à la plupart des activités de collecte de données sur le terrain et en laboratoire, tout en participant à la supervision des étudiants stagiaires, des techniciens de recherche, et des agriculteurs impliqués dans le projet.

La présente thèse comporte quatre manuscrits (chapitres 2, 3, 4, et 5) qui ont été ou seront soumis pour publication dans des revues scientifiques. Le chapitre 2, qui prend la forme d'un article de synthèse, présente un large éventail des connaissances actuelles concernant les différents systèmes de cultures intercalaires en climat tempéré. Les chapitres expérimentaux 3, 4 et 5 répondent chacun à un objectif de recherche et intègrent systématiquement la problématique, les méthodes scientifiques, les résultats et les conclusions liés à chaque objectif. Pour chacun des articles repris dans cette thèse, j'ai œuvré en tant que premier auteur. Les co-auteurs de ces articles ont apporté une précieuse contribution en supervisant mes travaux, en me conseillant lors de l'analyse des données et en me fournissant certaines données. Je tiens donc à remercier chaleureusement ces co-auteurs qui sont Alain Olivier (chapitres 2, 3, 4 et 5), Alain Cogliastro (chapitres 3, 4 et 5), Anne Vanasse (chapitre 3) et Robert L. Bradley (chapitre 4).

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Alain Olivier, qui a toujours appuyé avec grand intérêt mon souhait de développer la culture intercalaire au Québec. Je lui suis reconnaissant de m'avoir fait confiance tout au long de mes études doctorales et d'avoir fait des pieds et des mains pour s'assurer, jusqu'à la fin, que je puisse mettre du beurre sur le

pain de ma famille. Cher Alain, merci milles fois pour les nombreuses corrections et tes bons conseils qui m'ont permis de m'améliorer, pour avoir toujours laissé la porte de ton bureau grande ouverte et pour ta bonne humeur et ton naturel qui ont rendu nos relations agréables à vivre.

Je désire également exprimer ma gratitude envers mon co-directeur de recherche, Alain Cogliastro, qui s'est toujours montré généreux, jovial et disponible envers moi. Je le remercie de m'avoir permis de bénéficier à maintes reprises de son expertise et de ses bons conseils. Je lui suis reconnaissant pour les longs échanges que nous avons eus concernant la science, les arbres et la vie.

Je remercie également Robert L. Bradley qui a apporté une grande contribution tout au long de mes études doctorales. Je lui suis reconnaissant de m'avoir accueilli à de nombreuses reprises dans son laboratoire et pour ses commentaires et suggestions qui m'ont permis de me dépasser au plan scientifique. Je tiens aussi à souligner l'appui fort apprécié d'Anne Vanasse, qui s'est toujours montrée disponible et qui a gentiment partagé avec moi plusieurs de ses connaissances en agronomie.

Je remercie toutes celles et tous ceux qui ont participé aux travaux de terrain et aux analyses en laboratoire. Je pense notamment à Benjamin Patarin, André-Jean Lalanne, Alain Brousseau, Yves Thériault, Cindy Bernier, Louis-Vincent Berubé-Dufour, Antoine St-Pierre, Nathan De Baets et Denis Marois. Je suis aussi extrêmement reconnaissant envers Stéphane Daigle pour sa contribution sans faille aux analyses statistiques, William F.J. Parsons pour la révision linguistique des trois chapitres de recherche de cette thèse et Debra Christiansen-Stowe pour la traduction du chapitre 3. Je remercie également Alain Paquette, un artisan important de la mise en place du site de St-Rémi, pour le temps qu'il a consacré à m'enseigner l'analyse d'images hémisphériques, Wilgens René qui m'a fait bénéficier de ses connaissances sur la nutrition des peupliers et Alison D. Munson qui a accepté généreusement que j'utilise certains équipements de son laboratoire. Je tiens aussi à remercier mes camarades Vincent Chiffot et Simon Lacombe qui, de main de maître, ont contribué à faire avancer les connaissances sur les systèmes de cultures intercalaires.

Je remercie Christian Dupraz, qui m'a accueilli chaleureusement dans sa maison et dans son laboratoire à Montpellier, en France. Ses nombreuses réalisations en agroforesterie ont toujours été pour moi une grande source d'inspiration.

Cette étude n'aurait pu être réalisée sans le support financier et technique de nombreux partenaires et propriétaires privés dont « Le Baluchon » (Louis Lessard et René-Paul Lessard), « Les Arpents Verts » (Marielle Arès et Michel Arès), Dany Verteneuil et « La Ferme Forestière St-Nicolas » (feu Raymond-Marie Gauvin et Yvan Gauvin).

Enfin, j'exprime ma plus profonde gratitude à ma famille. Merci à Miren, ma femme, mon amour et la mère de mon beau Pablo. Merci à mes parents, Lise et Yves, ainsi qu'à ma sœur Chantal et mes frères Carl, Frédérick et Emmanuel, pour leur amour inconditionnel. Merci à mes beaux-parents, Jone et Santiago, pour m'avoir toujours considéré comme leur propre fils.

*À ma famille,  
Miren, Pablo, Yves, Lise, Carl, Chantal, Frédérick et Emmanuel*

## Table des matières

Résumé.....	i
Abstract.....	ii
Avant-Propos.....	iii
Table des matières.....	vii
Liste des tableaux.....	x
Liste des figures.....	xi
Chapitre 1. Introduction générale.....	1
Références.....	2
Chapitre 2. Cultures intercalaires avec arbres feuillus : quel potentiel pour le Québec ?.....	4
Résumé.....	5
Abstract.....	5
Introduction.....	6
Les associations d'arbres feuillus et de cultures intercalaires.....	7
Les formes traditionnelles d'association.....	8
Le développement de formes modernes d'association.....	9
La productivité des systèmes de cultures intercalaires.....	10
L'influence des cultures intercalaires sur la croissance des arbres.....	10
L'impact des arbres sur la productivité des cultures intercalaires.....	13
Les bénéfices environnementaux des systèmes de cultures intercalaires.....	17
La valeur économique des systèmes de cultures intercalaires.....	20
L'itinéraire technique.....	24
Conclusion.....	28
Objectifs et hypothèses de recherche.....	32
Références.....	33
Chapitre 3. Production of soybean associated with different hybrid poplar clones in a tree-based intercropping system in southwestern Québec, Canada.....	44
Résumé.....	45
Abstract.....	45
Introduction.....	46
Materials and methods.....	48
Site characteristics.....	48
Vegetative material, experimental design and treatments.....	49
Percent total light transmittance (PTLT).....	51
Soil water content (WC).....	51
Soil nitrogen mineralisation (NMIN).....	52
Morphological characteristics of the hybrid poplar clones.....	53
Soybean yield and yield components.....	53
Statistical analyses.....	54
Results.....	54
Percent total light transmittance (PTLT).....	54
Soil water content (WC) and soil nitrogen mineralisation (NMIN).....	56



Morphological characteristics of hybrid poplars .....	56
Soybean yield and yield components.....	57
Relationships between soybean yield components and environmental variables.....	59
Discussion .....	61
Hybrid poplar-soybean interactions for growth resources under dense tree cover.....	61
Tree management considerations.....	62
Conclusions.....	65
Acknowledgements.....	66
References.....	66
Chapitre 4. Intercropping hybrid poplar with soybean: does it increase soil quality and tree growth? .....	71
Résumé.....	72
Abstract.....	72
Introduction.....	73
Materials and methods .....	75
Experimental site and field operations.....	75
Soil sampling and analyses.....	76
Hybrid poplar biomass increment and nitrogen response efficiency (NRE).....	78
Statistical Analyses .....	78
Results.....	79
Soil carbon and nitrogen .....	79
Soil microbial biomass dynamics .....	79
Soil mineral nitrogen dynamics .....	80
Hybrid poplar biomass increment and nitrogen response efficiency (NRE).....	82
Discussion .....	82
Acknowledgements.....	85
References.....	85
Chapitre 5. Tree-based intercropping systems increase growth and nutrient status of hybrid poplar: a case study from two Northeastern American experiments.....	88
Résumé.....	89
Abstract.....	89
Introduction.....	90
Materials and methods .....	92
Study sites and field operations .....	92
Hybrid poplar growth.....	94
Foliar sampling and analysis.....	95
Data analyses .....	95
Results.....	96
Growth of hybrid poplars.....	96
Nutrition of hybrid poplars .....	98
Relationships between growth of hybrid poplars and leaf nutrient concentrations....	103
Discussion .....	105
Conclusions.....	109
Acknowledgements.....	110
References.....	110

Chapitre 6. Conclusion générale.....	114
Sommaire des résultats .....	114
Limites de l'étude et pistes de recherches futures .....	118
Quelques considérations sociales et politiques.....	121
Références.....	122

## Liste des tableaux

Table 3.1. Effects of distance from the hybrid poplar row during different stages of soybean reproductive growth on soil water content and net N mineralisation in 2005 and 2006, in a hybrid poplar-hardwood-soybean intercropping system in southwestern Québec, Canada .....	56
Table 3.2. Tree height and crown diameter of three clones of hybrid poplars, in 2005 and 2006, in a hybrid poplar-hardwood-soybean intercropping system in southwestern Québec, Canada. ....	57
Table 3.3. Linear correlation coefficients between environmental variables and soybean productivity variables measured at 2 and 5 m from the hybrid poplar row, in 2005 and 2006, in a hybrid poplar-hardwood-soybean intercropping system in southwestern Québec, Canada.....	60
Table 4.1. Soil sampling schedule. ....	76
Table 4.2. Effects of treatments and distance from hybrid poplar row on soil total C and N in June 2005. Values in parentheses are standard deviations. n = 8 per distance. In each treatment, different letters indicate significant differences between distances, according to Tukey's Multiple Range Test ( $p < 0.05$ ).....	79
Table 4.3. Effects of treatments on biomass increment (stem + branches) and nitrogen-response efficiency (NRE) of hybrid poplars during their sixth and seventh growing seasons. Values in parentheses are standard deviations. n = 12 per treatment. Different letters indicate significant differences between treatments, according to Tukey's Multiple Range Test ( $p < 0.05$ ).....	82
Table 5.1. Main characteristics of the St-Rémi and St-Édouard experimental sites in southern Québec, Canada .....	93
Table 5.2. Effect of treatments and hybrid poplar clones on leafless aboveground biomass in two experiments at St-Rémi and St-Édouard in southern Québec, Canada.....	98
Table 5.3. Effect of treatments and hybrid poplar clones on morphological leaf traits and nutrient status in leaves (concentration and content) at St-Rémi in 2005 and 2006.....	99
Table 5.4. ANOVA $P$ -values for morphological leaf traits and nutrient status in leaves at St-Rémi in 2005 and 2006. ....	100
Table 5.5. Effect of treatments and hybrid poplar clones on morphological leaf traits, nutrient status in leaves (concentration and content) and nitrogen-use efficiency at St-Édouard in 2005 and 2006. ....	101
Table 5.6. ANOVA $P$ -values for morphological leaf traits, nutrient status in leaves and nitrogen-use efficiency at St-Édouard in 2005 and 2006. ....	102
Table 5.7. Pearson product-moment correlations ( $r$ ) for growth traits of various hybrid poplar clones versus leaf nutrient concentrations measured in two experiments at St-Rémi and St-Édouard, Québec, in 2005 and 2006.....	105

## Liste des figures

- Figure 3.1. Experimental layout of the hybrid poplar-hardwood-soybean intercropping system showing (a) a single block, and (b) the location of the measurements in a NM-3729 plot in field B in 2005. ....50
- Figure 3.2. Percent total light transmittance in 2005 (a) and 2006 (b) as influenced by hybrid poplar clone, orientation and distance (m) from the hybrid poplar row, in a hybrid poplar-hardwood-soybean intercropping system in southwestern Québec, Canada. The means were calculated from observations made in field B (spacing = 8 m). Vertical lines indicate the standard deviations. The significant ANOVA probability values ( $p$ ) are indicated in the upper right corner. For each of the combinations of clone, orientation and distance, the means with different letters are significantly different at  $p < 0.05$  (Tukey's multiple means comparison test). ....55
- Figure 3.3. Yield and yield components of soybean in 2005 (a, c, e, g, i, k) and 2006 (b, d, f, h, j, l) as influenced by hybrid poplar clone, orientation and distance (m) from the hybrid poplar row, in a hybrid poplar-hardwood-soybean intercropping system in southwestern Québec, Canada. TD, TD-3230; DN, DN-3308; NM, NM-3729; W, west; E, east; 2, 3, 4, 5 and 6: distance (m) from hybrid poplar row. Each result is presented in the form of an absolute value and a relative value (in parentheses), which indicates the absolute value as a function of the reference value (without the influence of trees, 100%). The significant ANOVA probability values ( $p$ ) are indicated in the upper right corner. For each of the treatment combinations presented, the means with different letters are significantly different at  $p < 0.05$  (Tukey's multiple means comparison test). NS, not significant. ....58
- Figure 4.1. Effects of treatments and distance from hybrid poplar row on soil microbial biomass (A), and  $q\text{CO}_2$  (B) during the 2005 and 2006 growing seasons. Vertical lines represent standard deviations.  $n = 8$  per distance. For each treatment, different lower case letters indicate significant differences between distances, according to Tukey's Multiple Range Test ( $p < 0.05$ ); different upper case letters indicate significant differences between treatments. I = intercropping, H = harrowing. ....80
- Figure 4.2. Effects of treatments and distance from hybrid poplar row on soil inorganic-N (A),  $\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$  ratio (B), and net nitrification rate (C) during the 2005 and 2006 growing seasons. Vertical lines represent standard deviations.  $n = 8$  per distance. For each treatment, different lower case letters indicate significant differences between distances, according to Tukey's Multiple Range Test ( $p < 0.05$ ); different upper case letters indicate significant differences between treatments. I = intercropping, H = harrowing. ....81
- Figure 5.1. Effect of treatments on hybrid poplar height and diameter over time in two experiments at (a) St-Rémi ( $n = 36$  to 108 plants per treatment) and (b) St-Édouard ( $n = 49$  to 126 plants per treatment), in southern Québec, Canada. Treatment abbreviations: H = harrowing, I = intercropping. Significant differences ( $p < 0.05$ ) between treatments are indicated by different letters (Tukey's multiple means comparison test). In each site, treatments were introduced since June 2004. In October 2004, hybrid poplars were 5-y-old at St-Rémi and 1-y-old at St-Édouard. ....97

Figure 5.2. Leaf macronutrient vector diagrams for different hybrid poplar clones as affected by intercropping in two experiments at St-Rémi in 2005 (a) and 2006 (b), and at St-Édouard in 2005 (c) and 2006 (d). All values are normalized with respect to harrowing treatment values (set to 100), represented by the open circles. Solid vectors indicate nutrient deficiency; dotted vectors indicate nutrient sufficiency; dash vectors indicate nutrient dilution (Haase and Rose 1995)..... 104

## Chapitre 1. Introduction générale

L'évolution de l'agriculture québécoise s'est accompagnée d'un gain spectaculaire de productivité, mais aussi, dans bien des cas, d'une exclusion de l'arbre, qui a été progressivement rejeté des campagnes au profit de grandes exploitations mécanisées. Cela n'a pas été sans entraîner divers problèmes environnementaux auxquels est confrontée la société d'aujourd'hui. Le rétablissement de l'arbre dans le paysage agricole apparaît donc comme un moyen d'atténuer les impacts de l'agriculture intensive, notamment ceux liés à la pollution diffuse (Cogliastro *et al.* 2008).

Les systèmes de cultures intercalaires (SCI), qui consistent en la plantation de rangées d'arbres largement espacées les unes des autres, de façon à pouvoir allouer les bandes intercalaires à des plantes cultivées, constituent une avenue à explorer pour faire bénéficier les terres agricoles des fonctions écologiques des arbres (Reisner *et al.* 2007; Gordon *et al.* 2008). Ces systèmes novateurs, qui suscitent un intérêt grandissant dans plusieurs pays tempérés, pourraient aussi intensifier la plantation d'arbres feuillus et optimiser sa rentabilité, tout en répondant de façon originale à la nécessité d'accroître la production de bois de grande valeur indispensable à l'industrie du meuble (Bradley *et al.* 2008). Des études récentes démontrent en effet que certains SCI s'avèrent plus rentables que les systèmes agricoles ou forestiers conventionnels (Graves *et al.* 2007), tout en contribuant à la conservation des sols, à la séquestration du carbone et à l'accroissement de la biodiversité (Thevathasan *et al.* 2004; Palma *et al.* 2007).

L'objet d'étude en lui-même constitue une approche novatrice pour le Québec. Bien que de nombreux travaux de recherche aient été réalisés sur les SCI depuis quelques années en Ontario, aux États-Unis et en Europe, ceux-ci demeurent encore méconnus au Québec. En l'absence de résultats probants obtenus en territoire québécois, certains intervenants des secteurs de l'agriculture, de la foresterie, de l'environnement et de l'aménagement rural se montrent ainsi sceptiques quant à la faisabilité technique, voire même l'intérêt scientifique, de tels systèmes. La présente thèse vise donc à combler ce manque de connaissances en tentant d'apporter une base scientifique étoffée, éprouvée en sol québécois et liée à des

domaines de recherche aussi variés que l'écologie, la science des sols, la sylviculture et l'agronomie.

Dans le cadre de la présente thèse, le potentiel des SCI pour le Québec a été étudié, en accordant une attention particulière à la productivité de la culture intercalaire et des arbres, aux facteurs environnementaux qui la conditionnent et aux façons de l'optimiser. Le corps de la thèse est composé de quatre chapitres rédigés sous forme d'articles scientifiques. Le premier de ces manuscrits (chapitre 2) fait une synthèse exhaustive des connaissances actuelles concernant les SCI avec arbres feuillus en climat tempéré et porte un regard sur leur potentiel d'application au Québec. Cette revue a été une source d'inspiration importante dans la définition des objectifs et des hypothèses de recherche de cette thèse, lesquels sont présentés à la fin du chapitre. Les trois manuscrits suivants (chapitres 3, 4 et 5) présentent les résultats obtenus dans les toutes premières parcelles expérimentales sur les SCI implantées au Québec. Le chapitre 3 explore les effets de la concurrence des arbres pour les ressources, en particulier celle pour la lumière, sur différentes composantes du rendement de la culture intercalaire, ainsi que la façon dont cette concurrence peut être maîtrisée par la gestion du système. Pour sa part, le chapitre 4 permet de comparer un traitement comportant une culture intercalaire de soya à un traitement sans culture en ce qui a trait à différents indices de qualité du sol. Le dernier manuscrit (chapitre 5) concerne quant à lui les effets de la culture intercalaire sur la croissance et le statut nutritif de différents clones de peupliers hybrides. Finalement, les quatre manuscrits sont suivis d'une conclusion générale qui récapitule les principaux résultats de l'étude et propose certaines pistes pour l'avenir.

## **Références**

- Bradley, R.L., Olivier, A., Thevathasan, N., Whalen, J. 2008. Environmental and economic benefits of tree-based intercropping systems. *Policy Options* 29: 46-49.
- Cogliastro, A., Bouchard, A., Domon, G., Bernier, L. 2008. Les hauts et les bas de la forêt feuillue : sommes-nous prêts pour un nouveau changement de paysage? *Policy Options* 29: 58-61.
- Gordon, A.M, Thevathasan, N.V., Klironomos, J., Bradley, R.L., Shipley, B., Cogliastro, A., Olivier, A., Whalen, J. 2008. Agroforestry in the world: lessons for Canada. *Policy Options* 29: 50-53.

- Graves, A.R., Burgess, P.J., Palma, J.H.N., Herzog, F., Moreno, G., Bertomeu, M., Dupraz, C., Liagre, F., Keesman, K., van der Werf, W., Koeffeman de Nooy, A., van den Briel, J.P. 2007. Development and application of bio-economic modelling to compare silvoarable, arable, and forestry systems in three European countries. *Ecol. Eng.* 29: 434-449.
- Palma, J.H.N., Graves, A.R., Bunce, R.G.H., Burgess, P.J., de Filippi, R., Keesman, K.J., van Keulen, H., Liagre, F., Mayus, M., Moreno, G., Reisner, Y., Herzog, F. 2007. Modeling environmental benefits of silvoarable agroforestry in Europe. *Agric. Ecosyst. Environ.* 119: 320-334.
- Reisner, Y., de Filippi, R., Herzog, F., Palma, J. 2007. Target regions for silvoarable agroforestry in Europe. *Ecol. Eng.* 29: 401-418.
- Thevathasan, N.V., Gordon, A.M., Simpson, J.A., Reynolds, P.E., Price, G.W., Zhang, P. 2004. Biophysical and ecological interactions in a temperate tree-based intercropping system. *J. Crop Improv.* 12: 339-363.



## **Chapitre 2. Cultures intercalaires avec arbres feuillus : quel potentiel pour le Québec ?**

À l'exception de la section « Objectifs de recherche » qui le conclut, ce chapitre a été publié dans la revue *The Forestry Chronicle*.

Rivest, D., Olivier, A. 2007. Cultures intercalaires avec arbres feuillus : quel potentiel pour le Québec ? *The Forestry Chronicle* 83(4): 526-538.

## **Résumé**

La plantation de feuillus représente une bonne opportunité pour intensifier la production de bois de qualité. En l'absence de revenus à court terme, ses bénéfices paraissent toutefois incertains pour les propriétaires privés. Les systèmes de cultures intercalaires (SCI), qui suscitent un intérêt croissant dans plusieurs pays tempérés, constituent une avenue à explorer pour dynamiser la plantation de feuillus et maximiser sa rentabilité, notamment dans l'écozone des plaines à forêts mixtes du Québec. Les résultats d'études récentes démontrent que les cultures intercalaires ne nuisent généralement pas à la croissance des arbres et peuvent même dans certains cas l'améliorer. En plus de présenter de multiples atouts environnementaux, notamment en ce qui concerne la fertilité des sols, la biodiversité et le paysage, les SCI s'avèrent souvent plus rentables que les systèmes conventionnels de plantation forestière. En revanche, les arbres peuvent entrer en concurrence avec les cultures pour la lumière, l'eau et les éléments minéraux, diminuant la productivité agricole. L'itinéraire technique propre aux SCI permet toutefois de maîtriser en partie cette compétition. Les perspectives de développement des SCI sont discutées dans le contexte biophysique et socio-économique propre à l'écozone des plaines à forêts mixtes du Québec.

## **Abstract**

Hardwood plantations constitute a good opportunity to intensify the production of high-quality timber. However, in the absence of short-term investment returns, their economic benefits seem uncertain for landowners. Intercropping systems, which are stirring up interest in many temperate countries, could constitute an innovative way to increase the use of hardwood plantations and maximize their profitability, in particular in the mixed wood plain ecozone in Quebec. Results from recent studies show that intercrops do not usually affect tree growth and could even stimulate it in some cases. Furthermore, in addition to their various environmental benefits related to soil fertility, biodiversity and landscape, intercropping systems are quite often more profitable than conventional forest plantations. Finally, even though trees can compete with crops for light, water and nutrients, decreasing crop productivity, the technical itinerary specific to intercropping systems

allows for the control of at least part of this competition. The development perspectives of intercropping systems are discussed taking into account the biophysical and socio-economic context specific to the mixed wood plain ecozone in Quebec.

## **Introduction**

Les besoins croissants pour du bois de feuillus de qualité, ainsi que la volonté de réhabiliter ou de conserver intégralement certaines forêts naturelles (Commission d'études sur la gestion de la forêt publique québécoise 2004) pourraient conduire à recourir davantage à la plantation d'arbres feuillus (feuillus à bois noble et peupliers hybrides) au Québec. Historiquement, toutefois, celle-ci y a toujours joué un rôle marginal. Entre 1999 et 2005, il ne s'est en effet planté que 195 ha de feuillus en moyenne annuellement sur les terres privées du Québec (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune 2006). Or, l'industrie québécoise du sciage et du déroulage fait face à un important déficit de bois de feuillus. Ainsi, en 2003, près de 38 % des billes de sciage de feuillus à bois dur nécessaires pour combler ses besoins ont dû être importées (Commission d'études sur la gestion de la forêt publique québécoise 2004).

Plusieurs terres agricoles qui ne présentent plus qu'un intérêt marginal dans le contexte d'une agriculture moderne ont pourtant un réel potentiel sylvicole (Pan *et al.* 1999). Malheureusement, de fortes résistances, issues notamment du secteur agricole, constituent un frein important à la plantation de feuillus sur ces terres. Qui plus est, le propriétaire désireux d'y planter des arbres ne peut se prévaloir des subventions allouées par les Agences régionales de mise en valeur des forêts privées, qu'à la condition d'avoir l'accord du ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec par l'entremise de ses agronomes. La plantation de feuillus à bois noble n'est donc pratiquée que par une minorité de propriétaires privés, d'autant plus que la plupart d'entre eux estiment qu'elle exige des investissements considérables en termes de temps et d'argent en raison des techniques sylvicoles particulières qui doivent y être mises en œuvre (Rivest 2004). De fait, les rares études économiques qui ont été réalisées soulignent l'incertitude de la rentabilité

en l'absence de subventions et de revenus supplémentaires à court et à moyen terme (Robitaille 1999).

Pour contourner ces difficultés, de nouvelles stratégies de plantation de feuillus sont actuellement proposées aux propriétaires privés. On peut citer en exemple la plantation de peupliers hybrides et de feuillus nobles disposés en rangées alternées (Cogliastro *et al.* 2001) et l'enrichissement de friches arbustives (Cogliastro *et al.* 2006) et de peuplements forestiers dégradés (Truax *et al.* 2000 ; Paquette *et al.* 2006). Bien qu'il soit pratiquement inconnu des acteurs de la production forestière et agricole, le système de cultures intercalaires (SCI) constitue une autre avenue à explorer pour dynamiser la plantation de feuillus et maximiser sa rentabilité, tout en intégrant les fonctions environnementales de l'arbre à l'activité agricole, en particulier dans l'écozone des plaines à forêts mixtes. Au cours des dernières années, de nombreux essais expérimentaux effectués notamment en Amérique du Nord et en Europe ont en effet démontré l'intérêt des SCI, aussi bien au plan de la productivité que pour leurs bienfaits environnementaux. Les SCI présentent aussi l'avantage de maintenir les potentialités agricoles des espaces cultivables, ce qui n'est pas le cas des modèles classiques de plantation. Un tel atout pourrait favoriser le maillage entre les forestiers et les agriculteurs du Québec, et stimuler par le fait même l'établissement de nouvelles plantations de feuillus.

La présente synthèse offrira un compte rendu des différents SCI et des connaissances actuelles concernant la productivité, les bénéfices environnementaux, la rentabilité et l'itinéraire technique des SCI en climat tempéré, afin d'évaluer leur potentiel pour l'écozone des plaines à forêts mixtes du Québec dans un contexte de recherche de systèmes durables et viables de plantation de feuillus.

## **Les associations d'arbres feuillus et de cultures intercalaires**

Les SCI consistent en la plantation de rangées d'arbres largement espacées les unes des autres, ce qui permet d'allouer les bandes intercalaires à des plantes agricoles (Gordon et Newman 1997). Bien que l'intérêt pour les SCI soit très ancien, le développement de

formes modernes d'association n'en est qu'à ses tous premiers pas (Sanchez 1995 ; Garrett et Buck 1997 ; Jose *et al.* 2004).

### **Les formes traditionnelles d'association**

Les premiers exemples connus d'associations d'arbres et de cultures intercalaires remontent à plus de 2000 ans, dans les pays méditerranéens, où des écrits anciens mentionnent l'association de cultures céréalières, et notamment du blé (*Triticum* spp.), à l'olivier (*Olea europea* L.) (Lelle et Gold 1994), à l'amandier (*Prunus amygdalus*), à l'arganier (*Argania* spp.), au châtaignier (*Castanea sativa* Mill.) et aux chênes fruitiers fourragers (*Quercus* spp.) (Dupraz et Newman 1997). En Chine, dès le 13<sup>e</sup> siècle, des récits mentionnent les bénéfices qu'on peut tirer de l'association du mûrier (*Morus* spp.) avec des cultures comme le soya (*Glycine max* (L.) Merr.), le sésame (*Sesamum* spp.) et le melon (*Cumis* spp.) (Wu et Zhu 1997).

À la suite de l'intensification de l'agriculture, ces SCI ont, pour la plupart, largement régressé. Néanmoins, certaines pratiques traditionnelles sont demeurées très vivantes. On peut notamment citer l'exemple des cultures maraîchères hivernales dans les vergers de pêchers (*Prunus persica* (L.) Batsch) du Roussillon, en France (Dupraz et Newman 1997). Bien que développés empiriquement par les agriculteurs, ces SCI ont atteint un niveau appréciable de technicité. Dans certains pays comme l'Italie, la France et la Grèce, on retrouve plusieurs dizaines de milliers d'hectares de cultures intercalaires, en particulier de plantes céréalières et oléoprotéagineuses, dans de jeunes plantations de noyers (*Juglans* spp.) et de peupliers (*Populus* spp.) qui partagent avec elles les mêmes parcelles pour une période généralement comprise entre 2 et 15 ans (Eichhorn *et al.* 2006).

De concert avec la colonisation européenne, des pratiques traditionnelles similaires se sont développées en Amérique du Nord. Aux États-Unis, on peut citer l'exemple des cultures céréalières et maraîchères sous pacaniers (*Carya illinoensis* K. Koch) (Williams et Gordon 1992 ; Garrett et McGraw 2000), encore très populaires auprès de certains exploitants. Au Canada, des producteurs maraîchers du sud de l'Ontario intègrent depuis de nombreuses années diverses cultures herbacées entre les rangées de pêchers (Williams et Gordon 1992).

## **Le développement de formes modernes d'association**

Plus récemment, diverses initiatives visant à accroître la production de bois de feuillus tout en maintenant une activité agricole en territoire rural ont permis la conception de nouveaux SCI, en particulier en Chine, en Europe et en Amérique du Nord.

En Chine, les SCI avec le *Paulownia*, associé notamment au blé d'hiver, couvraient déjà il y a une dizaine d'années près de 1,8 million d'hectares (Wu et Zhu 1997), transformant complètement le paysage des vastes plaines du Nord de la Chine (Lu 2006).

En Europe, plusieurs essais ont été réalisés depuis une quinzaine d'années, notamment en France et au Royaume-Uni. Dans l'Hérault (France), une vingtaine d'essences d'arbres, en particulier le noyer hybride (*Juglans nigra* L. x *J. regia* L.) et le noyer noir (*Juglans nigra*), ont été associées à des cultures annuelles comme le blé dur (*Triticum durum* Desf.) et le colza (*Brassica napus* L.) (INRA et CRPF 2000), ou à des cultures fourragères pérennes comme la luzerne (*Medicago sativa* L.), le sainfoin (*Onobrychis sativa* Lam.) et la fétuque élevée (*Festuca arundinacea* Schreb.) (Dupraz *et al.* 1999b). Le suivi de plusieurs autres sites français, où l'on a associé notamment le merisier (*Prunus avium* L.) à des cultures pérennes (Balandier et Dupraz 1999) ou annuelles (Chiffot *et al.* 2006), a permis de nuancer certains pronostics pessimistes concernant la croissance de jeunes arbres soumis à l'influence de cultures intercalaires très compétitives (Frochot *et al.* 1986 ; Paris *et al.* 1998). L'association du peuplier hybride (*Populus* *hyb.*) et du blé d'hiver a elle aussi fait l'objet d'études approfondies sur différents sites, en France comme au Royaume-Uni (Dupraz et Newman 1997 ; Dupraz *et al.* 2005).

En Amérique du Nord, notamment en Ontario et aux États-Unis, plusieurs parcelles expérimentales sur les SCI ont été implantées depuis une quinzaine d'années. La plupart concernent l'association du noyer noir et de grandes cultures (maïs (*Zea mays* L.), blé, soya, avoine (*Avena sativa* L.), orge (*Hordeum vulgare* L.) et plantes fourragères) (Garrett et McGraw 2000). Parmi les autres espèces d'arbres feuillus qui ont été intégrées à des dispositifs de SCI, on peut citer le chêne rouge (*Quercus rubra* L.) (Gillespie *et al.* 2000), le peuplier hybride (Thevathasan et Gordon 2004), le frêne d'Amérique (*Fraxinus*

*americana* L.) (Williams et Gordon 1992) et l'érable argenté (*Acer saccharinum* L.) (Miller et Pallardy 2001 ; Thevathasan et Gordon 2004). Ces formes modernes d'association, qui comprennent plusieurs espèces d'arbres et de cultures adaptées à l'écozone des plaines à forêts mixtes, sont généralement présentées comme étant adaptées aux contraintes de la mécanisation.

En marge de la recherche, les initiatives de certains exploitants témoignent elles aussi de la variété des formes d'association possibles. Soulignons, entre autres, les cultures intercalaires de sapins de Noël (*Abies* spp.), de framboisiers (*Ribes* spp.), de bleuettiers (*Vaccinium* spp.) et de diverses plantes médicinales et ornementales sous noyer noir aux États-Unis (Garrett *et al.* 1991 ; Garrett et Harper 1998).

Cela étant dit, qu'est-ce qui peut motiver un exploitant, qu'il soit agriculteur ou forestier, à mêler arbres et cultures alors qu'ils poussent bien séparément ? C'est ce que nous tenterons d'évaluer dans les sections qui suivent.

## **La productivité des systèmes de cultures intercalaires**

Dans les SCI, les arbres et les cultures ont un impact les uns sur les autres. Il est donc nécessaire de piloter l'association de façon à optimiser leurs interactions positives tout en minimisant leurs interactions négatives.

### **L'influence des cultures intercalaires sur la croissance des arbres**

Même si les témoins forestiers (sans culture agricole) sont souvent absents des dispositifs expérimentaux de SCI, limitant ainsi les comparaisons qu'on peut effectuer entre les deux types de systèmes (Dupraz 1999 ; Stamps et Linit 1999), un certain nombre d'études menées en Europe et en Amérique du Nord permettent tout de même de comparer la croissance d'arbres feuillus plantés dans des SCI à celle d'arbres plantés dans des systèmes conventionnels de plantation forestière.

Ainsi, en France, Balandier et Dupraz (1999) ont rapporté que la hauteur et le diamètre des merisiers plantés en SCI (400 arbres/ha) étaient, dans l'ordre, de 45 et 79 % supérieurs à

ceux des merisiers de la plantation forestière de référence (1100 arbres/ha), sept années après la plantation. Il en était de même pour l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.), dont la hauteur et le diamètre étaient respectivement de 59 et 58 % supérieurs à ceux du témoin forestier. Aucune différence significative n'a toutefois été observée entre les deux traitements pour le chêne rouge et l'alisier (*Sorbus torminalis* (L.) Crantz). Chiffot *et al.* (2006) ont pour leur part observé qu'au terme des six premières années de croissance, le diamètre de merisiers (166 arbres/ha) et de noyers hybrides (100 arbres/ha) en SCI (succession triticales, orge, blé, blé, tournesol (*Helianthus annuus* L.) et orge) était, dans l'ordre, de 26 et 66 % supérieur à celui observé dans le traitement témoin (élimination de la végétation adventice à l'aide d'herbicides), et de 48 et 129 % supérieur à celui du traitement de jachère (aucun traitement de maîtrise de la végétation spontanée). En outre, chez les deux espèces, la hauteur, le volume du tronc, la biomasse foliaire et le contenu en azote des feuilles étaient plus élevés en SCI que dans le témoin.

En Italie, Paris *et al.* (2005), ont observé quant à eux qu'après cinq années de croissance, la hauteur et le diamètre des noyers communs étaient significativement plus élevés dans un SCI avec luzerne que dans un système où la végétation spontanée était fauchée à trois reprises durant la saison de végétation. Les gains de croissance en diamètre des noyers communs étaient de l'ordre de 9 % pour un SCI sans paillis de plastique et de 41 % pour un SCI avec paillis de plastique.

Diverses hypothèses ont été avancées pour expliquer la croissance plus rapide des arbres associés à des cultures intercalaires dans ces essais. Selon Dupraz *et al.* (1999a), les arbres des SCI pourraient notamment tirer parti de la fertilisation azotée dévolue aux cultures, soit en récupérant l'azote en profondeur après sa lixiviation, soit en prélevant la proportion appliquée directement dans la bande non cultivée.

Il convient par ailleurs de mentionner que dans le seul essai réalisé au Québec pour lequel des données soient actuellement disponibles concernant l'impact des SCI sur la productivité des arbres, Rivest *et al.* (2005) ont observé que l'accroissement en hauteur des peupliers hybrides (*Populus* spp.) d'un SCI avec soya (694 arbres/ha) était supérieur de 15 % à celui



des peupliers de la plantation forestière de référence qui comportait un entretien mécanique conventionnel des allées (2 passages annuels de la herse à disque), et cela dès la première année d'application des traitements dans un site établi 5 ans plus tôt. Aucune différence significative n'a cependant été observée entre les deux traitements sur un site adjacent comportant 521 arbres/ha. Il en était de même pour l'accroissement en diamètre dans les deux sites.

L'impact des SCI sur la croissance des arbres n'est pas bénéfique dans tous les contextes. Burgess *et al.* (2004) ont mesuré qu'après sept années de croissance, la hauteur et le diamètre de peupliers hybrides (*Populus* spp., 156 arbres/ha) dans des SCI comportant diverses successions de blé, d'orge, de gourgane (*Vicia faba* L.), de pois (*Pisum sativum* L.) et de moutarde (*Brassica alba* L.) étaient, dans l'ordre, significativement inférieurs de 10 et 21 % à ceux mesurés dans le traitement de référence (élimination mécanique de la végétation adventice). D'autres études, par exemple celle de Powell et Bork (2004), en Alberta (Canada), avec le peuplier faux tremble (*Populus tremuloides* Michx.) et la luzerne ou le calamagrostis du Canada (*Calamagrostis canadensis* (Michx.) Beauv.), ont montré une réduction de la croissance de l'arbre en présence de cultures intercalaires. Selon les auteurs, un tel impact pourrait être dû principalement à la concurrence pour l'eau exercée par les cultures dans un contexte de déficit hydrique beaucoup plus préoccupant que ce qu'on observe généralement dans l'écozone des plaines à forêts mixtes du Canada.

Le type de culture associée a évidemment son importance. Dans une étude réalisée en France, Dupraz *et al.* (1999b) ont observé une augmentation significative du contenu foliaire en azote du noyer noir et du noyer hybride lorsqu'ils étaient cultivés en association avec des plantes fixatrices d'azote plutôt qu'avec des plantes non-fixatrices. Aux États-Unis, Van Sambeek *et al.* (1986) ont obtenu des résultats similaires, en plus d'observer un gain significatif du contenu en nitrates dans le sol. En Ontario, Williams et Gordon (1992) ont pour leur part observé que la hauteur du frêne d'Amérique et du peuplier hybride (*Populus deltoides* Bartr. ex Marsh. x *P. nigra* L.), après trois années de croissance, était plus élevée en présence de maïs ou de soya qu'en présence d'orge. Le développement de la biomasse de l'orge survient en effet rapidement au début de la saison de végétation, ce qui

résulte en une forte concurrence, en particulier pour l'eau (Williams et Gordon 1994). La disponibilité de l'eau au début de la saison de croissance s'est également avérée plus faible dans l'association avec le blé, comparativement au maïs et au soya (Williams et Gordon 1995).

Bien que les données disponibles soient insuffisantes pour le confirmer, la plupart des essais européens ou nord-américains sur les SCI n'ayant été implantés que récemment, on peut donc s'attendre à des révolutions sensiblement plus courtes des arbres plantés dans les SCI comparativement aux plantations conventionnelles ou aux forêts naturelles, à tout le moins dans le cas des associations les plus performantes (Dupraz 1994b). Selon Janin *et al.* (1997), le développement du merisier en SCI pourrait même permettre d'obtenir des sujets commercialisables en moins de 40 ans si une attention particulière est portée à la taille de formation et à l'élagage, alors qu'il faut compter entre 70 et 90 ans pour des sujets en forêt. Selon ces auteurs, cela pourrait se faire sans altérer la qualité du bois du merisier, à l'exception du bois de coeur dont la coloration caractéristique est recherchée en ébénisterie. Cutter et Garrett (1993) ont pour leur part démontré que des noyers noirs (densité initiale de 270 arbres/ha) associés pendant 14 ans à des cultures intercalaires (rotation blé d'hiver - soya pendant les dix premières années, puis cultures fourragères de *Dactylis glomerata* L. et *Trifolium* spp.) avaient un bois dont la densité spécifique était plus élevée que celui des arbres du témoin forestier. Selon ces auteurs, les noyers noirs associés à des cultures intercalaires pourraient produire, sur de bons sites, du bois de qualité « déroulage » en 50 ou 60 ans, alors que les projections pour les plantations conventionnelles sont le plus souvent de 80 à 100 ans. Les arbres des SCI, parce qu'ils sont plantés à larges écartements, développent en effet des cimes plus importantes que ceux plantés en parcelles forestières, ce qui se traduit généralement par une croissance radiale accélérée (Cabanettes *et al.* 1999). On doit cependant s'attendre à obtenir, à la récolte finale du bois, des billes de pied plus courtes, mais plus grosses que celles récoltées dans les forêts naturelles.

### **L'impact des arbres sur la productivité des cultures intercalaires**

L'influence des jeunes arbres feuillus sur la productivité des plantes agricoles est généralement négligeable (Garrett et Kurtz 1983 ; Thevathasan et Gordon 1997 ; Dupraz *et al.* 1999a ; Gakis *et al.* 2004) et peut même lui être bénéfique dans certains cas (Jose *et al.*

1995; Burgess *et al.* 2004). Cependant, avec les années, le rendement des cultures est souvent appelé à décliner, au fur et à mesure que les arbres croissent.

En règle générale, la productivité des cultures intercalaires est davantage affectée à proximité des arbres, là où les relations de compétition pour la lumière, l'eau et les éléments minéraux du sol sont les plus critiques. On distingue essentiellement deux grands types d'interactions écologiques entre arbres et cultures : les interactions aériennes, qui sont liées à l'ombrage des arbres et au microclimat de l'association (température, humidité de l'air, vitesse du vent, etc.), et les interactions souterraines, qui sont généralement abordées en termes de compétition pour l'eau et les éléments minéraux, d'allélopathie, de remontée biologique des nutriments via les racines des arbres et de fixation de l'azote atmosphérique (Ong *et al.* 1991 ; Baldy *et al.* 1993 ; Ong et Huxley 1996 ; Jose *et al.* 2004).

Diverses études ont montré l'importance des interactions aériennes dans l'élaboration du rendement des plantes agricoles. En Chine, dans un système associant des *Paulownia* d'environ 12 m de hauteur à du blé d'hiver, Chirko *et al.* (1996a) ont mesuré une forte corrélation positive entre le débit de fluence photonique ( $Q_p$ ) et le rendement en grains du blé. À 2,5 m des *Paulownia*, là où les valeurs du  $Q_p$  étaient les plus faibles, le rendement en grains était de 26 % inférieur à celui mesuré dans le traitement témoin (sans arbres). Une autre étude de Chirko *et al.* (1996b) a démontré que le rendement en grains à l'est de la rangée de *Paulownia*, où les valeurs du  $Q_p$  étaient les plus élevées durant les stades critiques du développement du blé, était supérieur d'environ 20 % à celui mesuré à l'ouest ou au nord. Aucune différence en ce qui a trait au taux d'humidité du sol n'a été observée entre les trois orientations, ce qui indique que la compétition souterraine était sans doute négligeable.

En Ontario, dans un SCI comportant des peupliers hybrides (*Populus deltoides* x *P. nigra*) (PH) ou des érables argentés (EA) ayant une hauteur moyenne de 10 m, Reynolds *et al.* (2007) ont rapporté des diminutions moyennes de rendement en grains, au terme des dixième et onzième années de croissance des arbres, de 25 (EA) à 35 % (PH) du maïs et de 21 (EA) à 40 % (PH) du soya, par rapport à ceux mesurés dans un traitement témoin

(culture sans arbres). Selon les auteurs, le rendement en grains du maïs et du soya était fortement corrélé avec le rayonnement photosynthétiquement actif (RPA) et l'assimilation nette du carbone, mais non avec le potentiel hydrique.

L'ombrage des arbres ne se traduit toutefois pas toujours par une diminution de rendement des cultures associées. On sait notamment que certaines plantes fourragères, par exemple le *Desmodium canescens* (L.) DC. et le *Desmodium paniculatum* (L.) DC., peuvent présenter une biomasse totale et un contenu total en protéines supérieurs, sous un certain ombrage, à ceux observés en pleine lumière (Lin *et al.* 1999).

En Indiana, Gillespie *et al.* (2000) ont même observé que l'ombrage porté par des noyers noirs et des chênes rouges de 10 ans, d'une hauteur moyenne d'environ 7,5 m, n'avait aucune influence marquée, à l'interface arbre-culture, sur la productivité du maïs. Dans ces parcelles, les interactions souterraines, et en particulier la compétition pour l'eau, ont par contre affecté significativement la productivité du maïs (Jose *et al.* 2000a). L'utilisation de barrières de polyéthylène à l'interface arbre-culture et le cernage racinaire des arbres (à 1,2 m des arbres et à 1,2 m de profondeur), c'est-à-dire la maîtrise mécanique (par exemple à l'aide d'une sous-soleuse) des racines des arbres pour les empêcher de pousser vers l'allée cultivée, se sont avérés efficaces pour neutraliser cette compétition en augmentant la disponibilité de l'eau du sol pour le maïs (Jose *et al.* 2000a).

Au Missouri, Miller et Pallardy (2001) sont parvenus à des résultats similaires pour un SCI associant des érables argentés de 10 (7 m de hauteur) et 11 ans au maïs. Dans le traitement combinant un cernage racinaire avec une barrière de polyéthylène, le rendement du rang de maïs le plus proche des arbres était de 28 à 38 % supérieur à celui mesuré dans le témoin sans barrière. Ce traitement a en effet permis d'augmenter, à l'interface arbre-culture, le contenu en eau du sol, le potentiel hydrique avant la levée du jour et à mi-journée et la photosynthèse nette à mi-journée. En l'absence d'une barrière souterraine, la capacité du cernage racinaire des arbres à augmenter la productivité des cultures en limitant la compétition souterraine interspécifique a également été rapportée dans des études portant sur des haies brise-vent (Rasmusen et Shapiro 1990 ; Hou *et al.* 2003). L'utilisation du

cernage racinaire permet donc d'augmenter le nombre d'années où la culture intercalaire est envisageable, ce qui, comme le suggèrent Benjamin *et al.* (2000) et Miller et Pallardy (2001), en fait une pratique culturale tout à fait rentable. Afin de forcer les racines des arbres à explorer les horizons profonds du sol, qui ne sont généralement pas exploités par la culture intercalaire, il est probablement judicieux d'appliquer ce type de traitement régulièrement et le plus tôt possible, alors que les arbres sont encore jeunes (Miller et Pallardy 2001).

En ce qui concerne la compétition pour les éléments nutritifs du sol, Jose *et al.* (2000b) et Miller et Pallardy (2001) ont démontré qu'elle est souvent négligeable, dans la mesure où les exigences nutritives de la culture intercalaire sont comblées par un programme approprié de fertilisation. Par contre, dans un SCI associant des pacaniers de 47 ans au cotonnier en Floride, Allen *et al.* (2004a) ont observé que l'utilisation d'une barrière souterraine de polyéthylène avait entraîné une augmentation significative de la biomasse aérienne du cotonnier (feuilles, tige et grains) (58 %) et de l'utilisation de l'azote provenant de la fertilisation (*fertiliser-use efficiency*) (29 %) par rapport au traitement sans barrière. Ceci indique que le cotonnier utiliserait plus efficacement les nutriments apportés sous forme d'engrais inorganique lorsque la compétition souterraine entre l'arbre et la culture est neutralisée.

La modification du microclimat résultant de la présence des arbres dans les champs peut elle aussi influencer la productivité des cultures intercalaires. Ainsi, en limitant les stress thermiques, les arbres peuvent entraîner une augmentation des taux de germination et de survie de certaines cultures comme le cotonnier et le soya (Jose *et al.* 2004). En Chine, des études menées dans un système associant le *Paulownia* et le blé d'hiver ont permis d'observer une augmentation de la teneur brute en protéines du blé, notamment en raison de l'amélioration des conditions microenvironnementales (réduction de la vitesse du vent et du taux d'évaporation de l'eau, et augmentation de l'humidité relative de l'air et de la disponibilité en eau du sol) (Zhu 1991 ; Wang et Shogren 1992). L'effet bénéfique des haies brise-vent sur le microclimat et la productivité des cultures agricoles associées est bien connu (Kort 1988 ; Brandle *et al.* 2004). Les connaissances acquises sur ces systèmes

sont toutefois difficilement transposables aux SCI, en raison du fait que la densité d'arbres y est généralement bien inférieure à celle que l'on retrouve en culture intercalaire.

## **Les bénéfices environnementaux des systèmes de cultures intercalaires**

Les SCI sont des agrosystèmes originaux qui répondent à des enjeux environnementaux multiples. Leur structure particulière, intermédiaire entre celles des monocultures intensives et des écosystèmes naturels complexes, permet une meilleure exploitation des ressources du milieu en raison de la complémentarité de l'arbre et des cultures pour l'utilisation de l'eau, des éléments minéraux et du rayonnement lumineux, ainsi que de leur impact bénéfique sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol.

Plusieurs travaux indiquent que les SCI peuvent contribuer à augmenter les retours de matière organique au sol, comparativement aux systèmes agricoles, grâce aux résidus de la biomasse aérienne des arbres et à la décomposition *in situ* de leurs racines (Park *et al.* 1994 ; Thevathasan et Gordon 1997 ; Jose *et al.* 2000b ; Lee et Jose 2003). De façon générale, la qualité de la litière des arbres feuillus est supérieure à celle des conifères, ce qui se traduit par des taux de minéralisation de l'azote plus élevés (Reich *et al.* 1997). À Guelph, Thevathasan et Gordon (2004) ont estimé que les apports annuels des litières de peupliers hybrides dans des SCI peuvent représenter l'équivalent de 7 kg/ha N par an. Singh *et al.* (2001) ont cependant observé, dans des SCI avec le peuplier deltoïde (*Populus deltoides*), que la litière et le sol étaient riches en substances phénoliques phytotoxiques pouvant avoir un effet allélopathique sur les cultures associées. Néanmoins, les humus provenant des litières d'arbres feuillus sont souvent d'excellente qualité et peuvent donc être gérés comme une véritable fertilisation, ce qui peut se traduire par une diminution de l'application d'engrais inorganiques. Leur incorporation au sol nécessite toutefois la mise en oeuvre d'itinéraires techniques spécifiques (Baldy *et al.* 1993).

L'apport au sol de matière organique provenant des arbres entraîne généralement une augmentation de la biomasse microbienne (Seiter *et al.* 1999 ; Lee et Jose 2003 ; Wojewoda et Russel 2003), de l'activité enzymatique (Mungai *et al.* 2005) et des

populations d'invertébrés (Park *et al.* 1994), notamment de vers de terre (Price et Gordon 1999) qui contribuent à diminuer la densité apparente du sol et à augmenter la minéralisation des éléments nutritifs. Dans un système pacanier – cotonnier de 47 ans, Lee et Jose (2003) ont mis en évidence une augmentation de 130 % de la biomasse microbienne par rapport à une monoculture du cotonnier, de même que de 61 % de sa respiration, ce qui se traduit par une amélioration de la qualité du sol. C'est généralement dans la zone située à proximité des rangées d'arbres que les paramètres physico-chimiques et biologiques qui caractérisent la fertilité des sols se trouvent particulièrement améliorés (Park *et al.* 1994 ; Browaldh 1995 ; Thevathasan et Gordon 1997 ; Price et Gordon 1999 ; Seiter *et al.* 1999 ; Mungai *et al.* 2005).

L'accroissement du taux de matière organique du sol et la présence d'une strate arborée fixatrice de CO<sub>2</sub> portent à croire que les SCI peuvent aussi avoir un rôle à jouer dans la séquestration du carbone, devenant ainsi un choix tout indiqué pour lutter contre l'effet de serre (Kort et Turnock 1999 ; Pandey 2002 ; Lee et Jose 2003 ; Oelbermann *et al.* 2004). Le choix de sites de plantation et de traitements sylvicoles appropriés (Paul *et al.* 2002), ainsi que la sélection de certaines essences à croissance rapide, tel le peuplier hybride (Kort et Turnock 1999 ; Thevathasan et Gordon 2004), permettent d'augmenter le potentiel de fixation de carbone atmosphérique des SCI. En Ontario, Peich *et al.* (2006) ont évalué qu'à la treizième année de croissance des arbres, le flux net de carbone dans un SCI associant le peuplier hybride (*Populus deltoides* x *P. nigra*) et l'orge était de + 13,2 t/ha C par an, alors qu'il n'était que de + 1,1 t/ha C par an dans le SCI associant l'épinette de Norvège (*Picea abies* (L.) H. Karst) et l'orge et de - 2,9 t/ha C par an dans le système de monoculture d'orge. D'éventuels paiements aux producteurs agricoles pour la séquestration du carbone pourraient donc aider à promouvoir l'adoption des SCI auprès d'eux (Montagnini et Nair 2004 ; Wise et Cacho 2005).

Dans un autre ordre d'idée, l'augmentation de la rugosité de surface et de la stabilité du sol, grâce à la présence des racines des arbres, permet dans certains SCI de limiter le ruissellement de surface et d'accroître le stockage transitoire de l'eau en excès, comparativement aux systèmes agricoles conventionnels (Baldy *et al.* 1993). Des essais en

milieu méditerranéen ou tropical sec ont par ailleurs permis de montrer que les horizons supérieurs du sol peuvent être réalimentés en eau grâce à son prélèvement en profondeur par le système racinaire de l'arbre via un phénomène d'ascension hydraulique (*hydraulic lift*) (Burgess *et al.* 1998). En plus d'augmenter la disponibilité de l'eau pour les cultures agricoles, en particulier lors d'épisodes de sécheresse, ce phénomène pourrait permettre à l'arbre de mobiliser de l'azote autrement non disponible (van Noordwijk *et al.* 1996 ; Ong *et al.* 1999).

Les racines profondes des arbres peuvent également récupérer une partie des éléments fertilisants échappant à la culture par lessivage et lixiviation (*safety-net role*), ce qui permettrait, entre autres, d'atténuer la pollution des nappes par les nitrates (van Noordwijk *et al.* 1996). Cela a été mis en évidence dans un SCI associant le pacanier et le cotonnier par Allen *et al.* (2004b) qui ont mesuré que la concentration en nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) dans la solution du sol y était de 51 % inférieure (à 0,9 m de profondeur) à celle d'un traitement de référence où les racines des arbres et du cotonnier avaient été séparées par cernage racinaire. La capacité de l'arbre à limiter le lessivage des éléments minéraux du sol dépend toutefois de son patron d'enracinement. Selon Udawatta *et al.* (2005), le chêne bicoloré (*Quercus bicolor* Willd), dont le système racinaire est superficiel, récupérerait plus efficacement les nutriments lessivés provenant du ruissellement hypodermique que le chêne à gros fruits (*Quercus macrocarpa* Michx.) ou le chêne des marais (*Quercus palustris* Münchh). Il est intéressant de noter que Mulia et Dupraz (2006) ont observé que les arbres plantés en SCI développent des profils racinaires forts distincts de ceux des plantations conventionnelles, en raison notamment de la compétition de la culture intercalaire qui force les racines des arbres à se développer dans des horizons non exploités par la culture, en particulier en profondeur. Certains arbres peuvent par ailleurs contribuer à la dégradation de pesticides. Ce serait notamment le cas du peuplier deltoïde, dont la capacité à dégrader l'atrazine a été mise en évidence par Burken et Schnoor (1997).

Bien que les SCI soient souvent présentés comme pouvant contribuer à contrer l'érosion des sols, peu d'études ont abordé leur véritable impact (Garrett et McGraw 2000). Néanmoins, plusieurs travaux récents sur les haies brise-vent (Brandle *et al.* 2004) ou les



bandes riveraines arborées (Schultz *et al.* 2004) ont mis en évidence le rôle protecteur de l'arbre. Ainsi, Kurtz *et al.* (1991) ont démontré que l'intégration de noyers noirs à des cultures telles que le maïs et le soya était tout aussi efficace que l'utilisation de systèmes conventionnels de conservation du sol comme la culture en bandes (*strip crop*) et en terrasses pour limiter l'érosion du sol.

En ce qui a trait à la biodiversité, diverses études ont montré que la diversité et l'abondance des populations aériennes d'arthropodes étaient plus élevées dans les SCI que dans les monocultures agricoles (Peng *et al.* 1993 ; Stamps *et al.* 2002 ; Akbulut *et al.* 2003 ; Thevathasan et Gordon 2004). L'augmentation des populations de prédateurs des ravageurs des cultures pourrait favoriser la lutte contre ces ravageurs et limiter par le fait même le besoin de recourir à des pesticides (Stamps et Linit 1998). Un tel contrôle dépend toutefois de diverses considérations techniques comme le choix, la diversité et l'arrangement spatial des arbres, ainsi que les opérations culturales qui sont mises en œuvre (Dix *et al.* 1995).

Puisqu'ils forment une mosaïque d'habitats plus complexes et plus diversifiés que les systèmes agricoles conventionnels, les SCI permettent aussi d'attirer une plus grande quantité et une plus grande diversité de petits mammifères (Burgess 1999; Klau *et al.* 2005) et d'oiseaux (Williams *et al.* 1995). Ils peuvent également favoriser les déplacements de la faune en contribuant à relier les îlots forestiers.

Les SCI constituent donc une alternative tout indiquée à la séparation spatiale de l'agriculture et de la foresterie. Ils peuvent créer des paysages originaux, attractifs et favorables aux activités récréatives (Williams et Gordon 1992). Pour cette raison, leur adoption paraît particulièrement indiquée dans les milieux où le paysage a été fortement ouvert par l'agriculture.

### **La valeur économique des systèmes de cultures intercalaires**

En raison de la nouveauté des formes modernes de SCI, on possède peu de données sur leur rentabilité comparativement à des systèmes agricoles ou forestiers conventionnels.

Néanmoins, divers auteurs ont tenté d'apprécier cette rentabilité à l'aide de la modélisation. Bien que les approches et les objectifs varient selon le modèle, la démarche consiste généralement à quantifier les différents intrants et à en estimer les coûts, à simuler la croissance des arbres et des cultures, à estimer le revenu qu'on peut tirer de leurs produits et à déterminer la valeur actuelle nette (VAN) des SCI et de systèmes agricoles ou forestiers témoins sur un horizon de temps donné et à un taux d'actualisation spécifique (Graves *et al.* 2005).

Au Missouri, Garrett *et al.* (1991) ont estimé (en considérant un taux d'intérêt de 7,5 %, un indice de croissance (IC) du noyer noir de 19,8 m à 50 ans et une rotation de 60 ans) que la VAN à l'hectare (644 \$US) du SCI avec le noyer noir (267 arbres/ha, bois et noix du noyer noir, succession de soya, blé d'hiver, fétuque et pâturage) était supérieure à celle (-2 962 \$US) de la plantation pure de noyers noirs (741 arbres/ha) .

Garrett et Kurtz (1983) ont cependant démontré que la rentabilité du SCI avec le noyer noir dépend en grande partie du choix des cultures associées. Les auteurs ont notamment estimé (en tenant compte d'un accroissement annuel moyen (AAM) du diamètre de 8,5 mm et d'un taux d'intérêt de 7,5 %) que la VAN à l'hectare était la plus élevée (2 929 \$US) pour le SCI avec soya, blé d'hiver et fétuque, intermédiaire (291 \$US) pour le SCI avec fétuque et pâturage, et la plus faible (- 2 060 \$US) pour le SCI avec pâturage seulement.

Le choix de l'espèce ligneuse associée a lui aussi de l'importance. En Illinois, sur des sites moyennement productifs (IC des arbres de 22,9 m à 50 ans, rotation de 70 ans), Campbell *et al.* (1991) ont comparé la rentabilité de différents SCI (267 arbres/ha, succession de maïs, soya, blé et trèfle) à un système agricole conventionnel (mêmes cultures que celles des SCI). Un des scénarios avec noyer noir (AAM du diamètre de 8,6 mm, taux d'intérêt de 4 %) possédait une VAN supérieure (3 716 \$US) à celle du système agricole conventionnel (3 030 \$US) alors que la VAN du SCI avec du chêne rouge (AAM du diamètre de 4,1 mm) n'était que de 163 \$US.

D'autres études ont conclu que la VAN des SCI était légèrement inférieure à celle des systèmes agricoles conventionnels. Ainsi, le modèle développé par Dyack *et al.* (1999) prédit, dans le cas des scénarios de base développés pour la station expérimentale de l'Université de Guelph (taux d'intérêt de 5 %), une VAN à l'hectare du SCI (succession de maïs, blé ou orge, et soya pendant 20 ans) avec le noyer noir (96 arbres/ha, rotation de 55 ans) de 495 \$CAN, comparativement à 1 050 \$CAN dans le cas du système agricole conventionnel (mêmes cultures que celles du SCI). Les auteurs ont cependant pris la peine de souligner que le seuil qui sépare les VAN des deux systèmes équivaldrait à un montant annuel de seulement 42 \$CAN par hectare si le taux d'intérêt était de 6 %.

Au Royaume-Uni, Willis *et al.* (1993) ont modélisé la rentabilité de SCI (rotation de blé d'hiver, haricot et orge les sept premières années, puis pâturage jusqu'à la quinzième année) intégrant des peupliers hybrides. Selon les auteurs, les VAN à l'hectare (taux d'intérêt de 5 %, rotation de 18 ans et prise en compte de subventions allouées au prorata du nombre d'arbres plantés par hectare) des SCI étaient de 7 358 £ (*Populus deltoides* x *P. nigra*, AAM de 14 m<sup>3</sup>/ha, 188 arbres/ha) et 10 169 £ (*Populus deltoides* x *P. trichocarpa* Torr. & Gray, AAM de 22 m<sup>3</sup>/ha, 156 arbres/ha), alors que celle du système de monoculture de blé d'hiver (7 Mg/ha par an) était de 11 963 £. Les auteurs ont toutefois souligné l'importance des effets d'une possible fluctuation de la valeur des produits agricoles sur la VAN des systèmes de l'étude. Ainsi, dans le cas où les prix des produits agricoles étaient réduits de 20 % par rapport à ceux utilisés dans le scénario de base, la VAN du SCI avec le *Populus deltoides* x *P. trichocarpa* (8 806 £) s'avérait supérieure à celle du système de monoculture de blé d'hiver (8 593 £).

En fait, il semble qu'il soit possible d'augmenter significativement la VAN des SCI grâce à une meilleure maîtrise de certains éléments de leur itinéraire technique, comme l'écartement entre les rangées d'arbres et le cernage racinaire. Ainsi, en Indiana, Benjamin *et al.* (2000) ont calculé que pour les scénarios de base (taux d'intérêt de 5 %, IC du noyer noir de 24,4 m à 50 ans), la VAN à l'hectare atteignait 19 518 \$US avec le SCI le plus performant (maïs les 35 premières années, blé les 10 suivantes, puis cultures fourragères, écartement de 12,2 m entre les rangées d'arbres, cernage racinaire, rotation de 67 ans), alors

qu'elle était de 10 132 \$US pour le SCI le moins performant (mais les 8 premières années, blé les 10 suivantes, puis cultures fourragères, écartement de 8,5 m entre les rangées d'arbres, aucun cernage racinaire, rotation de 68 ans). Avec un taux d'intérêt de 8 %, les VAN de ces deux SCI n'étaient cependant que de 4 206 et 500 \$US, respectivement.

Afin de tenir compte du facteur d'incertitude relatif aux valeurs de certaines des variables utilisées dans les simulations, la plupart des études économiques citées précédemment étaient accompagnées d'analyses de sensibilité. Il se dégage de ces analyses que la rentabilité des SCI est généralement favorisée par : de faibles taux d'intérêt ; le choix de sites permettant aux arbres d'atteindre un IC élevé ; l'utilisation de traitements sylvicoles et d'écartements qui maximisent la croissance des arbres et favorisent la production de bois de qualité (déroulage et sciage plutôt que trituration) ; le choix de cultures agricoles et l'application d'opérations culturales qui permettent de favoriser des relations de facilitation plutôt que des relations de compétition entre les arbres et les cultures ; la vente du bois aux moments où les prix du marché sont les plus élevés ; et l'apport d'incitatifs financiers reconnaissant les externalités positives de l'arbre au plan environnemental (Campbell *et al.* 1991 ; Willis *et al.* 1993 ; Dyack *et al.* 1999 ; Benjamin *et al.* 2000).

Pour le sylviculteur, une plantation d'arbres intégrés à un SCI présente généralement l'avantage de nécessiter un investissement moins important que celui qu'on doit faire dans une plantation forestière. Cela est principalement dû au fait que le nombre d'arbres improductifs est réduit, et que le suivi et l'entretien des arbres sont facilités par l'activité agricole intercalaire (Dupraz 1994b ; Balandier 1997). Selon Williams et Gordon (1992), le succès de la plupart des SCI en Amérique du Nord viendrait du fait qu'ils permettent de générer des revenus à court terme, ce que ne permet pas une plantation d'arbres conventionnelle visant à produire du bois, des noix ou des fruits.

Pour l'agriculteur, les SCI représentent des outils intéressants de diversification qui rendent son entreprise moins vulnérable aux aléas financiers, biologiques et climatiques et qui lui procurent une meilleure sécurité de revenu à long terme, en plus de donner une plus-value à sa terre (Kurtz 2000). Les SCI lui offrent en effet l'occasion de laisser en héritage un

important capital sous forme d'arbres de grande valeur, sans que le revenu courant de ses parcelles soit interrompu (Dupraz 1994b ; Mary *et al.* 1999).

Les SCI possèdent aussi l'avantage de pouvoir faire l'objet d'un partenariat entre un propriétaire foncier et un agriculteur en activité (Dupraz 1994c). Le propriétaire valorise son patrimoine avec un investissement modéré, tout en jouissant de la garantie d'entretien et de protection de ses plantations apportée par la présence d'un agriculteur, qui bénéficie en retour de l'usage de terres supplémentaires pour ses activités agricoles. De tels partenariats ont été observés dans divers contextes en France, à la satisfaction des deux partenaires (Dupraz 1994b).

## **L'itinéraire technique**

La plupart des arbres feuillus peuvent être plantés sur des terres agricoles (von Althen 1991). Le choix des espèces doit cependant tenir compte des conditions édaphiques qui prévalent sur le site de plantation (Cogliastro *et al.* 1997, 2003 ; Mead 2005). Les échecs des plantations agroforestières sont en effet souvent dus à une inadéquation des espèces d'arbres au site de plantation (Balandier et Dupraz 1999).

Les plantations forestières de feuillus sur terres agricoles font généralement appel à des densités initiales élevées (800 à 1500 arbres/ha), nécessitant la réalisation d'un certain nombre d'éclaircies. L'inconvénient principal d'une telle approche réside en l'absence de revenu à court terme (Baldy *et al.* 1993). À l'opposé, les arbres des SCI n'exploitent qu'une faible proportion de l'espace (100 à 300 arbres/ha), ce qui permet de préserver le potentiel agricole des terres utilisées (Dupraz 1994b).

Les principaux aspects qui façonnent l'itinéraire technique des SCI sont le choix des espèces d'arbres, leur écartement et leur éducation, ainsi que la régie des cultures intercalaires.

Lors de la planification d'un SCI, le choix de l'espèce d'arbre s'appuie généralement sur sa vitesse de croissance, sa valeur commerciale ou environnementale, sa capacité à produire rapidement dans les conditions édaphiques du site, sa résistance aux perturbations et sa capacité à créer un micro-environnement avantageux pour les cultures intercalaires (Garrett et McGraw 2000).

Le noyer constitue un bon exemple d'arbre bien adapté à la culture intercalaire. En Europe comme en Amérique du Nord, il s'est d'ores et déjà attiré la faveur des exploitants grâce à sa capacité à produire à la fois du bois et des noix, à son bon taux de croissance, à sa qualité paysagère et à sa grande valeur économique (Williams *et al.* 1997). Puisqu'il est adapté aux milieux ouverts (Williams 1990), le noyer se prête particulièrement bien aux plantations à larges écartements, comme celles que l'on retrouve dans les SCI. Sa production est compatible avec celle de nombreuses cultures (Garrett et McGraw 2000), en particulier parce qu'il est l'un des arbres dont la foliation démarre le plus tardivement au printemps et l'un des premiers à perdre ses feuilles à l'automne. En Indiana, Gillespie *et al.* (2000) ont mesuré que le RPA reçu par le premier rang de maïs, à l'ouest et à l'est de la rangée d'arbres, était de 24 à 30 % plus élevé sous les noyers noirs que sous les chênes rouges, qui présentaient une surface foliaire totale plus importante. Il est bien connu cependant que le noyer noir sécrète un exsudat aux effets allélopathiques, la juglone (5-hydroxy-1,4-naphthoquinone). Ce composé phénolique peut inhiber la survie et la croissance de certaines plantes herbacées et ligneuses (Rietveld 1983). L'effet à long terme de la juglone dans les SCI est toutefois incertain (Jose *et al.* 2004). Selon Jose et Gillespie (1998), le soya serait plus sensible aux effets allélopathiques de la juglone que le maïs.

Généralement, la densité des arbres est ajustée en fonction des objectifs visés par l'exploitant (production de bois, de noix ou de fruits, type de culture agricole, embellissement du paysage, conservation des sols, attraction de la faune, etc.) et de l'envergure de l'équipement agricole utilisé (Williams et Gordon 1992 ; Dupraz 1994b). Dans les essais réalisés en Europe et en Amérique du Nord, l'écartement entre les rangées d'arbres varie le plus souvent entre 12 et 20 m. On s'efforce notamment d'avoir un espace

suffisant pour accommoder le passage d'une rampe de pulvérisation (Garrett *et al.* 1991 ; INRA et CRPF 2000).

Dans les associations avec des cultures intercalaires annuelles, une bande non cultivée est normalement maintenue sous les rangées d'arbres. La maîtrise de la végétation herbacée dans cette zone permet non seulement de limiter la concurrence subie par les arbres (Cutter et Garrett 1993 ; Paris *et al.* 2005), mais aussi d'assurer leur protection contre des bris mécaniques et d'éviter la compétition subie par la culture intercalaire (Garrett *et al.* 1991 ; Dupraz 1994b).

Plusieurs techniques de répression de la végétation le long des rangées d'arbres peuvent être utilisées, dont la répression chimique, qui est généralement préférée à l'entretien mécanique car elle est plus simple et efficace (Garrett *et al.* 1991). L'effet bénéfique du paillis en polyéthylène sur les propriétés physiques du sol, ainsi que sur la nutrition et la croissance de jeunes arbres feuillus, est pour sa part bien connu (Truax et Gagnon 1993 ; Paris *et al.* 1995, 1998, 2005).

Le choix de la largeur de la bande non cultivée est une décision importante au plan technique. Dupraz (2001) a démontré qu'après 7 ans de croissance, le diamètre de noyers hybrides disposés à 2 m de la plus proche rangée de blé dur était de 45 à 50 % supérieur au diamètre de ceux situés à 50 cm de la culture. Tout indique qu'une faible distance arbre-culture entraîne généralement une concurrence pour l'eau et les éléments minéraux qui nuit à la croissance de l'arbre. En revanche, une large bande non cultivée induit une perte d'espace cultivé.

Par rapport aux forêts naturelles ou aux plantations denses, les arbres plantés à large écartement ont tendance à manifester moins de dominance apicale et donc à développer des houppiers denses, larges et bas sur le tronc (Cabanettes *et al.* 1999 ; Hubert et Courraud 2002), ce qui peut compromettre la production de bois de qualité (Balandier et Dupraz 1999). La taille de formation et l'élagage demeurent donc des traitements sylvicoles incontournables dans tout SCI, non seulement pour favoriser la formation d'un fût droit

dépourvu de nœuds, mais aussi pour allouer le passage de la machinerie dans les allées et réduire l'ombrage porté aux cultures intercalaires. Lorsqu'on vise la production de noix, il est toutefois plus avantageux de maintenir un houppier large et bas (Garrett et Kurtz 1983 ; Garrett et Harper 1998).

Les éclaircies sur le rang, quant à elles, stimulent l'accroissement des arbres d'avenir pour la production de bois de qualité et permettent d'augmenter la luminosité apportée aux cultures intercalaires. Dans le cas du noyer noir, une ou deux éclaircies, dans les 25 à 30 années suivant la plantation, ramèneront le peuplement à une densité définitive de l'ordre de 75 arbres à l'hectare (Williams *et al.* 1997), ce qui correspond approximativement à un écartement de 12 m x 12 m. Le moment et l'intensité de l'éclaircie pourront être ajustés en fonction des besoins en lumière des cultures intercalaires. Des éclaircies hâtives sont recommandées pour des cultures exigeantes comme le maïs, alors que des cultures plus tolérantes à l'ombre pourront se contenter d'éclaircies plus tardives. Il est toutefois possible d'éviter les éclaircies en optant pour des densités initiales représentant les écartements définitifs. Un tel cas a été rapporté par Dupraz *et al.* (2005) dans un SCI comportant 140 peupliers hybrides (*Populus deltoides* x *P. nigra*) par ha (16 m d'écartement entre les rangées et 4,5 m sur la rangée).

La régie des cultures agricoles intercalaires est un aspect important, puisqu'elle peut affecter non seulement leur croissance, mais aussi celle des arbres et donc la rentabilité du système (Williams *et al.* 1997). La décision de cultiver une plante plutôt qu'une autre dépend de différentes considérations comme la nature du site, les intérêts personnels du propriétaire foncier, les besoins du marché et l'évolution spatio-temporelle des interactions biophysiques entre les arbres et les cultures.

En comparaison avec les cultures pérennes, les cultures annuelles présentent davantage de contraintes (Dupraz 1994b) : interventions mécanisées plus nombreuses et plus coûteuses ; risques de blessures aux arbres plus élevés ; incompatibilité de certains traitements phytosanitaires avec les arbres ; obligation d'évacuer ou de fragmenter les produits de la



taille des arbres ; et irrégularité dans la maturation des cultures selon la proximité de l'arbre.

L'évolution temporelle des SCI est par ailleurs un élément qui affecte beaucoup leur régie. L'ombre portée par les arbres et leur capacité à concurrencer les cultures pour leur approvisionnement en eau et en éléments minéraux s'accroissent en effet avec le temps. Dès lors, les rendements des plantes agricoles associées pourront diminuer au point qu'il ne sera plus rentable de poursuivre la culture (Benjamin *et al.* 2000). Pour résoudre ce problème, deux options ont jusqu'à maintenant été développées : se diriger d'emblée ou progressivement vers des cultures tolérantes à l'ombre (Garrett et McGraw 2000) ou réduire peu à peu la surface cultivée entre les rangées d'arbres de façon à ce que la culture associée bénéficie toujours de l'ensoleillement et des ressources édaphiques nécessaires pour l'obtention d'un rendement acceptable (Dupraz 1994b).

## **Conclusion**

Les SCI, qui suscitent un intérêt grandissant, notamment aux États-Unis et en Europe, et cela aussi bien auprès des producteurs et des chercheurs qu'auprès des pouvoirs publics, pourraient être un moyen de rentabiliser les plantations de feuillus, tout en faisant bénéficier les terres agricoles des fonctions environnementales de l'arbre (Garrett et Buck 1997 ; Eichhorn *et al.* 2006), rejoignant ainsi les préoccupations de nombreux propriétaires de plantations de feuillus au Québec (Rivest 2004).

Le contexte climatique de l'écozone des plaines à forêts mixtes (Environnement Canada 2006) est cependant bien différent de celui de la plupart des régions tempérées où ont été réalisés les essais sur les SCI. La saison de végétation, par exemple, y est particulièrement courte, ce qui devrait se traduire par des révolutions sensiblement plus longues des arbres. Une telle contrainte climatique impose le choix d'espèces d'arbres qui maximisent le potentiel du site si l'on veut produire du bois de grande qualité. À cet égard, les travaux de Cogliastro *et al.* (1997, 2003) ont un intérêt particulier, puisqu'ils ont permis de faire la lumière sur les conditions édaphiques optimales pour la plupart des espèces de feuillus

nobles adaptées à l'écozone des plaines à forêts mixtes du Québec et pour lesquelles existe une forte demande de la part de l'industrie du sciage et du déroulage. Selon ces auteurs, le frêne d'Amérique serait une espèce particulièrement appropriée, en raison notamment de sa grande amplitude écologique et de sa bonne croissance juvénile. Le chêne rouge conviendrait quant à lui aux sols plus acides (pH inférieur à 6,5) ou à faible teneur en eau (moins de 5-10 %). À l'opposé, le frêne de Pennsylvanie (*Fraxinus pennsylvanica* Marsh.) et le chêne à gros fruit seraient des choix tout indiqués sur des sites humides (teneur en eau supérieure à 30 %). Bien qu'on ne connaisse pas encore bien les conditions optimales pour leur croissance en plantation, l'érable à sucre, le noyer noir et le cerisier tardif (*Prunus serotina* Ehrh.), qui ont une grande valeur économique, représentent eux aussi des choix sensés. Dans leur synthèse sur les systèmes agroforestiers tempérés, Newman et Gordon (1997) ont insisté sur le fait que les systèmes les plus rentables sont souvent ceux comportant des espèces d'arbres dont les produits peuvent trouver une place de premier choix sur des marchés bien implantés.

Bien qu'elle n'ait pas encore fait l'objet d'études approfondies, l'association de cultures agricoles à des plantations mixtes de feuillus nobles et peupliers hybrides disposés en rangées alternées est un autre système prometteur (Thevathasan et Gordon 2004). En plus de participer à la création d'une ambiance favorable au développement des feuillus nobles, l'ajout d'arbres à croissance rapide comme les peupliers hybrides permet l'obtention de revenus à moyen terme.

Le choix de l'écartement est une autre décision cruciale lors de l'implantation d'un SCI. Dans un essai réalisé à St-Rémi-de-Napierville, au Québec, on a constaté que les faibles écartements initiaux de plantation (6 ou 8 m entre les rangées d'arbres) affectent la productivité du soya, particulièrement dans les zones situées à l'est et à proximité des rangs de peupliers hybrides (Rivest *et al.* 2005). De tels résultats, de même que ceux obtenus en Ontario dans des SCI similaires (Reynolds *et al.* 2007), portent à croire que la lumière est probablement le principal facteur limitant la productivité des SCI dans l'écozone des plaines à forêts mixtes. Dans un tel contexte, il apparaît donc souhaitable de privilégier des SCI présentant de larges écartements (plus de 12 m) entre les rangées d'arbres, d'autant

plus que cela facilite le passage de la machinerie agricole et pourrait mieux convenir aux sites comportant un réseau souterrain de drainage. De larges écartements entre les arbres d'une même rangée semblent aussi souhaitables. Ainsi, en Europe, on préconise, avec le peuplier, de recourir dès la plantation à l'écartement définitif que l'on désire atteindre sur la rangée, qui est généralement de l'ordre de 6 à 10 m (soit une densité de 70 à 140 arbres par hectare pour un écartement de 12 à 15 m entre les rangées). L'élagage et l'éclaircie devraient aussi avoir un impact bénéfique sur la productivité des cultures associées en augmentant la disponibilité de la lumière, comme cela a été mis en évidence en France (Dupraz *et al.* 2005).

Le choix de la culture intercalaire a aussi son importance, comme cela a été souligné précédemment. Il serait donc intéressant de tester l'impact de cultures agricoles contrastées, tant au plan de leurs exigences nutritionnelles (e.g. soya vs maïs) qu'au plan de la phénologie (e.g. céréales de printemps vs céréales d'hiver), de façon à pouvoir mieux guider les producteurs dans leur choix.

Un autre type de culture dont l'adéquation aux SCI mériterait de faire l'objet de recherches est celui des plantes herbacées forestières à valeur économique élevée, notamment des plantes médicinales et ornementales. Des essais préliminaires réalisés en serre montrent que certaines de ces espèces forestières, par exemple l'adiante pédalée (*Adiantum pedatum* L.), la matteuccie fougère-à-l'autruche (*Matteuccia struthiopteris* (L.) Todaro) et l'asaret du Canada (*Asarum canadense* L.), croissent mieux sous des conditions lumineuses caractéristiques des petites trouées que sous celles représentatives d'un couvert dense (Dostie 2006). Les plantations pré-établies pourraient donc réunir des conditions lumineuses favorables à leur croissance. La mise en place de parcelles expérimentales donnerait l'occasion de préciser les itinéraires techniques avantageux pour les producteurs, notamment en ce qui a trait à la préparation du terrain, à la densité de plantation, à l'éclaircie, à la régie de la fertilisation minérale et aux associations arbres - herbacées à privilégier.

La contribution des SCI à la lutte contre la pollution d'origine agricole est un autre de leurs atouts éventuels qui pourrait être mis à profit. Au Québec, les activités de production agricole intensive se sont surtout développées dans la plaine du Saint-Laurent, où est aussi concentrée la majeure partie de la population, de plus en plus préoccupée par la pollution diffuse d'origine agricole, comme l'a révélé la dernière consultation publique du BAPE sur la gestion de l'eau (BAPE 2000). Bien que les SCI soient souvent perçus comme des systèmes permettant d'atténuer les effets des principales sources de pollution diffuse (e.g. érosion des sols, fertilisants, pesticides), des recherches permettant de mesurer leur impact réel seraient nécessaires. Les résultats de ces travaux pourraient éventuellement appuyer la création de nouveaux programmes d'incitatifs financiers reconnaissant les externalités positives de l'arbre au plan environnemental. Il en est de même de recherches qui permettraient d'évaluer plus précisément la contribution des SCI à la séquestration du carbone ou au maintien de la qualité paysagère de sites envahis par les friches, par exemple.

L'adoption des SCI dans le contexte social et politique propre au Québec constitue en effet un enjeu de taille. Une enquête menée dans la région de Chaudière-Appalaches, au Québec, a néanmoins révélé que les propriétaires de plantation de feuillus pourraient représenter un public-cible de choix pour ces systèmes (Rivest 2004). La majorité des propriétaires de plantations de feuillus interrogés ont en effet affirmé être intéressés à faire l'essai de SCI, notamment parce qu'ils les perçoivent comme une façon de rentabiliser leurs plantations à court terme, à condition bien sûr qu'on leur en apprenne davantage sur leurs modalités. Malheureusement, pour l'instant, très peu de spécialistes québécois ont les compétences nécessaires pour répondre à cette requête.

Comme les SCI sont encore inconnus de la grande majorité des acteurs québécois de la production forestière et agricole, il n'est donc pas surprenant que peu de décideurs politiques en aient entendu parler, ce qui explique par ailleurs qu'aucun cadre réglementaire spécifique ne leur ait encore été alloué, contrairement à la situation observée en France où les exploitants qui optent pour les SCI peuvent bénéficier de subsides pour la plantation d'arbres, tout en profitant des aides habituelles dévolues aux cultures agricoles (Eichhorn *et al.* 2006). Or, un statut propre aux SCI, ouvert à la fois aux agriculteurs et aux producteurs

forestiers, autoriserait le contrôle de leur développement. Cela ouvrirait sans aucun doute de nouvelles perspectives pour plusieurs terres qui n'ont plus qu'une importance marginale pour l'agriculture québécoise, mais aussi pour les terres fertiles dévolues aux grandes cultures qui nécessitent des mesures de protection particulières afin de maintenir leur potentiel productif.

## **Objectifs et hypothèses de recherche**

L'objectif général de cette étude est d'analyser les effets de SCI intégrant des peupliers hybrides, des feuillus nobles et des plantes agricoles sur la disponibilité de la lumière, la qualité du sol, la croissance des arbres et le rendement des cultures agricoles.

L'objectif poursuivi dans le chapitre 3 est d'analyser les effets de la concurrence apportée par différents clones de peupliers hybrides sur le rendement du soya et ses composantes de rendement. Les hypothèses suivantes sont vérifiées dans ce chapitre :

- La disponibilité de la lumière est un facteur déterminant dans l'élaboration du rendement du soya; la période où s'effectuent la floraison et la formation des gousses est plus sensible à l'ombrage des arbres que celle où s'effectue le remplissage des grains.
- Le choix du clone de peuplier hybride, la densité de plantation et l'orientation des rangées d'arbres peuvent permettre de limiter la concurrence des arbres sur la culture intercalaire.

Au chapitre 4, l'objectif est de tester les effets d'une culture intercalaire de soya sur la qualité du sol et la croissance du peuplier hybride. Ce chapitre vise à vérifier spécifiquement les hypothèses suivantes :

- La culture intercalaire peut contribuer à améliorer la qualité des sols, comparativement aux plantations forestières sans culture associée, grâce à une

augmentation de la biomasse microbienne et à l'activation de la minéralisation de l'azote, entraînant une amélioration de la croissance des arbres.

- En raison du paillis en polyéthylène qui empêche les retours au sol des composés issus des litières, la biomasse microbienne et la minéralisation de l'azote sous les rangées d'arbres sont inférieures à celles qui sont observées dans les allées.

Au chapitre 5, l'objectif est de déterminer les effets de diverses successions de cultures intercalaires sur la croissance et le statut nutritif de différents clones de peupliers hybrides.

Ce chapitre vise à tester les hypothèses suivantes :

- Les arbres tirent parti de la régie de la culture intercalaire, qui entraîne une amélioration de leur croissance et de leur statut nutritif.
- Les différents clones de peupliers hybrides ne répondent pas de façon similaire aux traitements de cultures intercalaires.

## Références

- Akbulut, S., Keten, A., Stamps, W.T. 2003. Effect of alley cropping and arthropod diversity in Duzce, Turkey. *J. Agr. Crop Sci.* 189: 261-269.
- Allen, S.C., Jose, S., Nair, P.K.R., Brecke, B.J., Ramsey, C.L. 2004a. Competition for <sup>15</sup>N-labeled fertilizer in a pecan (*Carya illinoensis* K. Koch)-Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States. *Plant Soil* 263: 151-164.
- Allen, S.C., Jose, S., Nair, P.K.R., Brecke, B.J., Nkedi-Kizza, P., Ramsey, C.L. 2004b. Safety-net role of tree roots : evidence from a pecan (*Carya illinoensis* K. Koch) – cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States. *For. Ecol. Manage.* 192: 395-407.
- Balandier, P. 1997. A method to evaluate needs and efficiency of formative pruning of fast-growing broad-leaved trees and results of an annual pruning. *Can. J. For. Res.* 27: 809-816.
- Balandier, P., Dupraz, C. 1999. Growth of widely spaced trees. A case study from young agroforestry plantations in France. *Agrofor. Syst.* 43: 151-167.

- Baldy, C., Dupraz, C., Schilizzi, S. 1993. Vers de nouvelles agroforesteries en climats tempérés et méditerranéens. I. Aspects agronomiques. Cahiers Agricultures. 2: 375-386.
- BAPE. 2000. L'eau, ressource à protéger, à partager et à mettre en valeur. Rapport de la Commission sur la gestion de l'eau au Québec. Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, Québec. [www.bape.gouv.qc.ca/sections/archives/eau/index.htm](http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/archives/eau/index.htm).
- Benjamin, T.J., Hoover, W.L., Seifert, J.R., Gillespie, A.R. 2000. Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the midwestern USA. 4. The economic return of ecological knowledge. Agrofor. Syst. 48: 79-93.
- Brandle, J.R., Hodges, L., Zhou, X. 2004. Windbreaks in sustainable agriculture. Agrofor. Syst. 61: 65-78.
- Browaldh, M. 1995. The influence of trees on N dynamics in an agrisilvicultural system in Sweden. Agrofor. Syst. 30: 301-313.
- Burgess, P.J. 1999. Effects of agroforestry on farm biodiversity in the UK. Scottish Forestry 53: 24-27.
- Burgess, S.O., Adams, M.A., Turner, N.C., Ong, C.K. 1998. The redistribution of soil water by tree roots systems. Oecologia 115: 306-311.
- Burgess, P.J., Incoll, L.D., Corry, D.T., Beaton, A., Hart, B.J. 2004. Poplar (*Populus* spp) growth and crop yields in a silvoarable experiment at three lowland sites in England. Agrofor. Syst. 63: 157-169.
- Burken, J.G., Schoor, J.L. 1997. Uptake and metabolism of atrazine by poplar trees. Environ. Sc. Tech. 31: 1399-1406.
- Cabanettes, A., Auclair, D., Imam, W. 1999. Diameter and height growth curves for widely-spaced trees in European agroforestry. Agrofor. Syst. 43: 169-182.
- Campbell, G.E., Lottes, G.J., Dawson, J.O. 1991. Design and development of agroforestry systems for Illinois, USA: silvicultural and economic considerations. Agrofor. Syst. 13: 203-224.
- Chiffot, V., Bertoni, G., Cabanettes, A., Gavaland, A. 2006. Beneficial effects of intercropping on the growth and nitrogen status of young wild cherry and hybrid walnut trees. Agrofor. Syst. 66: 13-21.
- Chirko, C.P., Gold, M.A., Nguyen, P.V., Jiang, J.P. 1996a. Influence of direction and distance from trees on wheat yield and photosynthetic photon flux density ( $Q_p$ ) in a *Paulownia* and wheat intercropping system. For. Ecol. Manage. 83: 171-180.

- Chirko, C.P., Gold, M.A., Nguyen, P.V., Jiang, J.P. 1996b. Influence on wheat yield and photosynthetic photon flux density ( $Q_p$ ) at the tree and crop interface in a *Paulownia* - wheat intercropping system. *For. Ecol. Manage.* 89: 149-156.
- Cogliastro, A., Gagnon, D., Bouchard, A. 1997. Experimental determination of soil characteristics optimal for the growth of ten hardwoods planted on abandoned farmland. *For. Ecol. Manage.* 96: 49-63.
- Cogliastro, A., Benjamin, K., Paquette, A. 2001. Nouvelles avenues vers une production de bois feuillus de qualité en plantation. In: Cogliastro, A., Hallé, A. (eds.), Actes du colloque : Dynamiser la sylviculture des feuillus. 24 novembre 2000, Montréal, QC. La société des amis de la maison de l'arbre, Montréal, QC, Canada. pp. 39-49.
- Cogliastro, A., Gagnon, D., Daigle, S., Bouchard, A. 2003. Improving hardwood afforestation success: an analysis of the effects of soil properties in southwestern Quebec. *For. Ecol. Manage.* 177: 347-359.
- Cogliastro, A., Benjamin, K., Bouchard, A. 2006. Effects of full and partial clearing, with and without herbicide, on weed cover, light availability, and establishment success of white ash in shrub communities of abandoned pastureland in southwestern Quebec, Canada. *New For.* 32: 197-210.
- Commission d'études sur la gestion de la forêt publique québécoise. 2004. Rapport : Commission d'étude scientifique, technique, publique et indépendante, chargée d'examiner la gestion des forêts du domaine de l'État. [www.commission-foret.qc.ca/rapportfinal.htm](http://www.commission-foret.qc.ca/rapportfinal.htm).
- Cutter, B.E., Garrett, H.E. 1993. Wood quality in alleycropped eastern black walnut. *Agrofor. Syst.* 22: 25-32.
- Dix, M.E., Johnson, R.J., Harrell, M.O., Case, R.M., Wright, R.J., Hodges, L., Brandle, J.R., Schoeneberger, M.M., Sunderman, N.J., Fitzmaurice, R.L., Young, L.J., Hubbard, K.G. 1995. Influence of trees on abundance of natural enemies of insect pests: a review. *Agrofor. Syst.* 29: 303-311.
- Dostie, G. 2006. Étude de la survie et de la croissance souterraine de sept espèces d'herbacées forestières à intérêt commercial en réponse au pH du sol et à l'intensité lumineuse. M.Sc. Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada.
- Dupraz, C. 1994a. Les associations d'arbres et de cultures intercalaires annuelles sous climat tempéré. *Rev. For. Fr.* 46: 72-83.
- Dupraz, C. 1994b. Le chêne et le blé: l'agroforesterie peut-elle intéresser les exploitations européennes de grandes cultures? *Rev. For. Fr.* 46: 84-95.



- Dupraz, C. 1994c. Prospects for easing land tenure conflicts with agroforestry in Mediterranean France: a research approach for intercropped timber orchards. *Agrofor. Syst.* 25: 181-192.
- Dupraz, C. 1999. Adequate design of control treatments in long term agroforestry experiments with multiple objectives. *Agrofor. Syst.* 43: 35-48.
- Dupraz, C. 2001. Étude du fonctionnement écophysiological de l'association noyer – blé dur. In: Programme intégré de recherches en agroforesterie à Restinclières (PIRAT): rapport d'étude 2000, Montpellier. INRA, Montpellier, France. pp. 2-18.
- Dupraz, C., Newman, S.M. 1997. Temperate agroforestry: the european way. In: Gordon, A.M., Newman, S.M. (eds.), *Temperate agroforestry systems*. CAB International, Wallingford, UK. pp. 181-236.
- Dupraz, C., Fournier, C., Balvay, Y., Dauzat, M., Pesteur, S., Simorte, V. 1999a. Influence de quatre années de culture intercalaire de blé et de colza sur la croissance de noyers hybrides en agroforesterie. In: Actes du colloque de Clermont-Ferrand : Bois et forêts des agriculteurs. CEMAGREF, Antony, France. pp. 95-114.
- Dupraz, C., Simorte, V., Dauzat, M., Bertoni, G., Bernadac, A., Masson, P. 1999b. Growth and nitrogen status of young walnuts as affected by intercropped legumes in a Mediterranean climate. *Agrofor. Syst.* 43: 71-80.
- Dupraz, C., Burgess, P.J., Gavaland, A., Graves, A.R., Herzog, F., Incoll, L.D., Jackson, N., Keesman, K., Lawson, G., Lecomte, I., Liagre, F., Mantzanas, K., Mayus, M., Moreno, G., Palma, J., Papanastasis, V., Paris, P., Pilbeam, D., Reisner, Y., van Noordwijk, M., Vincent, G., van der Werf, W. 2005. Synthesis of the SAFE (Silvoarable Agroforestry for Europe) project. SAFE-EU Research Project Contract QLK5-CT-2001-00560. 254 pp. <http://www.montpellier.inra.fr/safe/>.
- Dyack, B., Rollins, K., Gordon, A.M. 1999. A model to calculate *ex ante* the threshold value of interaction effects necessary for proposed intercropping projects to be feasible to the landowner and desirable to society. *Agrofor. Syst.* 44: 197-214.
- Eichhorn, M.P., Paris, P., Herzog, F., Incoll, L.D., Liagre, F., Mantzanas, K., Mayus, M., Moreno, G., Papanastasis, V.P., Pilbeam, D.J., Pisanelli, A., Dupraz, C. 2006. Silvoarable systems in Europe – past, present and future prospects. *Agrofor. Syst.* 67: 29-50.
- Environnement Canada. 2006. Les écozones du Canada. [www.ccea.org/ecozones/fr/index.html](http://www.ccea.org/ecozones/fr/index.html).
- Frochot, H., Picard, J.F., Dreyfus, P. 1986. La végétation herbacée, obstacle aux plantations. *Rev. For. Fr.* 37: 271-279.

- Gakis, S., Mantzanas, K., Alifragis, D., Papanastasis, V.P., Papaioannou, A., Seilopoulos, D., Platis, P. 2004. Effects of understory vegetation on tree establishment and growth in a silvopastoral system in northern Greece. *Agrofor. Syst.* 60: 149-157.
- Garrett, H.E., Kurtz, W.B. 1983. Silvicultural and economic relationships of integrated forestry farming with black walnut. *Agrofor. Syst.* 1: 245-256.
- Garrett, H.E., Buck, L.E. 1997. Agroforestry practice and policy in the United States of America. *For. Ecol. Manage.* 91: 5-15.
- Garrett, H.E., Harper, L.S. 1998. The science and practice of black walnut agroforestry in Missouri, USA: a temperate zone assessment. In: Buck, L.E., Lassoie, J.P., Fernandes, E.C.M. (eds.), *Agroforestry in sustainable agricultural systems*. CRC Press, New York, NY, USA. pp. 97-110.
- Garrett, H.E., McGraw, R.L. 2000. Alley cropping practices. In: Garrett, H.E., Rietveld, W.J., Fisher, R.F. (eds.), *North american agroforestry: an integrated science and practice*. American Society of Agronomy Inc., Madison, WI, USA. pp. 149-188.
- Garrett, H.E., Jones, J.E., Kurtz, W.B., Slusher, J.P. 1991. Black Walnut (*Juglans nigra* L.) agroforestry – its design and potential as a land-use alternative. *For. Chron.* 67: 213-218.
- Gillespie, A.R., Jose, S., Mengel, D.B., Hoover, W.L., Pope, P.E., Seifert, J.R., Biehle, D.J., Stall, T., Benjamin, T.J. 2000. Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the midwestern USA. 1. Production physiology. *Agrofor. Syst.* 48: 25-40.
- Gordon, A.M., Newman, S.M. 1997. *Temperate agroforestry systems*. CAB International, Wallingford, UK. 267 pp.
- Graves, A.R., Burgess, P.J., Liagre, F., Terreaux, J.-P., Dupraz, C. 2005. Development and use of a framework for characterising computer models of silvoarable economics. *Agrofor. Syst.* 65: 53-65.
- Hou, Q., Brandle, J., Hubbard, K., Schoeneberger, M., Nieto, C., Francis, C. 2003. Alteration of soil water content consequent to root-pruning at a windbreak/crop interface in Nebraska, USA. *Agrofor. Syst.* 57: 137-147.
- Hubert, M., Courraud, R. 2002. *Élagage et taille de formation des arbres forestiers (3<sup>e</sup> édition)*. Institut pour le développement forestier, Paris, France. 282 pp.
- INRA, CRPF. 2000. *Agroforesterie à Restinclières pour l'Hérault et au-delà... Réalisations et perspectives*. Institut national de la recherche agronomique/Centre régional de la propriété forestière, Montpellier, France. 19 pp.

- Janin, G., Leban, J.M., Ducci, F., Charrier, B., Mosedale, J. 1997. L'utilisation en agroforesterie des résineux et des feuillus. Les conséquences sur la qualité du bois produit. In : Comptes rendus de l'atelier international : L'agroforesterie pour un développement rural durable. 23-29 juin 1997, Montpellier, France. CIRAD-Forêts, Montpellier, France. pp. 303-305.
- Jose, S., Gillespie, A.R. 1998. Allelopathy in black walnut (*Juglans nigra* L.) alley cropping. II. Effects of juglone on hydroponically grown corn (*Zea mays* L.) and soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) growth and physiology. *Plant Soil* 203: 199-205.
- Jose, S., Gillespie, A.R., Seifert, J.R. 1995. The microenvironmental and physiological basis for temporal reductions in crop production in an Indiana alley cropping system. In: Ehrenreich, J.H., Ehrenreich, D.L., Lee, H.W. (eds.), Proceedings of the 4<sup>th</sup> North American Agroforestry Conference. University of Idaho, Moscow, ID. pp. 54-55.
- Jose, S., Gillespie, A.R., Seifert, J.R., Biehle, D.J. 2000a. Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the midwestern USA. 2. Competition for water. *Agrofor. Syst.* 48: 41-59.
- Jose, S., Gillespie, A.R., Seifert, J.R., Mengel, D.B., Pope, P.E. 2000b. Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the midwestern USA. 3. Competition for nitrogen and litter decomposition dynamics. *Agrofor. Syst.* 48: 61-77.
- Jose, S., Gillespie, A.R., Pallardy, S.G. 2004. Interspecific interactions in temperate agroforestry. *Agrofor. Syst.* 61: 237-255.
- Klaa, K., Mill, P.J., Incoll, L.D. 2005. Distribution of small mammals in a silvoarable agroforestry system in Northern England. *Agrofor. Syst.* 63: 101-110.
- Kort, J. 1988. Benefits of Windbreaks to field and forage crops. *Agric. Ecosyst. Environ.* 22: 165-191.
- Kort, J., Turnock, R. 1999. Carbon reservoir and biomass in Canadian prairie shelterbelts. *Agrofor. Syst.* 44: 175-186.
- Kurtz, W.B. 2000. Economics and policy of agroforestry. In: Garrett, H.E., Rietveld, W.J., Fisher, R.F. (eds.), North american agroforestry: an integrated science and practice. American Society of Agronomy Inc., Madison, WI, USA. pp. 321-360.
- Kurtz, W.B., Thurman, S.E., Manson, M.J., Garrett, H.E. 1991. The use of agroforestry to control erosion: Financial aspects. *For. Chron.* 67: 254-257.
- Lee, K.H., Jose, S. 2003. Soil respiration and microbial biomass in a pecan - cotton alley cropping system in southern USA. *Agrofor. Syst.* 58: 45-54.

- Lelle, M.A., Gold, M.A. 1994. Agroforestry systems for temperate climates: lessons from Roman Italy. *Forest Conserv. Hist.* 38: 118-126.
- Lin, C.H., McGraw, R.L., George, M.F., Garrett, H.E. 1999. Shade effects on forage crops with potential in temperate agroforestry practices. *Agrofor. Syst.* 44: 109-119.
- Lu, J. 2006. Energy balance and economic benefits of two agroforestry systems in northern and southern China. *Agric. Ecosyst. Environ.* 116: 255-262.
- Mary, F., Dupraz, C., Delannoy, E., Liagre, F. 1999. Incorporating agroforestry practices in the management of walnut plantations in Dauphiné, France: an analysis of farmers' motivations. *Agrofor. Syst.* 43: 243-256.
- Mead, D.J. 2005. Opportunities for improving plantation productivity. How much? How quickly? How realistic? *Biomass Bioenergy* 28: 249-266.
- Miller, A.W., Pallardy, S.G. 2001. Resource competition across the tree-crop interface in a maize-silver maple temperate alley cropping stand in Missouri. *Agrofor. Syst.* 53: 247-259.
- Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. 2006. Ressources et industries forestières. Portrait statistique édition 2005-2006. Direction du développement de l'industrie des produits forestiers, Chapitre 5.6 Reboisement. [www.mrnfp.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-statistiques.jsp](http://www.mrnfp.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-statistiques.jsp).
- Montagnini, F. Nair, P.K.R. 2004. Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agrofor. Syst.* 61: 281-295.
- Mulia, R., Dupraz, C. 2006. Unusual fine root distributions of two deciduous tree species in southern France: What consequences for modelling of tree root dynamics? *Plant Soil* 281: 71-85.
- Mungai, N.W., Motavalli, P.P., Kremer, R.J., Nelson, K.A. 2005. Spatial variation of enzyme activities and microbial functional diversity in temperate alley cropping systems. *Biol. Fertil. Soils* 42: 129-136.
- Newman, S.M., Gordon, A.M. 1997. Temperate agroforestry: synthesis and future directions. In: Gordon, A.M., Newman, S.M. (eds.), *Temperate agroforestry systems*. CAB International, Wallingford, UK. pp. 251-266.
- Oelbermann, M., Voroney, R.P., Gordon, A.M. 2004. Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: a review with examples from Costa Rica and southern Canada. *Agric. Ecosyst. Environ.* 104: 359-377.
- Ong, C.K., Huxley, P.A. 1996. *Tree-crop interactions: a physiological approach*. CAB International, Wallingford, UK. 386 pp.

- Ong, C.K., Corlett, J.E., Singh, R.P., Black, C.R. 1991. Above and below ground interactions in agroforestry systems. *For. Ecol. Manage.* 45: 45-57.
- Ong, C.K., Deans, J.D., Wilson, J., Mutua, J., Khan, A.A.H., Lawson, E.M. 1999. Exploring belowground complementarity in agroforestry using sap flow and root fractal techniques. *Agrofor. Syst.* 44: 87-103.
- Pan, D., Domon, G., de Blois, S., Bouchard, A. 1999. Temporal (1958–1993) and spatial patterns of land use changes in Haut-Saint-Laurent (Quebec, Canada) and their relation to landscape physical attributes. *Lands. Ecol.* 14: 35-52.
- Pandey, D.N. 2002. Carbon sequestration in agroforestry systems. *Climate Policy* 2: 367-377.
- Paquette, A., Bouchard, A., Cogliastro, A. 2006. Successful under-planting of red oak and black cherry in early-successional deciduous shelterwoods of North America. *Ann. For. Sc.* 63: 823-831.
- Paris, P., Cannata, F., Olimpieri, G. 1995. Influence of alfalfa (*Medicago sativa* L.) intercropping and polyethylene mulching on early growth of walnut (*Juglans* spp.) in central Italy. *Agrofor. Syst.* 31: 169-180.
- Paris, P., Olimpieri, G., Todaro, L., Pisanelli, A., Cannata, F. 1998. Leaf-water potential and soil-water depletion of walnut mulched with polyethylene and intercropped with alfalfa in central Italy. *Agrofor. Syst.* 40: 69-81.
- Paris, P., Pisanelli, A., Todaro, L., Olimpieri, G., Cannata, F. 2005. Growth and water relations of walnut trees (*Juglans regia* L.) on a mesic site in central Italy: effects of understory herbs and polyethylene mulching. *Agrofor. Syst.* 65: 113-121.
- Park, J., Newman, S.M., Cousins, S.H. 1994. The effects of poplar (*P. trichocarpa* x *deltoides*) on soil biological properties in a silvoarable system. *Agrofor. Syst.* 25: 111-118.
- Paul, K.I., Polglase, P.J., Nyakuengama, J.G., Khanna, P.K. 2002. Change in soil carbon following afforestation. *For. Ecol. Manage.* 168: 241-257.
- Peich, M., Thevathasan, N.V., Gordon, A.M., Huss, J., Abohassan, R.A. 2006. Carbon sequestration potentials in temperate tree-based intercropping systems, southern Ontario, Canada. *Agrofor. Syst.* 66: 243-257.
- Peng, R.K., Incoll, L.D., Sutton, S.L., Wright, C., Chadwick, A. 1993. Diversity of airborne arthropods in a silvoarable agroforestry system. *J. Appl. Ecol.* 30: 551–562.
- Powell, G.W., Bork, E.W. 2004. Competition and facilitation in mixtures of aspen seedlings, alfalfa, and marsh reedgrass. *Can. J. For. Res.* 34: 1858-1869.

- Price, G.W., Gordon, A.M. 1999. Spatial and temporal distribution of earthworms in a temperate intercropping system in southern Ontario, Canada. *Agrofor. Syst.* 44: 141-149.
- Rasmussen, S.D., Shapiro, C.A. 1990. Effect of tree root-pruning adjacent to windbreaks on corn and soybeans. *J. Soil Wat. Conser.* 45: 571-575.
- Reich, P.B., Grigal, D.F., Aber, J.D., Gower, S.T. 1997. Nitrogen mineralization and productivity in 50 hardwood and conifer stands on diverse soils. *Ecology* 78: 335-347.
- Reynolds, P.E., Simpson, J.A., Thevathasan, N.V., Gordon, A.M. 2007. Effects of tree competition on corn and soybean photosynthesis, growth, and yield in a temperate tree-based agroforestry intercropping system in southern Ontario, Canada. *Ecol. Eng.* 29: 362-371.
- Rietveld, W.J. 1983. Allelopathic effects of juglone on germination and growth of several herbaceous and woody species. *J. Chem. Ecol.* 9: 295-308.
- Rivest, D. 2004. La culture intercalaire peut-elle dynamiser la plantation des arbres feuillus à bois nobles au Québec ? M.Sc. Université Laval, Québec, QC, Canada.
- Rivest, D., Cogliastro, A., Olivier, A. 2005. Tree growth and crop productivity in a hybrid poplar - hardwood - soybean intercropping system in southwestern Quebec, Canada. In: Brooks, K.N., Ffolliott, P.F. (eds.), *Proceedings of the 9<sup>th</sup> North American Agroforestry Conference*. University of Minnesota, Rochester, MN, USA. 13 pp.
- Robitaille, D. 1999. Analyse comparative coûts/bénéfices. In: *Étude de sensibilité, programme de revalorisation des friches dans les rangs agricoles déstructurés du territoire de la MRC de Papineau*. Service de la planification et de l'aménagement du territoire de la MRC de Papineau, MRC de Papineau, QC, Canada. pp. 8-23.
- Sanchez, P.A. 1995. Science in agroforestry. *Agrofor. Syst.* 30: 5-55.
- Schultz, R.C., Isenhardt, T.M., Simpkins, W.W., Colletti, J.P. 2004. Riparian forest buffers in agroecosystems – lessons learned from the Bear Creek Watershed, central Iowa, USA. *Agrofor. Syst* 61: 35-50.
- Seiter, S., Ingham, E.R., William, R.D. 1999. Dynamics of soil fungal and bacterial biomass in a temperate climate alley cropping system. *Appl. Soil Ecol.* 12: 139-147.
- Singh, H.P., Kohli, R.K., Batish, D.R. 2001. Allelopathic interference of *Populus deltoides* with some winter season crops. *Agronomie* 21: 139-146.
- Stamps, W.T., Linit, M.S. 1998. Plant diversity and arthropod communities: Implications for temperate agroforestry. *Agrofor. Syst.* 39: 73-89.

- Stamps, W.T., Linit, M.S. 1999. The problem of experimental design in temperate agroforestry. *Agrofor. Syst.* 44: 187-196.
- Stamps, W.T., Woods, T.W., Linit, M.S., Garrett, H.E. 2002. Arthropod diversity in alley cropped black walnut (*Juglans nigra* L.) stands in eastern Missouri, USA. *Agrofor. Syst.* 56: 167-175.
- Thevathasan, N.V., Gordon, A.M. 1997. Poplar leaf biomass distribution and nitrogen dynamics in a poplar-barley intercropped system in southern Ontario, Canada. *Agrofor. Syst.* 37: 79-90.
- Thevathasan, N.V., Gordon, A.M. 2004. Ecology of tree intercropping systems in the North temperate region: Experiences from southern Ontario, Canada. *Agrofor. Syst.* 61: 257-268.
- Truax, B., Gagnon, D. 1993. Effects of straw and black plastic mulching on the initial growth and nutrition of butternut, white ash and bur oak. *For. Ecol. Manage.* 57: 17-27.
- Truax, B., Gagnon, D., Chevrier, N. 2000. Herbicide-free plantations of oaks and ashes along a gradient of open to forested mesic environments. *For. Ecol. Manage.* 137: 155-169.
- Udawatta, R.P., Nygren, P., Garrett, H.E. 2005. Growth of three oak species during establishment of an agroforestry practice for watershed protection. *Can. J. For. Res.* 35: 602-609.
- van Noordwijk, M., Lawson, G., Soumaré, A., Groot, J.J.R., Hairiah, K. 1996. Root distribution of trees and crops: competition and/or complementarity. In: Ong, C.K. Huxley, P. (eds.), *Tree-crop interactions: a physiological approach*. CAB International, Wallingford, UK. pp. 319-364.
- Van Sambeek, J.W., Ponder, F.Jr., Rietveld, W.J. 1986. Legumes increase growth and alter foliar nutrient levels of black walnut saplings. *For. Ecol. Manage.* 17: 159-167.
- von Alten, F.W. 1991. Afforestation of former farmland with high-value hardwoods. *For. Chron.* 67: 209-211.
- Wang, Q., Shogren, J.F. 1992. Characteristics of the crop-paulownia system in China. *Agric. Ecosyst. Environ.* 39: 145-152.
- Williams, P.A., Gordon, A.M. 1992. The potential of intercropping as an alternative land use system in temperate North America. *Agrofor. Syst.* 19: 253-263.
- Williams, P.A., Gordon, A.M. 1994. Microclimate and soil moisture effects of tree rows of an intercropped plantation. In: Schultz, R.C., Colletti, J.P. (eds.), *Proceedings of*

- the 3<sup>th</sup> North American Agroforestry Conference. Iowa State University, Ames, IA, USA. pp. 127-135.
- Williams, P.A., Gordon, A.M. 1995. Microclimate and soil moisture effects of three intercrops on the tree rows of a newly planted intercropped plantation. *Agrofor. Syst.* 29: 285-302.
- Williams, P.A., Koblents, H., Gordon, A.M. 1995. Bird use of an intercropped, corn and old field in southern Ontario, Canada. In: Ehrenreich, J.H., Ehrenreich, D.L., Lee H.W. (eds.), *Proceedings of the 4<sup>th</sup> North American Agroforestry Conference*. University of Idaho, Moscow, ID, USA. pp. 158-162.
- Williams, P.A., Gordon, A.M., Garrett, H.E. Buck, L. 1997. Agroforestry in North America and its role in farming systems. In: Gordon, A.M., Newman, S.M. (eds.), *Temperate agroforestry systems*. CAB International, Wallingford, UK. pp. 9-84.
- Williams, R.D. 1990. *Juglans nigra* (L.). Black walnut. *Dans Sylvics of North America : 2. Hardwoods*. Agriculture Handbook 654. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC, USA. 19 pp.
- Willis, R.W., Thomas, T.H., van Slycken, J. 1993. Poplar agroforestry: a re-evaluation of its economic potential on arable land in the United Kingdom. *For. Ecol. Manage.* 57: 85-97.
- Wise, R., Cacho, O. 2005. Tree-crop interactions and their environmental and economic implications in the presence of carbon-sequestration payments. *Environ. Model. Software* 20: 1139-1148.
- Wojewoda, D., Russel, S. 2003. The impact of a shelterbelt on soil properties and microbial activity in an adjacent crop field. *Pol. J. Ecol.* 51: 291-307.
- Wu, Y.Y., Zhu, Z.H. 1997. Temperate agroforestry in China. In: Gordon, A.M., Newman, S.M (eds.), *Temperate agroforestry systems*. CAB International, Wallingford, UK. pp. 149-179.
- Zhu, Z. 1991. Evaluation and model optimisation of Paulownia intercropping system: a project summary report. In: Zhu, Z., Cai, M., Wang, S., Jiang, Y. (eds.), *Agroforestry Systems in China*. The Chinese Academy of Forestry, People's Republic of China and International Development Research Centre (Canada), Beijing, China. pp. 30-43.



### **Chapitre 3. Production of soybean associated with different hybrid poplar clones in a tree-based intercropping system in southwestern Québec, Canada**

À l'exception du court résumé en français qui lui a été ajouté, ce chapitre a été accepté pour publication dans la revue *Agriculture, Ecosystems and Environment*.

Rivest, D., Cogliastro, A., Vanasse, A., Olivier, A. 2008. Production of soybean associated with different hybrid poplar clones in a tree-based intercropping system in southwestern Québec, Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. *Sous presse*.

## Résumé

L'objectif de cette étude était d'analyser les effets de trois clones (DN-3308, NM-3729 et TD-3230) de peupliers hybrides (PH) sur différents paramètres de productivité du soya pendant deux saisons de croissance (2005 et 2006). En 2005, une réduction significative du rendement du soya a été observée à l'interface PH-soya en situation de forte densité d'arbres et de concurrence pour la lumière. La concurrence pour l'azote pourrait également avoir joué un rôle dans cette réduction de rendement. En situation de forte concurrence pour la lumière, la période où s'effectuent la floraison et la formation des gousses (R1-R4) s'est avérée plus critique que celle où s'élabore le remplissage des grains (R5-R6). En 2006, suite à une éclaircie où deux tiers des PH ont été coupés, une plus grande régularité du rendement du soya et de ses composantes a été observée. Les résultats suggèrent qu'il est possible de maîtriser la concurrence des arbres pour les ressources, en particulier celle pour la lumière, en optant pour des clones de PH qui minimisent l'ombrage et en favorisant de larges espacements des arbres sur les rangées et entre elles.

## Abstract

In tree-based intercropping systems, trees, especially hybrid poplars (HP), can compete with crops for light, water and nutrients, resulting in a decrease in crop production. Some tree management characteristics, such as plantation density and tree species selection, may help to partially control this competition. The aim of this study was to analyse the effect of HP competition on yield and yield components of a soybean intercrop. Soybean was added to a HP-hardwood plantation which was established in 2000 and composed of alternate rows spaced 6 m (field A) and 8 m (field B) apart. The experimental design permitted the comparison of the combined effects of HP clones (TD-3230, DN-3308, NM-3729), orientation with respect to HP row (East, West) and distance from the HP row. A thinning was performed at the beginning of 2006 to increase the initial 2 m-spacing between HP within each row to a final 6 m-spacing. Percent total light transmittance (PTLT) was measured from soybean emergence to grain filling (VE-R6). Soil water content (WC) and soil N mineralisation (NMIN) were determined at two different periods corresponding to distinct soybean reproductive stages: 1) from flowering to pod formation (R1-R4), and 2)

during grain filling (R5-R6). In 2005, PTLT, soil WC, soil NMIN (for R1-R4), soybean yield and yield components were significantly reduced near the HP row (2 m). The number of pods per m<sup>2</sup> contributed more to the variation in soybean yield than did the 100-seed size. Yield and number of pods per m<sup>2</sup> were highly correlated to PTLT, soil WC (R1-R4) and NMIN (R1-R4). An interaction between clone and orientation was found for field A. On the east side of the HP row, soybean yield with NM-3729 or DN-3308 was significantly higher than that with TD-3230, whereas it did not differ from that with the clone on the west side of the field. In field B, a significant interaction between orientation and distance was observed for PTLT and the number of pods per m<sup>2</sup>. PTLT and number of pods per m<sup>2</sup> showed less variability on the west side compared to the east side. In 2006, a more regular PTLT distribution with respect to different orientations and distances from the HP row was observed and compared with that in 2005. Similarly, soil WC, soil NMIN, soybean yield and yield components were more uniform in 2006. These results suggest that HP clone selection, tree spacing within the rows, row spacing, orientation, and silvicultural treatments such as thinning may be useful to control the negative effects of HP competition on the intercrop.

## **Introduction**

Results of recent studies show that certain tree-based intercropping (TBI) systems, which integrate hybrid poplars (HP) (*Populus* spp.) or hardwood species, exhibit multiple benefits for the environment, such as reducing soil erosion and N leaching, as well as increasing carbon sequestration and landscape biodiversity (Thevathasan *et al.*, 2004; Palma *et al.*, 2007). TBI systems, whose overall productivity depends on the sum of yields of both agricultural intercrops and tree components, also appear to be more productive and profitable than conventional agricultural or forestry systems (Graves *et al.*, 2007).

Intercrop yield is generally unaffected by the influence of young broadleaved trees, including HP, but yield often declines with time as the trees grow (Rivest and Olivier, 2007). Reduction in crop productivity is greatest at the tree-crop interface, where competition for light (Chirko *et al.*, 1996a; 1996b; Newman *et al.*, 1998), water (Jose *et al.*,

2000; Miller and Pallardy, 2001; Wanvestraut *et al.*, 2004) and nutrients, particularly nitrogen (Allen *et al.*, 2004), is most critical. The magnitude of the competition for each of these resources often differs according to the pedo-climatic conditions under which the TBI system develops, as well as the age and species composition of the system.

In a study of a TBI association of 9- to 10-year-old HP (*P. deltoides* Bartr. ex Marsh x *P. nigra* L.) and soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) established in Guelph, Canada, Reynolds *et al.* (2007) concluded that competition for light was the principal factor limiting soybean yield. However, their study did not distinguish the effects of this TBI system on the yield components so that the critical phases in which soybean is more sensitive to the availability of resources could be identified. According to Brun (1978) and Jiang and Egli (1995), canopy photosynthesis has a greater effect on soybean yield during the reproductive period [R1-R8 stages, (Fehr *et al.*, 1971)] than during the vegetative period (emergence to R1). Several studies have shown that light interception by artificial shade structures, at different times during the reproductive period, reduces soybean yield, principally by influencing pod number, while seed size remains unaffected (Schou *et al.*, 1978; Board *et al.*, 1995; Kakiuchi and Kobata, 2006). These results suggest that yield is more sensitive to shading during flowering and pod formation (R1-R4) than during seed filling (R5-R6). With respect to competition for water, Sionit and Kramer (1977) observed that a water stress, when applied during seed filling, resulted in a greater reduction in yield and seed size than when a comparable stress applied during flowering. The authors emphasised that pod number was negatively affected when the water stress occurred at the beginning of pod formation.

Despite the fact that soybean productivity in TBI systems tends to decline as competition from trees increases, certain silvicultural options, such as the choice of tree species and clones (Dhyani and Tripathi, 1999; Puri *et al.*, 2002; Reynolds *et al.*, 2007) as well as plantation density (Yin et He, 1997; Shanker *et al.*, 2005), may limit the competitive effect. Plantation density depends on the spacing between the rows of trees as well as the initial spacing of the trees within the same row. Density can also be adjusted by thinning. The association of HP and hardwood species arranged in alternate rows (Thevathasan and

Gordon, 2004) appears to be a very promising system, which may help to reduce shading effects and delay crown closure.

In this study, due to the duration of time necessary for trees to grow in temperate regions, the TBI system was created by sowing soybean in an already existing tree plantation. Soybean yield and yield components were measured in 2005 at low HP spacing (2 m) in the same row. Although such a low spacing is unusual in TBI systems, we reasoned that it could help to detect quickly the possible effects of HP clone and tree row orientation, and to better understand the relative importance of HP competition for light and belowground resources. Soybean yield and yield components were re-evaluated in 2006 at higher HP-row spacing (6 m), following a HP thinning. The objectives of the present study consist of: (i) comparing the effects of three HP clones (TD-3230, DN-3308 et NM-3729), two orientations (East and West from the HP row) and various distances with respect to the HP row on the percent total light transmittance (PTLT), as well as soybean yield and the individual soybean yield components; (ii) comparing the effects of various distances with respect to the HP row on the soil water content (WC) and nitrogen mineralisation (NMIN), at two different periods corresponding to distinct soybean reproductive stages (R1-R4 and R5-R6); and (iii) determining the relationship between environmental factors (PTLT, soil WC, NMIN) and the soybean yield variables.

## **Materials and methods**

### **Site characteristics**

The study was conducted in St-Rémi (45°14'N, 73°40'W; altitude, 53 m), in southwestern Québec. Between 1971 and 2000, an average annual temperature of 6 °C, an average annual number of degree-days (above 5 °C) totalling 2031 and an average annual precipitation of 1027 mm were recorded in the St-Rémi region (Environment Canada, 2008). Over the two years of the study, in 2005 and 2006, average monthly temperature between June and October represented 100% and 103% of the 30-years monthly average (15.4 °C), respectively. Average monthly precipitation between June and October represented 107% and 94% of the monthly average (96 mm) in 2005 and 2006, respectively. The soil is

classified as an orthic melanic brunisol (Agriculture Canada Expert Committee on Soil Survey, 1987) with a loam soil texture (19% clay, 34.5% silt and 46.5% sand) with moderate to imperfect drainage, a cation exchange capacity of 20.6 cmolc kg<sup>-1</sup>, a total N content of 3 g kg<sup>-1</sup>, a total C content of 30 g kg<sup>-1</sup>, and a pH<sub>water</sub> of 6.9 in the 0-15 cm layer.

### **Vegetative material, experimental design and treatments**

The original experimental design, established in 2000, was composed of two adjacent fields (A and B) separated by a distance of 20 m. The fields differed in the spacing between rows of hardwoods and HP (A = 6 m and B = 8 m). Each of the fields contained five HP rows and four rows of hardwoods. A row of HP was present on both sides of each hardwood row. The rows of trees were oriented at 310° (NW-SE), which corresponds to the orientation of the fields in the study region. Each field (A and B) was divided into four experimental blocks arranged in the direction of the slope. Each block consisted of three plots arranged in the direction of the slope. Each plot contained one of the three clones being evaluated: TD-3230 (*P. trichocarpa* Torr. & Gray x *P. deltoides* cv. Boelare), DN-3308 (*P. deltoides* x *P. nigra* cv. Regenerata Bâtard d'Hauterive), NM-3729 (*P. nigra* x *P. maximowiczii* A. Henry cv. Max 5). Typically, TD-3230 clone has a dense, narrow crown of moderately rising branches. DN-3308, in contrast, is characterised with a narrowly cylindrical crown of short rising branches, but often tends to be broadly rounded and irregular as it grows. NM-3729 has a large, narrowly egg-shaped crown of long, gently to sharply rising branches (Eckenwalder, 2001). The clones were randomly assigned to the plots. From 2004 to 2006, a soybean crop was integrated into the plantation. In the present study, each experimental plot was bounded on each side by a row of hardwood species, with two alleys separated in the middle by one row of HP (Figure 3.1).

In each row, 20-cm long rooted cuttings of HP were planted at 2 m spacing. Nine cuttings of each clone were planted adjacent to each other. The HP were pruned twice (2003 and 2005) with the goal of releasing the top third and top half of their boles in 2003 and 2005, respectively. A thinning, in the winter of 2006, permitted the spacing between HP in each row to be increased from 2 m to 6 m, thereby decreasing their density from 417 to 139 stems ha<sup>-1</sup> in field A and from 313 to 104 stems ha<sup>-1</sup> in field B. The hardwood tree species, black walnut (*Juglans nigra* L.) and white ash (*Fraxinus americana* L.), were planted at 3

m spacing in the rows, in groups of 3 seedlings per species. However, given that the hardwoods were smaller (average height of 2.4 and 3.2 m in 2005 and 2006, respectively) than the HP, their influence was considered to be lower over the course of this study. For this reason, the treatment combinations were planned to isolate the effects of the HP clone, the orientation with respect to the HP row and the distance from the HP row.

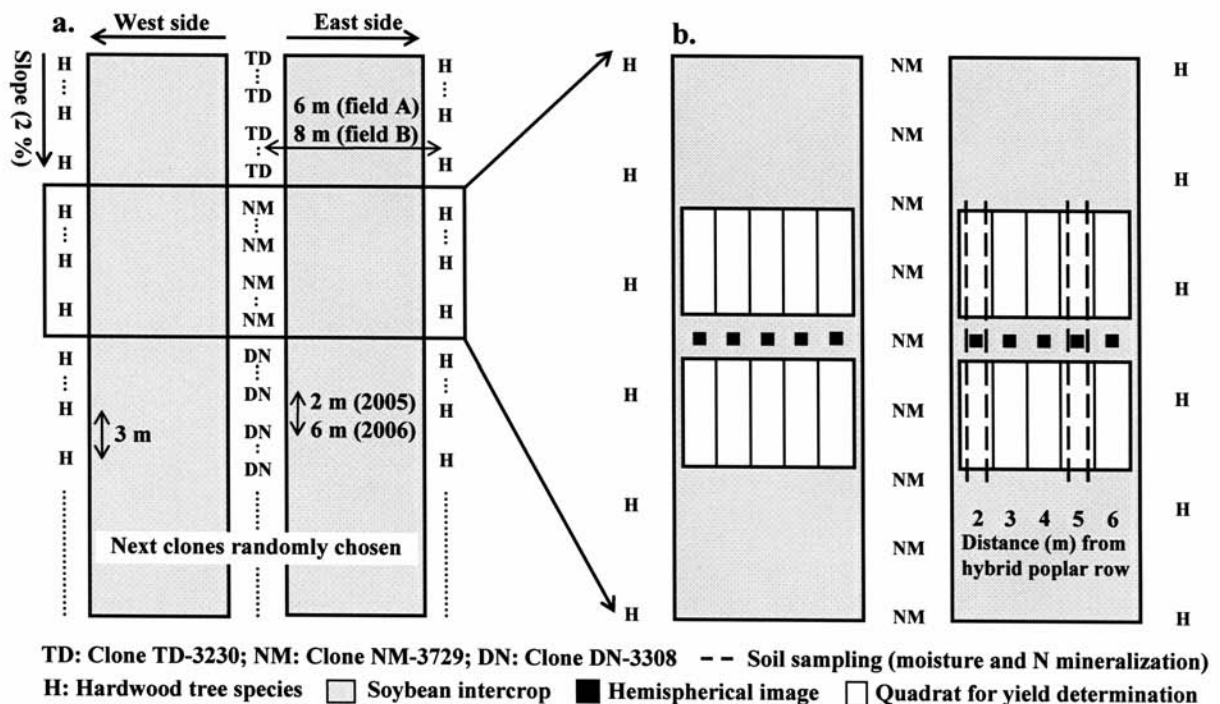


Figure 3.1. Experimental layout of the hybrid poplar-hardwood-soybean intercropping system showing (a) a single block, and (b) the location of the measurements in a NM-3729 plot in field B in 2005.

The soybeans (cv. S03-W4, 2650 UT) were sowed on June 11, 2005 and July 3, 2006. The 2006 sowing was delayed because of abundant precipitation in June. Following superficial (0-10 cm) soil preparation, the soybeans were sowed with a no-till planter at a density of 50 seeds  $m^{-2}$  with spacing of 38 cm between rows. Before sowing, the soil was amended with a N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O fertiliser, (300 kg  $ha^{-1}$  of 5-27-24 in 2005 and 275 kg  $ha^{-1}$  of 9-24-21 in 2006). A conventional herbicide (mixture of cloransulam-methyl, quizalofop-p-ethyl and

thifensulfuron-methyl) was applied to the soybean at the 2-3 trifoliolate leaf stage. An uncultivated strip, was maintained along each row of trees (1.15 m-wide on each side). Repression of herbaceous vegetation in this strip was assured by a continuous band of black polythene-film mulch and a localised application of glyphosate at the mulch-soybean interface at the end of May.

### **Percent total light transmittance (PTLT)**

The PTLT was measured using hemispherical image analysis, which permitted an accurate estimate of percentage photosynthetically active radiation (PAR) (Gendron *et al.*, 1998). In August 2005 and 2006, hemispherical photographs were taken at 120 locations in field B. These locations were distributed in transects perpendicular to the rows of trees in such a manner that each combination of block ( $n = 4$ ) x clone (TD-3230, DN-3308, NM-3729) x orientation (East, West) x distance (2, 3, 4, 5 and 6 m) was represented (Figure 3.1). The hemispherical photographs were taken with a digital camera (Nikon Coolpix 990, Tokyo, Japan), equipped with a hemispherical lens (Nikkor fisheye converter FC-E8) using the maximum resolution (2048 x 1536 pixels x 16 million colors, normal [1:8] JPEG compression) (Paquette *et al.*, 2007). The camera was positioned on a tripod 1 m above the soil surface. The colour photos were converted into binary mode using image editing software (Photoshop<sup>®</sup>, Adobe Systems Inc., San Jose, CA, USA), thus enabling the light flecks appearing on the leaves and tree trunks to be removed manually (Paquette *et al.*, 2007). These binary images were then analysed with Gap Light Analyser software (Frazer *et al.*, 2000), using correct sun and sky parameters for the region (Canham, 1988). A magnetic correction of 50° W was applied to correct the orientation of the rows of trees (310°) with respect to true north. PTLT calculations, which integrate the fractions of diffuse and direct light, were made for the period between June 15 and September 30, at a temporal resolution of 1 minute and a spatial resolution of 36 azimuth by 18 zenith sky regions. This permitted estimation of the average PAR during the soybean growing season between VE (emergence) and R6 (full seed).

### **Soil water content (WC)**

A previous study showed that soil WC in the fields studied was not affected by either HP clone or orientation with respect to HP row (Rivest *et al.*, 2005). The soil WC was therefore



only studied as a function of the effect of distance from HP row. Soil WC (10-cm depth) was measured in field B, in the plots containing clone NM-3729, east of the HP row, in such a manner that each combination of block ( $n = 4$ ) x distance (2 and 5 m) was represented (Figure 3.1). On two of the four sampling dates of each year, soil WC was characterised gravimetrically (ca. 10 g subsample oven-dried at 105 °C for 24 h) from soil samples collected for the determination of soil NMIN (July 20 and September 6, 2005; July 30 and September 21, 2006). The soil WC was characterised using a time-domain reflectometry (TDR) sensor (Delta-T, Burwell, Cambridge, UK) on the other two sampling dates (July 31 and August 26, 2005; August 18 and September 27, 2006). In both years the average soil WC on the first two sampling dates (one by gravimetry and the other by TDR) was calculated to characterise soil WC during flowering and pod formation (R1-R4), when the pod number was determined. In the same manner, the measurements on the last two sampling dates were used to estimate soil WC during seed filling (R5-R6), when the 100-seed size was determined. The soil WC measurements were always preceded by a period of at least 72 hours without precipitation.

### **Soil nitrogen mineralisation (NMIN)**

The rate of net soil NMIN (ammonification + nitrification) was determined from laboratory-based aerobic incubations, a reliable method for estimating soil N fertility (Paré and Van Cleve, 1993). The soil sampling dates (July 20 and September 6, 2005; July 30 and September 21, 2006) and the duration of the incubations (28 days) permitted to estimate soil nitrogen availability during the R1-R4 period and the R5-R6 period. The observations were made in the same plots as those used for soil WC measurements (four blocks, clone NM-3729, eastern orientation, 2 m and 5 m) (Figure 3.1). Each observation consisted of a homogeneous composite sample of 8 soil cores (10 cm depth x 3.3 cm diameter), which were roughly screened (5-mm mesh). Before and after incubation,  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{NO}_3^-$  were extracted from subsamples (ca. 20 g) mixed with 100 ml of aqueous KCl (1 M), shaken for 1 h, and then filtered (Whatman No. 5).  $\text{NH}_4^+$ -N and  $\text{NO}_3^-$ -N concentrations of the extracts were analysed colorimetrically using a Technicon Auto-analyser (Pulse Instrumentation, Saskatoon, SK, Canada). The soil samples were incubated in darkness at a constant temperature of 22 °C, in 500 ml Mason jars covered with polyethylene film to minimise evaporation. The soil NMIN rate was calculated by subtracting the  $\text{NH}_4^+$  and

$\text{NO}_3^-$  concentrations measured before incubation ( $t_0$ ) from those measured after incubation ( $t_{28}$ ). The soil sampling dates were considered to be ( $t_0$ ).

### **Morphological characteristics of the hybrid poplar clones**

Total height and crown diameter of the three HP clones were assessed in both fields in 2005 and 2006. Total height of the HP was determined by calculating the average of the height at the beginning and the end of each growing season. This represents a reasonable estimate of average height of the HP during the soybean growing season. Heights were calculated with the Vertex III hypsometer (Haglof, Sweden). Crown diameter was calculated taking into account four measures per tree of the crown base projected radius (in mid-July) in the cardinal NE, SE, SW and NW directions. Crown base projected radius was obtained using a measuring tape.

### **Soybean yield and yield components**

In each sampled distance plot (1.14 m x 12 m), soybeans were manually harvested at full maturity (October 19, 2005 and November 1, 2006) in two 4 m<sup>2</sup> quadrats (1.14 m x 3.51 m) in 2005, and in two 3 m<sup>2</sup> quadrats (1.14 m x 2.63 m) in 2006 (Figure 3.1). Each quadrat (sub-sample) contained three consecutive rows of soybean. After a manual threshing of the samples, the seeds were cleaned and dried at 40 °C for 72 hours. The yield and 100-seed size were then determined. In each sampled distance plot, the number of pods per m<sup>2</sup> was determined before harvesting in two 1 m<sup>2</sup> quadrats (1.14 m x 0.88 m). The number of pods per m<sup>2</sup> was measured by multiplying the average number of plants per m<sup>2</sup> by the average number of pods per plant measured from 15 plants per quadrat. In each field (A and B), 4 to 8 quadrats (2 per block; 4 blocks (A and B) in 2005; 2 blocks (A) and 3 blocks (B) in 2006) were sampled for each of the combinations of clone (TD-3230, DN-3308, NM-3729) x orientation (East, West) x distance (A: 2, 3 and 4 m; B: 2, 3, 4, 5 and 6 m (2005) or 2 and 5 m (2006)) (Figure 3.1). This corresponds to a total of 144 samples for field A and 240 samples for field B in 2005, and 72 samples in each field in 2006. To obtain the reference values (without the influence of trees), 12 (2005) or 8 (2006) quadrats (yield and 100-seed size: 4 m<sup>2</sup> in 2005 and 3 m<sup>2</sup> in 2006; number of pods per m<sup>2</sup>: 1 m<sup>2</sup>) were also sampled at a distance of more than 12 m from both the northern and southern ends of the rows of trees in field A as well as the southern ends of the rows in field B.

## **Statistical analyses**

The two fields (A and B) and the two study years (2005 and 2006) were evaluated independently. Analysis of variance (ANOVA) using the Proc Mixed procedure of SAS 8.2 for Windows (SAS Institute, Cary, NC, USA) was performed in accordance with the experimental design. For the PTLT, soybean yield and yield components, the sources of variation were: block, HP clone, orientation with respect to HP row, distance with respect to HP row and the interactions among these factors. Block and distance were sources of variation for soil WC and NMIN. For simplicity reasons, block effect and interactions containing it are not shown in Tables 3.1 and 3.2, and Figures 3.2 and 3.3. However, all significant effects of interactions with blocks are reported in the Results section. When the normality and homogeneity of variance were not respected, data non-parametric (rank) transformation was employed. Tukey's test was used to compare means. A significance level of 5% was retained for all analyses. An analysis of the correlation between environmental variables (PTLT, soil WC, NMIN) and the different soybean yield variables was conducted. Values ( $n = 6-8$  per distance) spatially common to each of the sampled variables (clone NM-3729, eastern orientation, 2 and 5 m) were used for correlation analyses.

## **Results**

### **Percent total light transmittance (PTLT)**

In 2005, the PTLT was significantly affected by the interaction between distance and orientation of the crop with respect to the HP row (Figure 3.2a). Throughout the study area, for distances between 2 and 5 m, PTLT increased significantly from one distance to the next, stabilising between 5 and 6 m. This variation in PTLT was smaller on the west side of the HP row than on the east side. In addition, at all distances, PTLT on the west side of the HP row was significantly greater than on the east side (results not presented). Although not significant ( $p = 0.08$ ), a tendency for an effect of the interaction between orientation and HP clone was also detected: east of the HP row, PTLT was 70% with DN-3308, 66% with NM-3729 and 60% with TD-3230 (Figure 3.2a). In 2006, although a significant interaction

between HP clone, orientation and distance was noted, PTLT was more uniform among distances (in comparison with 2005), particularly for clones NM-3729 (east side) and TD-3230 (west side), for which no significant difference was measured (Figure 3.2b).

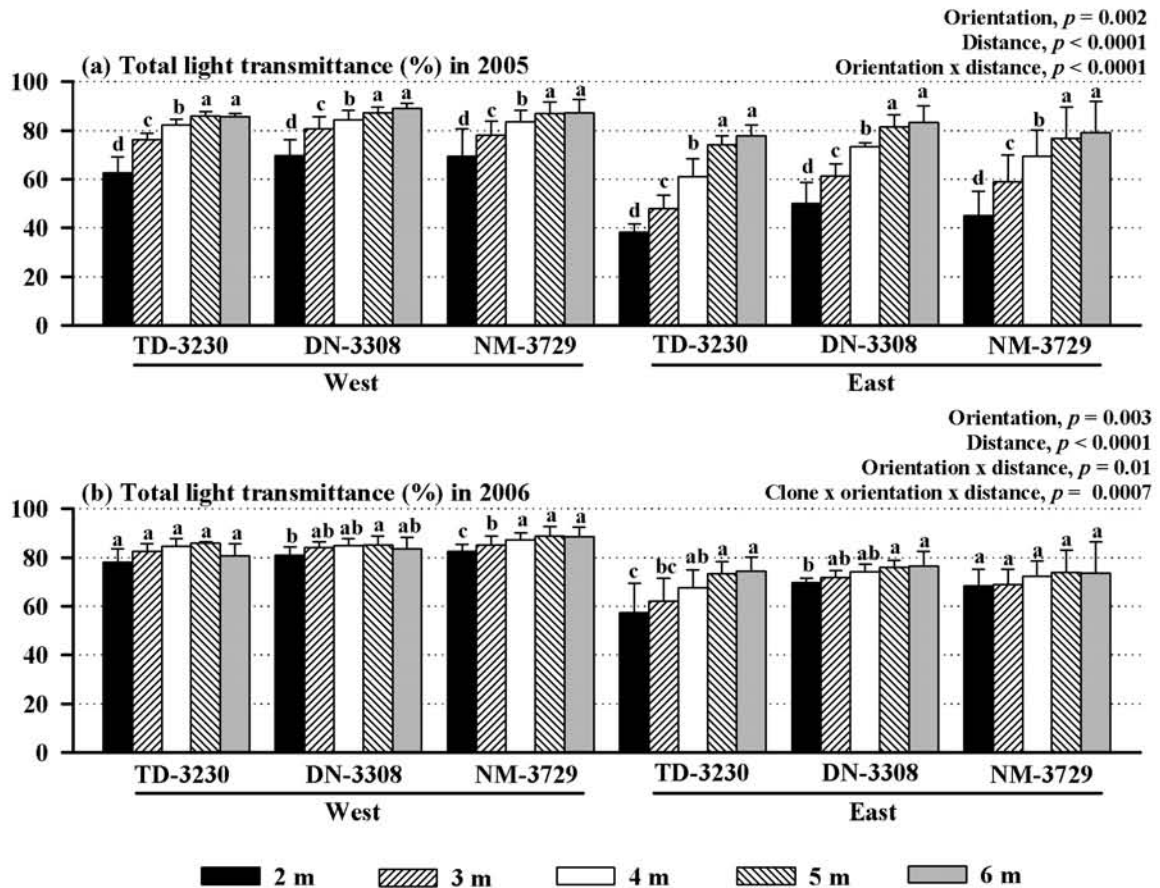


Figure 3.2. Percent total light transmittance in 2005 (a) and 2006 (b) as influenced by hybrid poplar clone, orientation and distance (m) from the hybrid poplar row, in a hybrid poplar-hardwood-soybean intercropping system in southwestern Québec, Canada. The means were calculated from observations made in field B (spacing = 8 m). Vertical lines indicate the standard deviations. The significant ANOVA probability values ( $p$ ) are indicated in the upper right corner. For each of the combinations of clone, orientation and distance, the means with different letters are significantly different at  $p < 0.05$  (Tukey's multiple means comparison test).

### Soil water content (WC) and soil nitrogen mineralisation (NMIN)

In 2005, soil WC at 5 m was 23 and 30% greater than that at 2 m during the R1-R4 and R5-R6 periods, respectively (Table 3.1). However, a significant interaction between block and distance ( $p < 0.0001$  for R1-R4, and  $p = 0.001$  for R5-R6) limits inference of this result. Soil NMIN at 5 m was significantly greater by 20% than that at 2 m, during the R1-R4 period, but distance had no effect during the R5-R6 period. In 2006, no effect of distance was noted for soil WC or soil NMIN, for either reproductive period.

Table 3.1. Effects of distance from the hybrid poplar row during different stages of soybean reproductive growth on soil water content and net N mineralisation in 2005 and 2006, in a hybrid poplar-hardwood-soybean intercropping system in southwestern Québec, Canada.

Measurement	Stage growth	<i>P</i> value	Distance (m) from hybrid poplar row	
			2 m	5 m
2005				
Soil water content (%) <sup>1</sup>	R1-R4	0.014	20.0 (5.0)b	24.5 (2.7)a
	R5-R6	0.003	18.2 (3.3)b	23.6 (3.0)a
Net N mineralisation (mg kg <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ) <sup>1</sup>	R1-R4	0.021	0.91 (0.24)b	1.09 (0.24)a
	R5-R6	0.996	0.98 (0.35)a	0.96 (0.41)a
2006				
Soil water content (%) <sup>2</sup>	R1-R4	0.230	27.1 (2.8)a	28.7 (3.4)a
	R5-R6	0.724	30.9 (1.5)a	30.6 (2.9)a
Net N mineralisation (mg kg <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ) <sup>2</sup>	R1-R4	0.271	0.41 (0.14)a	0.60 (0.43)a
	R5-R6	0.158	0.84 (0.10)a	0.94 (0.10)a

<sup>1</sup>n = 16 per distance. <sup>2</sup>n = 10 per distance. R1-R4, from flowering to pod formation; R5-R6, during grain filling. Values in each row followed by different letters are significantly different at  $p < 0.05$  (Tukey's multiple means comparison test). Standard deviations are given in parentheses.

### Morphological characteristics of hybrid poplars

In both fields (A and B), HP height did not differ among clones in either 2005 or 2006 (Table 3.2). Crown diameter of clone TD-3230 was significantly greater than that of clone DN-3308, in field A, in 2005. No significant difference was observed in field B in 2005, or in field A and B in 2006.

Table 3.2. Tree height and crown diameter of three clones of hybrid poplars, in 2005 and 2006, in a hybrid poplar-hardwood-soybean intercropping system in southwestern Québec, Canada.

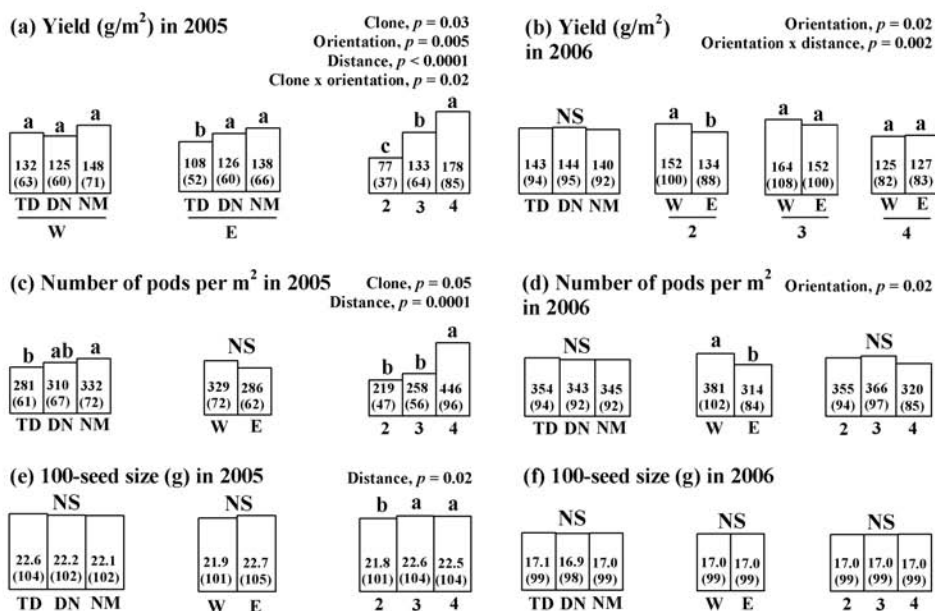
Measurement	2005			2006				
	<i>P</i> value	TD-3230	DN-3308	NM-3729	<i>P</i> value	TD-3230	DN-3308	NM-3729
Field A								
Tree height (m) <sup>1</sup>	0.083	9.3 (1.0)a	8.4 (0.6)a	8.6 (0.8)a	0.207	11.4 (1.1)a	10.6 (0.7)a	10.8 (0.8)a
Crown diameter (m) <sup>2</sup>	0.034	4.6 (0.1)a	4.0 (0.1)b	4.2 (0.1)ab	0.142	3.7 (0.3)a	3.6 (0.3)a	4.0 (0.7)a
Field B								
Tree height (m) <sup>1</sup>	0.667	8.1 (0.8)a	7.6 (0.7)a	7.9 (1.4)a	0.920	9.6 (0.9)a	9.4 (0.7)a	9.3 (1.6)a
Crown diameter (m) <sup>2</sup>	0.625	4.1 (0.1)a	3.8 (0.1)a	3.7 (0.2)a	0.939	4.2 (0.6)a	4.1 (0.3)a	4.2 (0.6)a

Field A, spacing = 6 m; field B, spacing = 8 m. <sup>1</sup> n = 36 (2005) and 12 (2006) for each clone. <sup>2</sup> n = 20 (2005) and 12 (2006) for each clone. For each year, values in each row followed by different letters are significantly different at  $p < 0.05$  (Tukey's multiple means comparison test). Standard deviations are given in parentheses.

### Soybean yield and yield components

In 2005, the interaction between HP clone and orientation significantly affected yield in field A (Figure 3.3a). East of the HP row, soybean yields with HP clones NM-3729 and DN-3308 were significantly greater by 28 and 17%, respectively, than that with clone TD-3230. West of the row, there was no difference in soybean yield among the clones. In field B, yield with NM-3729 and DN-3308 tended to be higher than that with TD-3230 ( $p = 0.11$ ) (Figure 3.3g). However, inference of this result is limited by a significant interaction between block and clone ( $p = 0.02$ ). In the two fields (A and B), pod number per m<sup>2</sup> with NM-3729 was significantly greater than that with TD-3230 (Figures 3.3c, 3.3i). In field B, the 100-seed size followed the inverse tendency observed for pod number per m<sup>2</sup>: it was significantly higher with TD-3230 than with NM-3729 (Figure 3.3k). As was observed by Schonbeck *et al.* (1986), this result suggests that 100-seed size partially compensated for the reduction in pod number per m<sup>2</sup>. In 2006, the soybean yield and yield components did not differ significantly among HP clones.

## Field A : spacing between tree rows = 6 m



## Field B : spacing between tree rows = 8 m

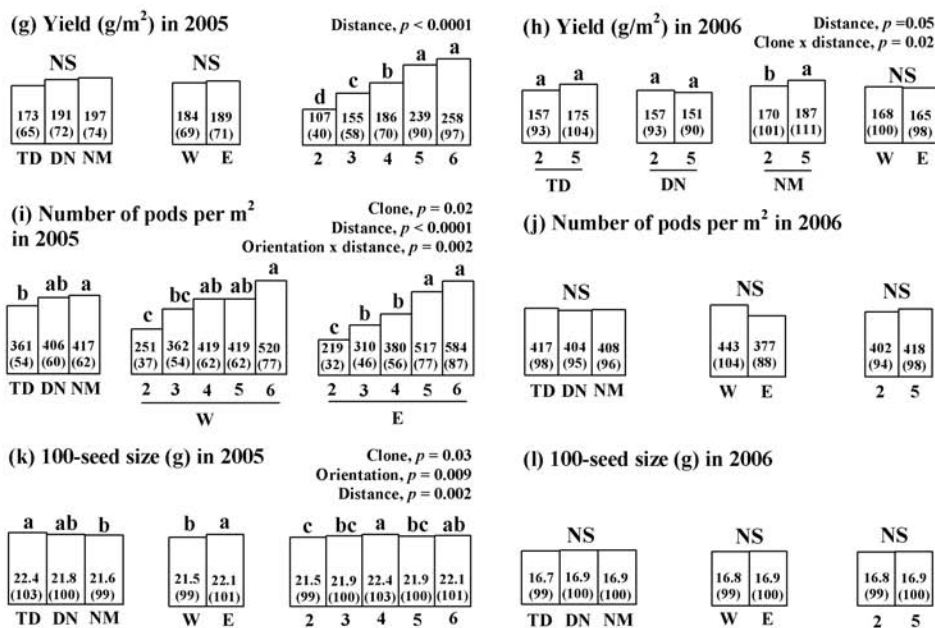


Figure 3.3. Yield and yield components of soybean in 2005 (a, c, e, g, i, k) and 2006 (b, d, f, h, j, l) as influenced by hybrid poplar clone, orientation and distance (m) from the hybrid poplar row, in a hybrid poplar-hardwood-soybean intercropping system in southwestern Québec, Canada. TD, TD-3230; DN, DN-3308; NM, NM-3729; W, west; E, east; 2, 3, 4, 5 and 6: distance (m) from hybrid poplar row. Each result is presented in the form of an absolute value and a relative value (in parentheses), which indicates the absolute value as a function of the reference value (without the influence of trees, 100%). The significant ANOVA probability values ( $p$ ) are indicated in the upper right corner. For each of the treatment combinations presented, the means with different letters are significantly different at  $p < 0.05$  (Tukey's multiple means comparison test). NS, not significant.

Despite a non-significant result ( $p = 0.13$ ), a tendency for an effect of the interaction between orientation and distance was noted for field B, in 2005. At a distance of 2 m, soybean yield on the west side ( $113 \text{ g m}^{-2}$ ) tended to be greater than that on the east side ( $101 \text{ g m}^{-2}$ ), while yield remained uniform between east and west at other distances (3 to 6 m) (results not presented). In addition, a significant interaction between orientation and distance was observed in field B: the pod number per  $\text{m}^2$  was more regular for west than for east of the HP row (Figure 3.3i), which was also the case for PTLT (Figure 3.2a). The same year, in field A, the pod number per  $\text{m}^2$  for west of the HP row also tended to be superior to that for east of the row, although no significant difference was found ( $p = 0.11$ ). A significant effect of orientation on 100-seed size was measured in field B in 2005. The 100-seed size was highest on the eastern side (Figure 3.3k). A similar tendency was also measured in field A ( $p = 0.06$ ). In 2006, an interaction between orientation and distance was observed in field A: at 2 m, the yield west of the HP row was 13% higher than that east of the row, while there was no difference between orientations at 3 and 4 m (Figure 3.3b). The pod number per  $\text{m}^2$  west of the HP row was significantly superior by 21% relative to the number east of the row in field A (Figure 3.3d).

In 2005, maximum variation in soybean yield was observed under the effect of distance from the HP row (Figures 3.3a, 3.3g). Yield was generally lowest at 2 m from the HP row and highest at 4 m (Field A) or 5-6 m (Field B). In 2006, a significant interaction between HP clone and distance in field B was noted. Yield between 2 and 5 m differed only for NM-3729 (Figure 3.3h). Overall, although significant, the effect of distance on yield was marginal in field B in 2006, considering that at 2 m, the yield represented 94% of that obtained at 5 m. In field A, there was no effect of distance on yield. In the two fields (A and B), both pod number per  $\text{m}^2$  and 100-seed size did not differ with distance in 2006.

### **Relationships between soybean yield components and environmental variables**

In 2005, where the availability of resources was the lowest, that means at 2 m from the HP row (Table 3.1, Figure 3.2a), yield was the most highly correlated with PTLT, soil WC and soil NMIN during the R1-R4 period (Table 3.3). Pod number per  $\text{m}^2$  was significantly



correlated with PTLT, soil WC and soil NMIN during the R1-R4 period, while 100-seed size was not significantly correlated with any of these variables (Table 3.3). At 5 m from the HP row, the yield was significantly correlated with PTLT and soil WC measured during the R5-R6 period (Table 3.3). The two yield components were generally weakly correlated with the environmental variables measured at 5 m, with the exception of 100-seed size which showed a strong negative correlation with PTLT. In 2006, the yield was only weakly correlated with the different environmental variables at both 2 and 5 m from the HP row (Table 3.3). Similar results were also obtained for pod number per m<sup>2</sup>, with the exception of a significant positive correlation with PTLT, at 5 m. 100-seed size exhibited a strong negative correlation with PTLT (2 m), soil WC (2 and 5 m) and soil NMIN (2 m) measured in the R5-R6 period (Table 3.3).

Table 3.3. Linear correlation coefficients between environmental variables and soybean productivity variables measured at 2 and 5 m from the hybrid poplar row, in 2005 and 2006, in a hybrid poplar-hardwood-soybean intercropping system in southwestern Québec, Canada.

Dependent variable	Independent variable	Distance from hybrid poplar row			
		2 m		5 m	
		2005	2006	2005	2006
Yield (g/m <sup>2</sup> )	Total light transmittance, VE-R6 (%)	0.85**	0.40	0.66*	0.38
	Soil moisture, R1-R4 (%)	0.78*	-0.20	0.60	0.17
	Soil moisture, R5-R6 (%)	0.53	-0.23	0.65*	0.11
	Net N mineralisation, R1-R4 (mg kg <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	0.71	-0.25	0.28	0.07
	Net N mineralisation, R5-R6 (mg kg <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	-0.35	0.18	-0.33	0.38
Number of pods per m <sup>2</sup>	Total light transmittance, VE-R6 (%)	0.87**	-0.09	0.31	0.74**
	Soil moisture, R1-R4 (%)	0.84**	-0.38	-0.19	-0.14
	Net N mineralisation, R1-R4 (mg kg <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	0.79*	-0.64	0.53	-0.38
100-seed size (g)	Total light transmittance, VE-R6 (%)	0.55	-0.62*	-0.69*	-0.36
	Soil moisture, R5-R6 (%)	0.06	-0.93**	0.13	-0.74*
	Net N mineralisation, R5-R6 (mg kg <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	0.68	-0.82**	-0.29	-0.43

VE-R6, from soybean emergence to grain filling; R1-R4, from flowering to pod formation; R5-R6, during grain filling. \*, \*\* Significant at  $p \leq 0.1$  and  $p \leq 0.05$ , respectively.

## Discussion

### Hybrid poplar-soybean interactions for growth resources under dense tree cover

In 2005, the greatest reduction in soybean yield was observed in proximity to the HP (2 m), where PTLT and soil WC were the lowest. Because aboveground interactions were not isolated from belowground interactions, the relative importance of the effects of competition for light and water cannot be identified with any degree of certainty. Nevertheless, despite the fact that it was correlated with soybean yield, it is worth mentioning that average soil WC, which was never less than 18.2% during the study, did not reach the permanent wilting point (-1.5 MPa). Indeed, other measurements (September 7, 2006) showed that an average daily (i.e., average of predawn and midday) plant water deficit of only -1.17 MPa was associated with a soil WC as low as 17.2%. In a TBI system similar to the one of the present study, Reynolds *et al.* (2007) also found that soil WC was significantly correlated with soybean yield. However, the authors emphasised that even though yield was correlated with PAR and net assimilation, it was not correlated with daily plant water deficit, indicating that competition for light was more limiting than competition for water. In their study, soil WC at 2 m from the HP row was only 5.6% (silt-loam to loam, mid-July, 5 cm depth), which is much lower than that measured in the present study, even though the soil texture was similar. On the other hand, although, in the present study, soil WC differed significantly between 2 and 5 m during seed filling (R5-R6), this was not the case for 100-seed size. This indirectly suggests that water availability did not reach a critical threshold during this period. According to Sionit and Kramer (1977), 100-seed size is very sensitive to water stress during the seed filling period.

At the HP-soybean interface, comparable results of PTLT, soybean yield and yield components to the effect of orientation, also lead to the conclusion that competition for light was more important than competition for water in 2005. An asymmetry of water availability as a function of orientation is not very plausible (Chirko *et al.*, 1996b; Rivest *et al.*, 2005). Even though soybean is a plant with a C<sub>3</sub> metabolism with relatively low light compensation and light saturation points, many studies have shown the importance of maximising light interception to optimise canopy photosynthetic rate and C accumulation

(Sinclair, 2004). Egli and Yu Zen-wen (1991) found that soybean yield under an artificially imposed shade of 63% (applied from R1 to maturity), was reduced to 55% of the yield of the control treatment. In the present study, the yield obtained 2 m east of the HP row, where the shade of the trees (56%) (Figure 3.2a) was the greatest, was 62% lower than the yield measured in the reference plots. In addition, as expected, under conditions of high tree shading, the pod number per m<sup>2</sup> contributed more to the variation in yield than did 100-seed size. For example, yield, pod number per m<sup>2</sup> and 100-seed size at 2 m of the HP row represented 45, 50 and 98 % of those at 5 m, respectively (Figures 3.3g, 3.3i, 3.3k). This suggests that soybean was clearly more affected by light interception during the R1-R4 period, when pod number is determined, than during the seed filling period (R5-R6). Jiang and Egli (1993) also observed a significant reduction in pod number (per plant) under the effect of a 63% shade treatment applied between R1 and maturity. They indicated that this reduction in pod number was attributable to both increased flower and pod abscission and fewer flowers per plant. The reduction in other yield components, either vegetative (branch dry matter and branch node number) or reproductive (branch reproductive nodes and main stem pods per reproductive node) (Board *et al.*, 1995), is probably also responsible for the decrease in pod number in the present study.

Since no tree-less control was included in the experimental design, competition for N cannot be proven. However, in 2005, during the R1-R4 period, soil NMIN was substantially reduced close to the HP row and closely correlated with the yield ( $r = 0.71$ ,  $p = 0.11$ ) and pod number per m<sup>2</sup> ( $r = 0.79$ ,  $p = 0.06$ ). Although N nutrition is not that important for soybean yield, the assimilation of soil nitrates could be critical during the flowering period (R1-R2) (Heatherly and Elmore, 2004). In temperate TBI systems, low rates of N mineralisation associated with low crop yield would indicate competitive interactions for N resulting in a decreased N uptake by the intercrop (Allen *et al.* 2005).

### **Tree management considerations**

In 2006, a greater uniformity in PTLT, soybean yield and its components was observed. More uniform soil WC and NMIN in the alley were also measured. Although there was no unthinned control to infer the formal effects of thinning, there is considerable evidence that an important part of this greater uniformity in environmental and soybean yield

variables could be attributed to the thinning performed in winter 2006. In fact, 66% fewer HP individuals were intercepting light and making demands on belowground resources, particularly close to the HP row. Overall, the 2006 results highlight the interest to further test the effect of thinning on crop yield, which is not well known in the temperate TBI systems because most experimental sites are still too young to perform that kind of test. There is also reason to believe that the HP pruning treatment at the end of 2005 (the second since establishment) also contributed to the increase in PTLT, especially close to the HP. In a TBI system containing HP (*P. deltoides* x *P. nigra*) approaching maturity, Dupraz *et al.* (2005) observed that, 2 m from the HP row, the PTLT associated with HP pruned to a height of 10 m (51%) was 24% greater than that associated with trees pruned to a height of 6 m (41%).

A significant effect of HP clone on soybean yield variables was observed in 2005. In the context of optimising productivity of the intercrops, this result emphasises the importance of selecting the appropriate tree species and clones as suggested in other studies on TBI systems associating fast-growing tree species and soybean (Dhyani and Tripathi, 1999; Puri *et al.*, 2002; Reynolds *et al.*, 2007). In 2005, the yield and the number of pods per m<sup>2</sup> were generally lower with clone TD-3230, which was the one that tended to intercept the most light. Given that the crown diameter and tree height in field B, where PTLT was measured, did not differ among clones (Table 3.2), it is probable that TD-3230 developed lower crown porosity than the two other clones. Nevertheless, findings by Paquette *et al.* (2008), who implemented simulations of hybrid poplar growth at the St-Rémi site, suggested that clone TD-3230 moved from low light transmission at age 7, to moderate light transmission at age 12, and finally to most light being let through at age 20. The authors also emphasised that clone NM-3729 tended to intercept the most light at age 20. While assuming that HP and soybean compete for soil nutrients, it is also necessary to consider that resource use may vary among clones, as noted by Berthelot *et al.* (2000).

In the TBI system studied, the rows of trees were oriented at 310°, which is approximately mid-way between a north/south and an east/west orientation. As previously mentioned, near the HP, the PTLT, yield and number of pods per m<sup>2</sup> were lower east of the HP row than

west of the row in 2005. These results are similar to those obtained by Dupraz *et al.* (2005), who observed that the availability of light and the yield of winter wheat 2 m from the HP row was lower on the east side of a row of trees with a north/south orientation and on the north side of a row oriented east/west. However, the authors mentioned that it is preferable to orient the row of trees in a north/south direction. This orientation is advantageous because, at mid-day, when the rate of photosynthesis is highest, only the row of trees is shaded (Reynolds *et al.*, 2007). However, factors such as field orientation and drainage may present constraints when selecting how to orient the tree rows.

The experimental design of this present trial did not permit formal comparisons between field A and field B, or between the reference plots (without trees) and those of the TBI system. The observed differences in the response to treatments may nevertheless be considered to be indicative of general tendencies. Notably, the average yield of soybean in field B, which had a lower density of trees, was 30% higher (all years combined) than that of field A. These results compare favourably with those obtained by Yin and He (1997). Given that the height of the HP in field B was slightly less than that in field A (Table 3.2), the variation in yield between the two fields cannot be attributed totally to the density of the trees. Yet, the yield in field B was less variable among distances and orientations with respect to the HP row, being closer to those of the reference plots. In their review of studies previously performed in temperate TBI systems, Rivest and Olivier (2007) emphasised that plantation density is an important criterion to consider when light is the principal factor limiting the productivity of the intercrops. In this context, it appears desirable to favour TBI systems with wide spacing between trees in the same row, as suggested by the results of the present study in 2006. Wide spacing (15-30 m) between rows of trees is also desirable, because it decreases the proportion of non-productive land, facilitates the movement of agricultural machinery and may be better adapted to fields with subsurface drainage systems. However, optimal tree spacing should take into account the sum of intercrop and tree productivities, as well as environmental benefits. Row spacing in the present study (6 or 8 m) was initially chosen for the purposes of forest research and, therefore, should not be considered as a model to follow in TBI systems.

The arrangement of the hardwood tree species and the HP in alternating rows constitutes, in its own right, a novel system. Through the incorporation of HP, this system offers the advantage of creating environmental conditions that are beneficial to the hardwoods (Gardiner *et al.*, 2001) which, in exchange, allow the field to remain open, thus favouring the intercrops. This was clearly illustrated in the present study since soybean yield in proximity of the hardwoods was similar to that of the reference plots. Furthermore, this type of system permits wood harvesting over the medium term (15-20 years) because of the presence of HP, which is not the case in TBI systems that incorporate only slow-growing hardwood species.

## **Conclusions**

In the present study, the maximum reduction in soybean yield was observed at the HP-soybean interface under dense tree cover. Competition for light appeared to be more important than that for water. This is supported, among others, by a comparable response of PTLT, and of soybean yield and its components, to the effect of orientation with respect to HP row. Nonetheless, the effect of competition for water may be more evident during periods of prolonged drought. Certain results also indicate that competition for soil nitrogen in proximity of the HP row may be in-part responsible for the observed reduction in soybean yield. Under intense competition for resources, the period of flowering and pod formation appears to be more critical than the seed filling period.

The results obtained also suggest that it is possible to control the negative effects of competition for resources by the trees, particularly competition for light, by paying special attention to the selection of HP clones, tree spacing both within- and between-rows, row orientation, and silvicultural treatments such as thinning and pruning. However, intercropping and its associated interventions may also have a significant influence on the tree component and, consequently, on the overall productivity of the TBI system. So that a complete evaluation can be made of the HP-hardwood-soybean system, the influence of soybean (and its cultural practices) on tree growth, as well as on soil quality, must be

studied further. This would provide the fundamental knowledge necessary to quantify the environmental and economic benefits of TBI systems in Canada.

## Acknowledgements

This work was made possible by the financial contributions of Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT), Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC), and the Programme de mise en valeur des ressources du milieu forestier (ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (volet II)). The authors thank B. Patarin, A.J. Lalanne, Y. Thériault, C. Bernier, A. St-Pierre, L.V. Bérubé-Dufour and N. De Baets for their contributions in both the field and the laboratory, A. Paquette for his help with the installation of the experiment (2000) and the interpretation of hemispherical photographs and S. Daigle for his assistance with statistical analyses. We also wish to thank P. Périnet (MRNFQ) for choosing and supplying the hybrid poplar. We are grateful to D. Christian-Stowe and W.F.J Parsons for revising an earlier version of the manuscript. Our sincere thanks are extended to D. Verteneuil, owner of the property where the field experiment was installed, and J.G. Lamoureux and A. Lazure for conducting a variety of agricultural operations.

## References

- Agriculture Canada Expert Committee on Soil Survey. 1987. The Canadian system of soil classification (CSSC), 2<sup>nd</sup> edn. Agriculture Canada, Ottawa, Ontario Publication 1646: 1-164.
- Allen, S.C., Jose, S., Nair, P.K.R., Brecke, B.J., Ramsey, C.L. 2004. Competition for <sup>15</sup>N-labeled fertilizer in a pecan (*Carya illinoensis* K.Koch)-cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States. *Plant Soil* 263: 151-164.
- Allen, S.C., Jose, S., Nair, P.K.R., Brecke, B.J., Nair, V.D., Graetz, D.A., Ramsey, C.L. 2005. Nitrogen mineralization in a pecan (*Carya illinoensis* K.Koch)-cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States. *Biol. Fert. Soils* 41: 28-37.
- Berthelot, A., Ranger, J., Gelhaye, D. 2000. Nutrient uptake and immobilization in a short-rotation coppice stand of hybrid poplars in north-west France. *For. Ecol. Manage.* 128: 167-179.

- Board, J.E., Wier, A.T., Boethel, D.J. 1995. Source strength influence on soybean yield formation during early and late reproductive development. *Crop Sci.* 35: 1104-1110.
- Brun, W.A. 1978. Assimilation. In: Norman, A.G. (ed.), *Soybean physiology, agronomy, and utilization*. Academic Press, New York, NY, USA. pp. 45-76.
- Canham, C.D. 1988. An index for understory light levels in and around canopy gaps. *Ecology* 69: 1634-1638.
- Chirko, C.P., Gold, M.A., Nguyen, P.V., Jiang, J.P. 1996a. Influence of direction and distance from trees on wheat yield and photosynthetic photon flux density ( $Q_p$ ) in a *Paulownia* and wheat intercropping system. *For. Ecol. Manage.* 83: 171-180.
- Chirko, C.P., Gold, M.A., Nguyen, P.V., Jiang, J.P. 1996b. Influence of orientation on wheat yield and photosynthetic photon flux density ( $Q_p$ ) at the tree and crop interface in a *Paulownia*-wheat intercropping system. *For. Ecol. Manage.* 89: 149-156.
- Dhyani, S.K., Tripathi, R.S. 1999. Tree growth and crop yield under agrisilvicultural practices in north-east India. *Agrofor. Syst.* 44: 1-12.
- Dupraz, C., Burgess, P.J., Gavaland, A., Graves, A.R., Herzog, F., Incoll, L.D., Jackson, N., Keesman, K., Lawson, G., Lecomte, I., Liagre, F., Mantzanas, K., Mayus, M., Moreno, G., Palma, J., Papanastasis, V., Paris, P., Pilbeam, D., Reisner, Y., van Noordwijk, M., Vincent, G., van der Werf, W. 2005. Synthesis of the SAFE (Silvoarable Agroforestry for Europe) project. SAFE-EU Research Project Contract QLK5-CT-2001-00560. 254 pp. <http://www.montpellier.inra.fr/safe/>.
- Eckenwalder, J.E. 2001. Key to species and main crosses. In: Dickmann, D.I., Isebrands, J.G., Eckenwalder, J.E., Richardson, J. (eds.), *Poplar culture in North America*. NRC Research Press, Ottawa, Canada. pp. 325-382.
- Egli, D.B., Yu Zen-wen. 1991. Crop growth rate and seed per unit area in soybean. *Crop Sci.* 31: 439-442.
- Environment Canada. 2008. The National climate data and information archive. Canadian climate normals or averages 1971-2000. <http://climate.weatheroffice.ec.gc.ca>
- Fehr, W.R., Caviness, C.E., Burmood, D.T., Pennington, J.S. 1971. Stage of development descriptions for soybean, *Glycine max* (L.) Merrill. *Crop Sci.* 11: 929-931.
- Frazer, G.W., Canham, C.D., Lertzman, K.P. 2000. Gap light analyzer 2.0. *Bull. Ecol. Soc. Am.* 81: 191-197.
- Gardiner, E.S., Schweitzer, C.J., Stanturf, J.A. 2001. Photosynthesis of Nuttall oak (*Quercus nuttallii* Palm.) seedlings interplanted beneath an eastern cottonwood (*Populus deltoides* Bartr. Ex Marsh.) nurse crop. *For. Ecol. Manage.* 149: 283-294.



- Gendron, F., Messier, C., Comeau, P.G. 1998. Comparison of various methods for estimating the mean growing season percent photosynthetic photon flux density in forests. *Agric. For. Meteorol.* 92: 55-70.
- Graves, A.R., Burgess, P.J., Palma, J.H.N., Herzog, F., Moreno, G., Bertomeu, M., Dupraz, C., Liagre, F., Keesman, K., van der Werf, W., Koeffeman de Nooy, A., van den Briel, J.P. 2007. Development and application of bio-economic modelling to compare silvoarable, arable, and forestry systems in three European countries. *Ecol. Eng.* 29: 434-449.
- Heatherly, L.G., Elmore, R.W. 2004. Managing inputs for peak production. In: Boerma, H.R., Specht, J.E. (eds.), *Soybeans: Improvement, production, and uses*. ASA, Madison, WI, USA. pp. 451-536.
- Jiang, H., Egli, D.B. 1993. Shade induced changes in flower and pod number and flower and fruit abscission in soybean. *Agron. J.* 85: 221-225.
- Jiang, H., Egli, D.B. 1995. Soybean seed number and crop growth rate during flowering. *Agron. J.* 87: 264-267.
- Jose, S., Gillespie, A.R., Seifert, J.R., Biehle, D.J. 2000. Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the midwestern USA. 2. Competition for water. *Agrofor. Syst.* 48: 41-59.
- Kakiuchi, J., Kobata, T. 2006. The relationship between dry matter increase of seed and shoot during the seed-filling period in three kinds of soybeans with different growth habits subjected to shading and thinning. *Plant Prod. Sci.* 9: 20-26.
- Miller, A.W., Pallardy, S.G. 2001. Resource competition across the tree-crop interface in a maize-silver maple temperate alley cropping stand in Missouri. *Agrofor. Syst.* 53: 247-259.
- Newman, S.M., Bennett, K., Wu, Y. 1998. Performance of maize, beans and ginger as intercrops in *Paulownia* plantations in China. *Agrofor. Syst.* 39: 23-30.
- Palma, J.H.N., Graves, A.R., Bunce, R.G.H., Burgess, P.J., de Filippi, R., Keesman, K.J., van Keulen, H., Liagre, F., Mayus, M., Moreno, G., Reisner, Y., Herzog, F. 2007. Modeling environmental benefits of silvoarable agroforestry in Europe. *Agric. Ecosyst. Environ.* 119: 320-334.
- Paquette, A., Bouchard, A., Cogliastro, A. 2007. A less restrictive technique for the estimation of understory light under variable weather conditions. *For. Ecol. Manage.* 242: 800-804.

- Paquette, A., Messier, C., Périnet P., Cogliastro, A. 2008. Simulating light availability under different hybrid poplar clones in a mixed intensive plantation system. *For. Sci.* 54: 481-489.
- Paré, D., Van Cleve, K. 1993. Soil nutrient availability and relationships with aboveground biomass production on postharvested upland white spruce sites in Interior Alaska. *Can. J. For. Res.* 23: 1223–1232.
- Puri, S.L., Swamy, A.K., Jaiswal, A.K. 2002. Evaluation of *Populus deltoides* clones under nursery, field and agrisilviculture system in subhumid tropics of Central India. *New For.* 23: 45-61.
- Reynolds, P.E., Simpson, J.A., Thevathasan, N.V., Gordon, A.M. 2007. Effects of tree competition on corn and soybean photosynthesis, growth, and yield in a temperate tree-based agroforestry intercropping system in southern Ontario, Canada. *Ecol. Eng.* 29: 362-371.
- Rivest, D., Cogliastro, A. Olivier, A. 2005. Tree growth and crop productivity in a hybrid poplar-hardwood-soybean intercropping system in southwestern Quebec, Canada. In: Brooks, K.N., Ffolliott, P.F. (eds.), *Proceedings of the 9<sup>th</sup> North American Agroforestry Conference*. University of Minnesota, Rochester, MN, USA. 13 pp.
- Rivest, D., Olivier, A. 2007. Cultures intercalaires avec arbres feuillus : quel potentiel pour le Québec ? *For. Chron.* 83: 526-538.
- Schonbeck, M.W., Hsu, F.C., Carlsen, T.M. 1986. Effect of pod number on dry matter and nitrogen accumulation and distribution in soybean. *Crop Sci.* 26: 783-788.
- Schou, J.B., Jeffers, D.L., Streeter, J.G. 1978. Effects of reflectors, black boards, or shades applied at different stages of plant development on yield of soybeans. *Crop Sci.* 18: 29-34.
- Shanker, A.R, Newaj, R., Rai, P., Solanki, K.R., Kareemulla, K., Tiwari, R., Ajit. 2005. Microclimate modifications, growth and yield of intercrops under *Hardwickia binata* Roxb. based agroforestry system. *Arch. Agron. Soil Sc.* 51: 281–290.
- Sinclair, T.R. 2004. Improved carbon and nitrogen assimilation for increased yield. In: Boerma, H.R., Specht, J.E. (eds.), *Soybeans: Improvement, production, and uses*. ASA, Madison, WI, USA. pp. 537-568.
- Sionit, N., Kramer, P.J. 1977. Effect of water stress during different stages of growth of soybean. *Agron. J.* 69: 274-278.
- Thevathasan, N.V., Gordon, A.M. 2004. Ecology of tree intercropping systems in the North temperate region: experiences from southern Ontario, Canada. *Agrofor. Syst.* 61: 257-268.

- Thevathasan, N.V., Gordon, A.M., Simpson, J.A., Reynolds, P.E., Price, G.W., Zhang, P. 2004. Biophysical and ecological interactions in a temperate tree-based intercropping system. *J. Crop Improv.* 12: 339-363.
- Wanvestraut, R.H., Jose, S., Nair, P.K.R., Brecke, B.J. 2004. Competition for water in a pecan (*Carya illinoensis* K. Koch)-cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States. *Agrofor. Syst.* 60: 167-179.
- Yin, R., He, Q. 1997. The spatial and temporal effects of paulownia intercropping: the case of north China. *Agrofor. Syst.* 37: 91-109.

## **Chapitre 4. Intercropping hybrid poplar with soybean: does it increase soil quality and tree growth?**

Ce chapitre a été soumis pour publication dans la revue *Annals of Forest Science*.

Rivest, D., Cogliastro, A., Bradley, R., Olivier, A. 2008. Intercropping hybrid poplar with soybean: does it increase soil quality and tree growth? *Annals of Forest Science*.

## Résumé

La qualité du sol et la croissance du peuplier hybride (*P. nigra* x *P. maximowiczii* A. Henry) ont été comparés durant deux années consécutives dans un traitement comportant une culture intercalaire de soya et dans un traitement comportant un hersage (absence de culture intercalaire). Un paillis en polyéthylène a été utilisé pour maîtriser la végétation sous les rangées d'arbres. Une augmentation significative de la biomasse microbienne, de l'azote inorganique et du taux de nitrification, ainsi qu'une diminution du quotient métabolique ( $q\text{CO}_2$ ) ont été observées à certaines dates dans le traitement de culture intercalaire, comparativement au traitement comportant un hersage. Durant les deux années de l'étude, l'accroissement de la biomasse du peuplier hybride et l'efficacité d'utilisation de l'azote minéralisé dans le traitement de culture intercalaire étaient, dans l'ordre, de 51 et 47 % supérieurs à ceux dans le traitement comportant un hersage. Le contenu en azote et en carbone organique totaux, la biomasse microbienne, le taux d'azote inorganique, le taux de nitrification et le ratio  $\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$  sous le paillis étaient généralement inférieurs à ceux dans l'allée.

## Abstract

Soil quality and hybrid poplar (*P. nigra* x *P. maximowiczii* A. Henry) growth were assessed for two consecutive growing seasons in a 6- to 7-year-old tree-based intercropping (TBI) system comprising a soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) intercrop (intercropping treatment), in southwestern Québec, Canada. The control treatment comprised equally spaced tree rows without intercrop (harrowing treatment). Tree rows were mulched with a black polythene-film. Soil quality indices were evaluated and compared beneath the mulch and at two further distances (2 and 5 m) from the hybrid poplar row. Significant increases in soil microbial biomass, inorganic-N content and net nitrification rates, and a decrease in metabolic quotient ( $q\text{CO}_2$ ), were observed in the intercropping treatment, compared to the harrowing treatment, at some dates. During the whole study period, hybrid poplar biomass increment and N-response efficiency (NRE) in the intercropping treatment, were greater by 51 and 47 % to those in the harrowing treatment, respectively. Soil total C and N, microbial biomass, soil inorganic-N, net nitrification rates and  $\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$  ratios were lower

beneath the polyethylene mulch compared to the alleys, although the differences were not always statistically significant. This spatial pattern contrasts with that observed usually in unmulched TBI systems. We conclude that TBI systems could lead to increase tree growth and soil quality, as compared to plantations without intercrop, by improving microbial biomass and N fertility.

## **Introduction**

Tree-based intercropping (TBI) is a type of agrosystem that combines widely spaced rows of trees and agricultural field crops. In eastern Canada, TBI systems can offer a variety of environmental services such as the conservation of biodiversity, the sequestration of carbon and the enhancement of water quality (Thevathasan *et al.* 2004). TBI systems have also been proposed as a means of reducing the dependence of the Canadian furniture and wood cabinet industries on imports of high-value hardwood timber, and improving the profitability of broadleaved tree plantations (Rivest and Olivier 2007; Bradley *et al.* 2008). In a recent study from such a TBI system in Québec, which consisted of alternating rows of hybrid poplar (*Populus* sp.) and high-value hardwood species with soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) as the intercrop, it was inferred that light interception by trees was a major determinant of soybean yield (Rivest *et al.* 2008). Interactions between trees and intercrops growing in close proximity may also include, however, competition for other resources such soil nutrients and moisture, or positive interactions through improved soil quality and nutrient availability (Jose *et al.* 2007). The strength and direction of these interactions will depend, in turn, on the layout and design of the system. Factors such as fertilisation of the intercrop and mulching to prevent weed competition near tree rows may each determine the overall productivity of the system. Here, we report on a study where the effects of a soybean intercrop and a plastic mulch on soil quality and hybrid poplar growth were measured. Soil quality was estimated from indices of N fertility, microbial biomass and C cycling.

Most studies on TBI systems in temperate regions have emphasised the effect of trees on the growth and yield of agricultural intercrops, rather than the converse. Accordingly, most

TBI studies lack proper control plots (i.e., tree rows without intercrop) that would allow this effect to be tested experimentally and used to estimate the Land Equivalent Ratio (LER), which is a measure of intercropping efficiency (Dupraz 1999). Nonetheless, experiments from subtropical regions seem to show that TBI systems, especially those with N<sub>2</sub>-fixing intercrops, can promote tree growth and help to limit the gradual depletion of soil quality that typically occurs in successive tree plantations (Kaur *et al.* 2000; Wang *et al.* 2005). Given that agricultural practices in temperate regions typically include the fertilisation of crops with readily available inorganic fertilisers, we anticipate that the management of the intercrops in these regions will significantly benefit tree growth. Evidence for this was given by Allen *et al.* (2004), who showed presumptive evidence that tree roots in a TBI system were able to scavenge soil nutrients in the subsoil that otherwise would have been leached and exported from the system. Therefore, the first objective of this study was to determine whether TBI systems with soybean can improve soil quality and hybrid poplar growth.

Another concern in any modern TBI system is weed competition for nutrients, especially during the establishment phase of the plantation (Rivest and Olivier 2007). Among the techniques commonly adopted to control weeds close to the tree bases (i.e., uncultivated strips), polyethylene mulching has been shown to be effective for decreasing the competitiveness of intercrops towards young trees and thus improving tree growth (e.g., Paris *et al.* 2005). In unmulched TBI systems, soil organic matter content, microbial biomass and nitrification rates were found to be higher in the uncultivated strip than in the middle of the alleys, as noted by Brodwaldh (1995) and Thevathasan and Gordon (1997). The authors argued that these results could be in-part attributed to a greater accumulation of lignified tree litter, which may stabilise soil organic matter close to tree rows. These beneficial effects of trees on soil quality would be lost, however, if the uncultivated strip is covered with polyethylene mulching. If such proves to be the case, the implications for root dynamics and nutrient cycling patterns in the system should be further reviewed and evaluated. Here, the mulched TBI system was not compared with proper control plots (i.e., unmulched TBI system). As a first step, we evaluated and compared the soil C and N status beneath a plastic mulch and at two further distances from the tree rows, to infer the possible

effects of mulching on root dynamics in a TBI system. We hypothesised that soil C and N cycling and microbial activity would be lower beneath the polyethylene mulch.

## **Materials and methods**

### **Experimental site and field operations**

The study site was established near the town of St-Rémi (45° 14'N, 73° 40'W; altitude, 53 m), in southwestern Québec. The region is characterised by an annual average temperature of 6 °C, 2031 degree-days (above 5 °C), and 1027 mm of precipitation (Environment Canada 2008). The soil is classified as an Orthic Melanic Brunisol (Agriculture Canada Expert Committee on Soil Survey 1987) with a loam texture (19 % clay, 30 % silt, 51 % sand), a total C content of 26 g kg<sup>-1</sup>, a total N content of 2.5 g kg<sup>-1</sup>, and a pH<sub>water</sub> of 6.9 in the 0-15 cm layer. Alternating rows of hybrid poplars (*P. nigra* x *P. maximowiczii* cv. Max 5) and high-valued hardwood species (*Juglans nigra* L., *Fraxinus americana* L.), spaced 8 m apart, were planted in 2000. During the study (May 2005 to November 2006), average heights of hybrid poplar and hardwood species ranged from 7.9 to 12.2 m and from 1.8 to 3.5 m, respectively. The experimental design compared two alley treatments introduced in June 2004: soybean intercropping versus harrowing. The two treatments were applied in a randomised complete block design (n = 4) for a total of eight experimental plots. Each 288 m<sup>2</sup> plot (18 m x 16 m) was bounded on each side by a row of hardwood species, with two alleys in the middle separated by one row of hybrid poplars.

In spring 2000, 20-cm cuttings of hybrid poplars were planted every 2 m along the row, for a total of nine cuttings per plot. Seedlings of hardwood species were planted every 3 m along alternating rows. From 2000 to 2003, vegetation growing between rows was mowed once a year. In January 2006, a thinning increased the spacing between hybrid poplars in each row from 2 to 6 m. Before the sowing of soybean, the soil was amended with a N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O fertiliser (300 kg ha<sup>-1</sup> of 5-27-24 in 2005 and 275 kg ha<sup>-1</sup> of 9-24-21 in 2006), then superficially harrowed to a depth of 10 cm depth. Soybean (cv. S03-W4) was sown with a no-till planter on June 11, 2005 and July 3, 2006. A mixture of cloransulam-methyl, quizalofop-p-ethyl and thifensulfuron-methyl herbicides was applied at the 2-3 trifoliolate



leaf stage. In order to maintain a minimal competition between hybrid poplars and native herbaceous vegetation in the harrowing plots, the alleys were disked (0-10 cm depth) on June 1 and July 14, in 2005, and on June 26, in 2006. No fertilizer was applied in the harrowing treatment. A 2.3 m-wide uncultivated strip was maintained along each tree row. Herbaceous vegetation in this strip was controlled by a 1.5 m-wide black polythene-film mulch. The edges of the mulch were mechanically buried, leaving a 1.15 m-wide exposed strip of mulch. A localised application of glyphosate in two 50 cm-wide strips at the mulch-intercropping interface was also performed at the end of May in 2005 and 2006.

### Soil sampling and analyses

In each plot, 16 soil cores (33 mm dia., 0-15 cm depth) were collected on several dates (Table 4.1) along transects at 0 m (i.e., beneath the mulch), 2 m and 5 m from hybrid poplar rows (east side), and bulked into two composite samples per distance. Samples were transported on ice to the laboratory and stored at 4 °C until analysis. A 10 g subsample was dried at 105 °C for 48 h to determine gravimetric water content.

Table 4.1. Soil sampling schedule.

Measurements	Soil sampling dates							
	27-06-05	20-07-05	08-08-05	06-09-05	02-10-05	30-07-06	29-08-06	21-09-06
Total C and N	X							
Soil respirometry	X		X		X	X	X	X
Soil mineral N		X		X		X	X	X

Soil total C and N were only determined at one sampling date, as no significant change was expected in these variables over the studied period (Oelbermann and Voroney 2006). Soil samples were air-dried, thoroughly mixed and gently crushed to break down the aggregates, and sieved to pass a 2-mm mesh. A subsample (3-4 g air-dry mass) was ground and dried (50 °C) in an air-draft oven. From this subsample, 250 ( $\pm$  0.01 mg) mg of ground soil material was encapsulated in a Sn sleeve. Capsules were injected into a Vario CN analyzer (Elementar Americas, Mt. Laurel, NJ, USA), and total C and N were determined by thermo-conductometric detection following high temperature combustion (940 °C).

Basal respiration was determined by weighing fresh subsamples (ca. 32 g dry mass equiv.) into 126 ml gas sampling jars, flushing the headspace with ambient air for 5 min, sealing jars with air-tight lids equipped with rubber septa, and sampling aliquots of air in the headspace with a needle and syringe after 4 h. CO<sub>2</sub> concentrations were analysed in each air sample using a Chrompack Micro-GC CP-2002P gas chromatograph (Chrompack, Bergen op Zoom, The Netherlands) equipped with a TCD and He as carrier gas. Ambient CO<sub>2</sub> concentration was subtracted from sampled CO<sub>2</sub> and the difference was adjusted according to Ideal Gas Laws and centred at 22 °C using  $Q_{10} = 2$ . Microbial biomass-C was determined by substrate-induced respirometry (SIR) (Anderson and Domsch 1978). Fresh subsamples (ca. 32 g dry mass equiv.) were placed into 500 ml plastic containers and amended with ground and sieved (65 μm) glucose (1000 μg C g<sup>-1</sup>) (Bradley and Fyles 1995). The amendments were applied as 250 mg mixtures with talc and dispersed throughout the soil subsamples using a spatula. Amended subsamples were transferred into 126 ml gas sampling jars and left uncovered for 100 min to reach optimum SIR rates. Subsamples were then flushed for 5 min with ambient air, sealed for 30 min, and headspace air was analysed for CO<sub>2</sub> concentration using a GC (as described above). SIR rates were converted to microbial biomass-C using equations derived by Anderson and Domsch (1978). Values of metabolic quotient ( $q\text{CO}_2$ ) were calculated as the ratio of basal respiration to microbial biomass-C.

Inorganic-N (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N) concentrations were determined by extracting fresh soil subsamples (ca. 20 g) in 100 ml of 1 M KCl solution (1 h on a reciprocal shaker), filtering the extracts (Whatman No. 5), and analysing the filtrates colorimetrically for NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> using a Technicon autoanalyser (Pulse Instrumentation, Saskatoon, SK, Canada). Potential net ammonification and nitrification rates were estimated by aerobic laboratory incubations, a reliable method for estimating N fertility in forest soils (Paré and Van Cleve 1993). Fresh subsamples (ca. 20 g) were transferred to 500 ml Mason jars, covered with a polyethylene film to minimise moisture loss, and left to incubate 28 d in the dark at 22 °C. After incubation, the soil was extracted in 1 M KCl and analysed for NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> as described previously. Net N ammonification and nitrification rates were calculated as the net increase in NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N over the incubation interval.

### **Hybrid poplar biomass increment and nitrogen response efficiency (NRE)**

Hybrid poplar height and diameter at breast height (DBH) were measured at the end of each growing season (November) from 2004 to 2006. Heights were calculated with a Vertex III hypsometer (Haglof, Sweden), and DBH was measured with standard callipers. The aboveground biomass (stem + branches) of each hybrid poplar was estimated following a generalised hybrid poplar biomass equation (Ben Brahim *et al.* 2000):

$$W = 3.85 + 0.000068H_m D^{2.34} - 0.017D_m^{2.34} \quad (1)$$

where  $W$  is the dry mass (DM) expressed in kg tree<sup>-1</sup>,  $D$  is the DBH (cm) at tree level, and  $H_m$  and  $D_m$  are respective mean height (cm) and mean DBH (cm) estimates at stand level. In each plot, the total hybrid poplar biomass increment (Mg DM ha<sup>-1</sup>) was calculated as the increase in  $W$  between November 2004 and November 2006, and this value was scaled up assuming a stand density of 313 and 104 hybrid poplars ha<sup>-1</sup> in 2005 and 2006, respectively. The ratio of tree growth to mineralisable-N, referred as nitrogen response efficiency (NRE) (Bridgham *et al.* 1995), was estimated in each plot. The amounts of mineralised N were averaged across the five incubation periods, converted to an areal basis using bulk density, then reported in kg ha<sup>-1</sup> and multiplied by the number of growing-days, assuming a frost-free period of 161 days in 2005 and 158 days in 2006, respectively (Environment Canada 2008).

### **Statistical Analyses**

Within each sampling date, the effects of treatment and distance from the hybrid poplar row on soil quality indices were tested by means of analysis of variance (ANOVA) for a randomised block, split-plot design, with the treatment as the main plot, and distance as the subplot factor. The effects of treatments on hybrid poplar biomass increment and NRE were analysed using one-way ANOVA. Significantly different means were separated using Tukey's multiple comparison test. The statistical significance level for all tests was fixed at  $p \leq 0.05$ . The analyses were performed using the general linear model and mixed procedures of SAS (SAS 8.2, SAS Institute, Cary, NC, USA).

## Results

### Soil carbon and nitrogen

A significant effect of distance from hybrid poplar row on total C and N was observed ( $p = 0.0009$  and  $p = 0.0003$ , respectively). Total C and N concentrations at 2 and 5 m were higher than at 0 m in both treatments (Table 4.2).

Table 4.2. Effects of treatments and distance from hybrid poplar row on soil total C and N in June 2005. Values in parentheses are standard deviations.  $n = 8$  per distance. In each treatment, different letters indicate significant differences between distances, according to Tukey's Multiple Range Test ( $p < 0.05$ ).

	Intercropping			Harrowing		
	0 m	2 m	5 m	0 m	2 m	5 m
Total C (g kg <sup>-1</sup> )	23.1 (2.8) b	28.2 (2.4) a	27.0 (2.3) a	24.0 (3.2) b	25.9 (3.3) a	26.0 (2.6) a
Total N (g kg <sup>-1</sup> )	2.2 (0.3) b	2.7 (0.3) a	2.6 (0.3) a	2.3 (0.3) b	2.5 (0.4) a	2.6 (0.3) a

### Soil microbial biomass dynamics

Soil microbial biomass ranged from 0.23 to 0.92 g C<sub>mic</sub> kg<sup>-1</sup> (Figure 4.1A). Across all distances, microbial biomass was 27 % higher in the intercropping treatment than in the harrowing treatment ( $p = 0.04$ ) in September 2006. A similar result was observed in October 2005, although the difference was not significant ( $p = 0.12$ ). A significant treatment by distance interaction was observed in August 2005. Microbial biomass at 0 m was lower than at 2 and 5 m in the harrowing treatment, while it was only lower than at 5 m in the intercropping treatment. In all of the five other sampling dates, a significantly higher microbial biomass was measured at 2 and 5 m, as compared to 0 m, in both treatments ( $p \leq 0.003$ ).

Across all distances,  $q\text{CO}_2$  was lowest in the intercropping plots ( $p = 0.03$ ) in July and September 2006 (Figure 4.1B). Significantly higher values of  $q\text{CO}_2$  were found at 0 m, as compared to 2 and 5 m, in both treatments in August 2005 ( $p = 0.01$ ). In contrast, in 2006,

$q\text{CO}_2$  at 0 m was only higher than at 2 m, in August ( $p = 0.04$ ), or than at 5 m, in September ( $p = 0.04$ ).

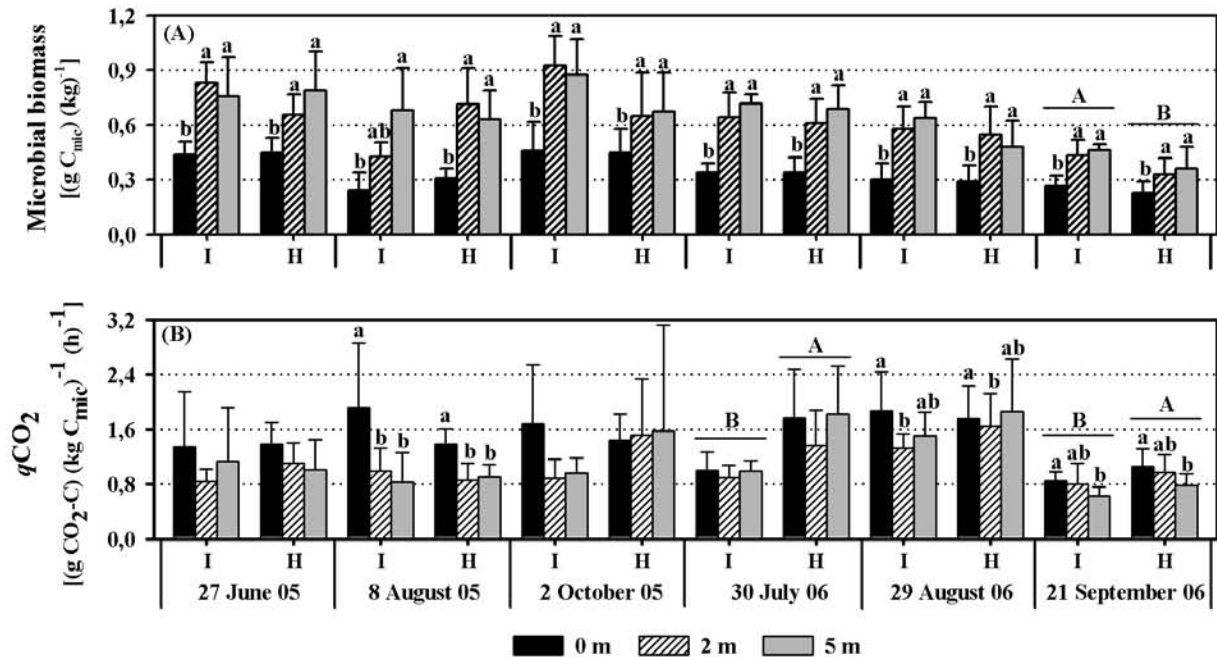


Figure 4.1. Effects of treatments and distance from hybrid poplar row on soil microbial biomass (A), and  $q\text{CO}_2$  (B) during the 2005 and 2006 growing seasons. Vertical lines represent standard deviations.  $n = 8$  per distance. For each treatment, different lower case letters indicate significant differences between distances, according to Tukey's Multiple Range Test ( $p < 0.05$ ); different upper case letters indicate significant differences between treatments. I = intercropping, H = harrowing.

### Soil mineral nitrogen dynamics

Soil inorganic-N ranged from 3.5 to 38.4 mg kg<sup>-1</sup> (Figure 4.2A). Across all distances, inorganic-N was higher in the intercropping treatment than in the harrowing treatment in July and August 2006 ( $p = 0.001$  and  $p = 0.04$ , respectively). A similar result was observed in September 2005, although the difference was not significant ( $p = 0.14$ ). For all sampling dates, inorganic-N at 5 m was higher than at 0 m in both treatments ( $p \leq 0.04$ ). Similarly,

the  $\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$  ratio was greater at 5 m than at 0 m in both treatments on all sampling dates, except August 2006 ( $p \leq 0.01$ ) (Figure 4.2B).

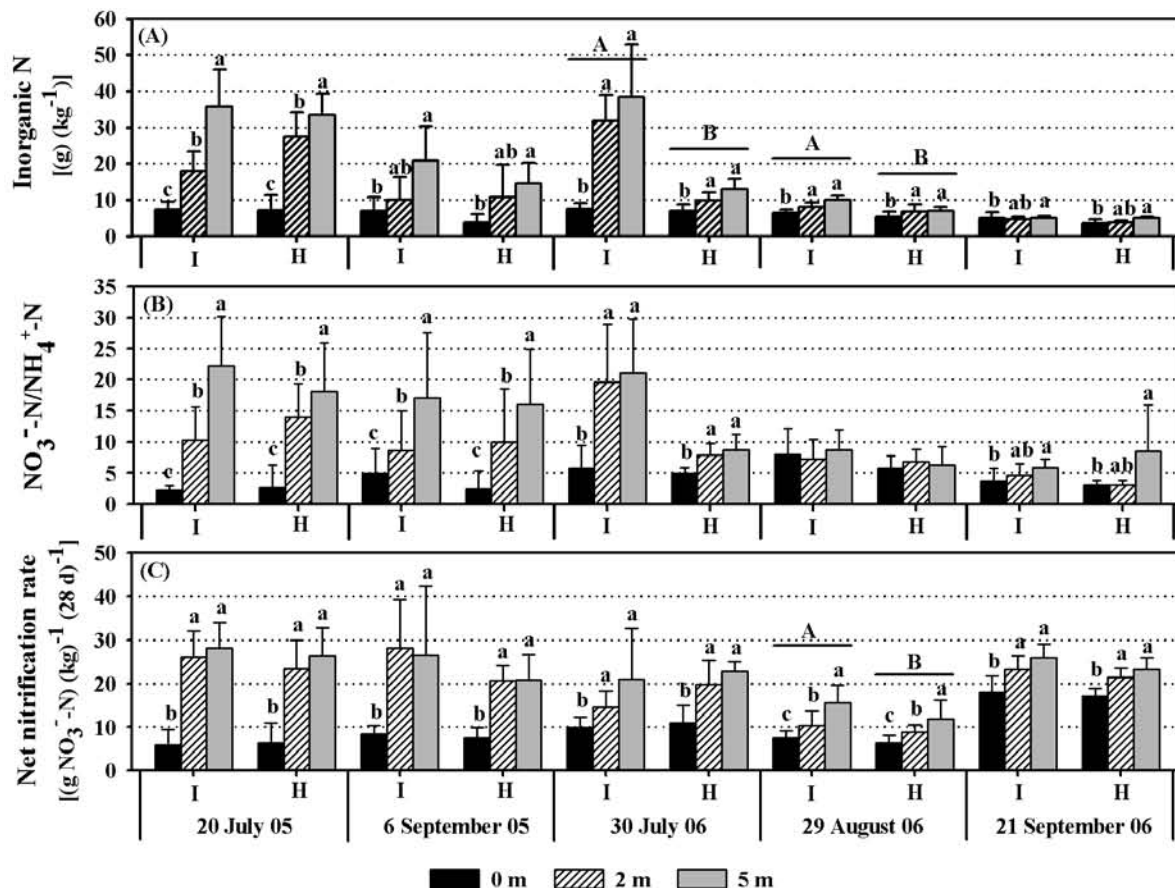


Figure 4.2. Effects of treatments and distance from hybrid poplar row on soil inorganic-N (A),  $\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$  ratio (B), and net nitrification rate (C) during the 2005 and 2006 growing seasons. Vertical lines represent standard deviations.  $n = 8$  per distance. For each treatment, different lower case letters indicate significant differences between distances, according to Tukey's Multiple Range Test ( $p < 0.05$ ); different upper case letters indicate significant differences between treatments. I = intercropping, H = harrowing.

Net nitrification was much higher than net ammonification throughout the study period, suggesting a rapid oxidation of  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ . Net ammonification and nitrification rates varied, respectively, from  $-2.2$  to  $1.4 \text{ mg NH}_4^+ \text{-N kg}^{-1}$ , and from  $5.9$  to  $28.2 \text{ mg NO}_3^- \text{-N kg}^{-1}$  over the 28 d incubation period (Figure 4.2C). Across all distances, net nitrification rates were

24 % higher in the intercropping than in the harrowing treatment ( $p = 0.02$ ) in August 2006. Except for 0 m, a similar result was observed in July 2005, although the difference was not significant (treatment x distance interaction,  $p = 0.14$ ). For all sampling dates, net nitrification rate varied significantly with distance from the hybrid poplar row ( $p \leq 0.006$ ), with the highest values found at 2 and 5 m in both treatments.

### **Hybrid poplar biomass increment and nitrogen response efficiency (NRE)**

Hybrid poplar biomass increment ( $p = 0.01$ ) and NRE ( $p = 0.007$ ) were respectively 51 % and 47 % higher in the intercropping than in the harrowing treatment (Table 4.3).

Table 4.3. Effects of treatments on biomass increment (stem + branches) and nitrogen-response efficiency (NRE) of hybrid poplars during their sixth and seventh growing seasons. Values in parentheses are standard deviations.  $n = 12$  per treatment. Different letters indicate significant differences between treatments, according to Tukey's Multiple Range Test ( $p < 0.05$ ).

	Intercropping	Harrowing
Dry biomass increment ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )	6.29 (1.12) a	4.17 (1.55) b
NRE ( $\text{kg dry mass kg}^{-1} \text{N}_{\text{mineralized}}$ )	17.70 (3.58) a	12.05 (4.27) b

## **Discussion**

That soil microbial biomass was higher in the intercropping treatment at the end of each growing season suggests a greater quantity and quality of soybean litter inputs compared to limited weed litter in the harrowing treatment. Soybean litter inputs combined with mineral fertiliser applications would result in greater nutrient inputs, which would enhance hybrid poplar growth. The interaction between treatment and distance controlling soil microbial biomass in August 2005 may be explained by a lower soybean biomass at 2 m, compared to 5 m, as a result of competition for light under dense hybrid poplar cover (Rivest *et al.* 2008). Lower crop biomass may have indeed resulted in lower C inputs and provided fewer energy-yielding substrates to the soil microbial biomass (Ocio and Brookes 1990).

The lower values of  $q\text{CO}_2$  that were observed in the intercropping treatment, especially in 2006, is a reflection of a more efficient substrates use by microbial populations (Anderson 2003). This is corroborated by the fact that the average  $C_{\text{mic}}:C_{\text{tot}}$  ratio (calculated from data in Table 4.2 and Figure 4.1A) was higher in the intercropping than in the harrowing treatment (2.13 % as compared to 2.02 %). Microbial communities from soils of ecosystems with higher diversity (e.g., crop rotation systems or mixed forests) are usually energetically more efficient (lower  $q\text{CO}_2$ ), with a correspondingly higher  $C_{\text{mic}}:C_{\text{tot}}$  ratio (increased microbial biomass) compared to monoculture soil systems (Anderson 2003). The more efficient microbial community in the intercropping treatment may be due to a higher lignin content into the soil, possibly as a result of the incorporation of the intercrop residues (including roots and litterfall). For example, Dence (1992) founded lignin contents of 11 % for soybean and 4 % for grass residues (dry matter basis). Moreover, the quantity of litter input in the intercropping treatment was much more important than in the harrowing treatment (D.Rivest, pers. obs.). This higher lignin content may have contributed, in turn, to an increase in the ratio of fungi to bacteria and prevalence of autochthonous (k-type strategists) over zymogenous microbiota (r-type strategists). Sakamoto and Oba (1994) observed that bacteria are less efficient than fungi when using C (i.e., higher  $q\text{CO}_2$ ). Similarly, autochthonous microbiota are characterised as slow-growth specialists, and are more efficient when using carbon (and other resources) than zymogenous microbiota (Anderson 2003).

The increase in soil inorganic-N and net nitrification rate in the intercropping treatment may have been due to incomplete uptake of the fertiliser that was applied. However, the amount applied was designed to deliver no more than 15 % of total crop requirement, much less than what is usually applied in other agronomic crops (CRAAQ 2003). It is, therefore, possible that the increase in soil  $\text{NO}_3^-$  was in part due to the decomposition and mineralisation of soybean residues (left on the soil in 2005) that had been incorporated in June 2006. For example, in southern Québec, soybean is recognised to have the potential to supply approximately  $25 \text{ kg N ha}^{-1}$  to a following crop (CRAAQ 2001). Thus, by comparing plots with and without intercrop, the present study has shown that the TBI system has a potential to improve soil nutrient supply to the trees. Foliar nutrient diagnostic



assessments may constitute a next step for increasing our understanding of this positive interaction. On the other hand, the presence of the soybean intercrop was associated with a higher NRE of hybrid poplars. A possible mechanism for such a response may be that soil microbes were much less competitive for nitrogen than hybrid poplars in the intercropping treatment.

The results of the present study showed that hybrid poplar growth was higher in the intercropping treatment. In a parallel study, Rivest *et al.* (2008) showed that the increase in hybrid poplar growth may be effective without intercrop yield loss when the TBI system is young if tree spacing within rows is maintained at 6 m, such as in 2006. If we ignore hardwood production but consider an average hybrid poplar biomass production in 2006 of 2.69 and 1.63 Mg DM ha<sup>-1</sup> in the intercropping and harrowing treatments, respectively, and assume that 29 % of the land had been taken out of soybean production (uncultivated strips), annual LER for the hybrid poplar-soybean association would be estimated to be 2.36. An LER value > 1 indicates an advantage from the association in terms of the use of environmental resources for plant growth. However, this result should be interpreted cautiously because annual LERs must be calculated over the whole tree plantation cycle to obtain a complete diagnosis of the biological efficiency of the association (Dupraz 1999).

The present study showed that both soil organic matter and microbial biomass were lower in tree rows (beneath the polyethylene mulching) than in the alleys. Potential nitrification also was lower at the base of trees, thus decreasing the NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N ratio. Since no mulch-less control was included in the experimental design, the effects of mulching on soil quality indices cannot be identified with any degree of certainty. Nevertheless, our results contrast with those of other studies (Brodwaldh 1995; Thevathasan and Gordon 1997; Seiter *et al.* 1999; Kaur *et al.* 2000), which have shown high mineral-N content and microbiological activity near tree rows in the absence of mulch. Because the polyethylene mulch did not allow the input and turnover of tree leaf litterfall in the soil, it is likely that much of the litter was redistributed by wind to the alleys. This implies that the expected N released from the annual tree litterfall (Thevathasan and Gordon 2004) would be shifted towards the alleys, to the benefit of the intercrop, rather than in the uncultivated strip.

Moreover, higher N availability in the alleys could lead to increase presence of hybrid poplar roots beneath the intercrop (Nadelhoffer *et al.* 1985), thereby promoting nutrient interception below the rooting zone of the intercrop. This “safety-net” can improve nutrient cycling in the system and reduce fertiliser requirements (Allen *et al.* 2004). Additional studies that consider horizontal and vertical tree root development (Mulia and Dupraz 2006) are, however, necessary to confirm these effects of mulching on tree root dynamics and nutrient cycling patterns.

## Acknowledgements

This work was made possible by the financial contributions of the Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT), Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC), and the Programme de mise en valeur des ressources du milieu forestier (ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (volet II)). The authors thank B. Patarin, A.J. Lalanne, Y. Thériault, C. Bernier and P. Lebel for technical assistance, A. Paquette for his help in the setting up of the experiment (2000), and S. Daigle for his assistance with statistical analyses. We are grateful to W.F.J. Parsons for his help with soil analyses and for revising an earlier version of the manuscript.

## References

- Agriculture Canada Expert Committee on Soil Survey. 1987. The Canadian system of soil classification (CSSC), 2<sup>nd</sup> ed. Agriculture Canada, Ottawa, Ontario. Publication 1646: 1-164.
- Allen, S.C., Jose, S., Nair, P.K.R., Brecke, B.J., Nair, V.D., Graetz, D.A., Ramsey, C.L. 2004. Nitrogen mineralization in a pecan (*Carya illinoensis* K. Koch) – cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States. *Biol. Fertil. Soils* 41: 28-37.
- Anderson, J.P.E., Domsch, K.H. 1978. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil Biol. Biochem.* 10: 215-221.
- Anderson, T.H. 2003. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality. *Agric. Ecosyst. Environ.* 98: 285-293.

- Ben Brahim, M., Gavaland, A., Cabanettes, A. 2000. Generalized allometric regression to estimate biomass of *Populus* in short-rotation coppice. *Scand. J. For. Res.* 15: 171-176.
- Bradley, R.L., Fyles, J.W. 1995. A kinetic parameter describing soil available carbon and its relationship to rate increase in C mineralization. *Soil Biol. Biochem.* 27: 1565-1571.
- Bradley, R.L., Olivier, A., Thevathasan, N., Whalen, J. 2008. Environmental and economic benefits of tree-based intercropping systems. *Policy Options* 29: 46-49.
- Bridgham, S.D., Pastor, J., McClaugherty, C.A., Richardson, C.J. 1995. Nutrient-use efficiency: a litterfall index, a model, and a test along a nutrient-availability gradient in North Carolina peatlands. *Am. Nat.* 145: 1-21.
- Browaldh, M. 1995. The influence of trees on N dynamics in an agrisilvicultural system in Sweden. *Agrofor. Syst.* 30: 301-313.
- CRAAQ. 2001. Guide soya. Centre de Référence en Agriculture et en Agroalimentaire du Québec, Sainte-Foy, Québec, Canada. 47 pp.
- CRAAQ. 2003. Guide de référence en fertilisation. Centre de Référence en Agriculture et en Agroalimentaire du Québec, Sainte-Foy, Québec, Canada. 294 pp.
- Dence, C.W. 1992. The determination of lignin. In: Lin, S.Y., Dence, C.W. (eds.), *Methods in lignin chemistry*. Springer-Verlag, NY, USA. pp. 33-62.
- Dupraz, C. 1999. Adequate design of control treatments in long term agroforestry experiments with multiple objectives. *Agrofor. Syst.* 43: 35-48.
- Environment Canada. 2008. The National climate data and information archive. Canadian climate normals or averages 1971-2000. <http://climate.weatheroffice.ec.gc.ca>.
- Jose, S., Allen, S.C., Nair, P.K.R. 2007. Tree-crop interactions: lessons from temperate alley-cropping systems. In: Batish, D.R., Kohli, R.K., Jose, S., Singh, H.P. (eds.), *Ecological basis of agroforestry*. CRC Press, NW, USA. pp. 15-36.
- Kaur, B., Gupta, S.R., Singh, G. 2000. Soil carbon, microbial activity and nitrogen availability in agroforestry systems on moderately alkaline soils in northern India. *Appl. Soil Ecol.* 15: 283-294.
- Mulia, R., Dupraz, C. 2006. Unusual 3D fine root distributions of two deciduous tree species observed in southern France: What consequences for root dynamics modeling? *Plant Soil* 281: 71-85.
- Nadelhoffer, K.J., Aber, J.D., Melillo, J.M. 1985. Fine roots, net primary production, and soil nitrogen availability: a new hypothesis. *Ecology* 66: 1377-1390.

- Ocio, J.A., Brookes, P.C. 1990. An evaluation of methods for measuring the microbial biomass in soils following recent additions of wheat straw and the characterization of the biomass that develops. *Soil Biol. Biochem.* 22: 685-694.
- Oelbermann, M., Voroney, R.P. 2006. Carbon and nitrogen in a temperate agroforestry system: Using stable isotopes as a tool to understand soil dynamics. *Ecol. Eng.* 29: 342-349.
- Paré, D., Van Cleve, K. 1993. Soil nutrient availability and relationships with aboveground biomass production on postharvested upland white spruce sites in Interior Alaska. *Can. J. For. Res.* 23: 1223-1232.
- Paris, P., Olimpieri, G., Todaro, L., Pisanelli, A., Cannata, F. 2005. Growth and water relations of walnut trees (*Juglans regia* L.) on a mesic site in central Italy: effects of understory herbs and polyethylene mulching. *Agrofor. Syst.* 65: 113-118.
- Rivest, D., Olivier, A. 2007. Cultures intercalaires avec arbres feuillus : quel potentiel pour le Québec ? *For. Chron.* 83: 526-538.
- Rivest, D., Cogliastro, A., Vanasse, A., Olivier, A. 2008. Production of soybean associated with different hybrid poplar clones in a tree-based intercropping system in southwestern Québec, Canada. *Agric. Ecosyst. Environ.* *In press.*
- Sakamoto, K., Oba, Y. 1994. Effect of fungal to bacterial ratio on the relationship between CO<sub>2</sub> evolution and total soil microbial biomass. *Biol. Fertil. Soils* 17: 39-44.
- Seiter, S., Ingham, E.R., William, R.D. 1999. Dynamics of soil fungal and bacterial biomass in a temperate climate alley cropping system. *Appl. Soil Ecol.* 12: 139-147.
- Thevathasan, N.V., Gordon, A.M. 1997. Poplar leaf biomass distribution and nitrogen dynamics in a poplar-barley intercropped system in southern Ontario, Canada. *Agrofor. Syst.* 37: 79-90.
- Thevathasan, N.V., Gordon, A.M. 2004. Ecology of tree intercropping systems in the North temperate region: Experiences from southern Ontario, Canada. *Agrofor. Syst.* 61: 257-268.
- Thevathasan, N.V., Gordon, A.M., Simpson, J.A., Reynolds, P.E., Price, G.W., Zhang, P., 2004. Biophysical and ecological interactions in a temperate tree-based intercropping system. *J. Crop Improv.* 12, 339-363.
- Wang H., Huang, Y., Huang, H., Wang, K.M., Zhou, S.Y. 2005. Soil properties under Chinese fir-based agroforestry system in mid-subtropical China. *Agrofor. Syst.* 64: 131-141.

## **Chapitre 5. Tree-based intercropping systems increase growth and nutrient status of hybrid poplar: a case study from two Northeastern American experiments**

Ce chapitre sera soumis pour publication dans la revue *Ecological Engineering*.

Rivest, D., Cogliastro, A., Olivier, A. 2008. Tree-based intercropping systems increase growth and nutrient status of hybrid poplar: a case study from two Northeastern American experiments. *Ecological Engineering*.

## Résumé

Nous avons vérifié l'hypothèse selon laquelle la culture intercalaire améliore la croissance et le statut nutritif de peupliers hybrides (PH) en comparaison avec un traitement de hersage (absence de culture intercalaire), dans deux sites expérimentaux (St-Rémi et St-Édouard). Trois clones de PH (TD3230, DN3308 et NM3729) ont été plantés en 2000 à St-Rémi. À St-Édouard, les clones DN3333 et DN3570 ont été plantés en 2004. Les traitements ont été appliqués à partir de 2004. À St-Rémi, le traitement de culture intercalaire comprenait le soya pendant les trois premières années suivi de l'orge (quatrième année). À St-Édouard, le traitement de culture intercalaire comprenait le sarrasin (première année), le seigle d'hiver (deuxième année) et le blé d'hiver (troisième année). Au terme de l'expérience, la biomasse aérienne (tige et branches) des PH dans le traitement de culture intercalaire était significativement supérieure à celle observée dans le traitement de hersage. La croissance des PH ne différait pas entre les clones, lesquels ont répondu de façon similaire aux traitements. En général, l'azote s'est avéré le macronutriment le plus limitant pour la croissance des PH, qui ont bénéficié de l'augmentation de la disponibilité de l'azote apportée par la régie des cultures intercalaires.

## Abstract

One of the main objectives of tree-based intercropping (TBI) systems is the production of high-quality timber. Present knowledge regarding intercropping effects on tree growth is limited, especially in eastern Canada. We hypothesized that intercropping increases the growth and nutrient status of young hybrid poplars (*Populus* spp.), compared to a harrowing alley treatment (i.e., no intercrop), in two experimental sites (St-Rémi and St-Édouard) in southern Québec. Three hybrid poplar clones (TD3230, *P. trichocarpa* x *deltoides*; DN3308, *P. deltoides* x *nigra*; and NM3729, *P. nigra* x *maximowiczii*) were planted in 2000 at St-Rémi. Clones DN3333 and DN3570 were planted in 2004 at St-Édouard. At St-Rémi, intercropping comprised a 4-year succession of three crops of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) and barley (*Hordeum vulgare* L.). At St-Édouard, intercropping comprised a 3-year succession of buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench), winter rye (*Secale cereale* L.), and winter wheat (*Triticum aestivum* L.). A split-plot experimental design assigned treatments to the whole-plot and clones to the sub-plot

level. At St-Rémi, four years after treatment, leafless aboveground biomass of hybrid poplars in the intercropping treatment was 37% higher compared to that in the harrowing treatment. At St-Édouard, after the third growing season, leafless aboveground biomass of hybrid poplars in the intercropping treatment was significantly higher by 40%. Vector analysis of foliar nutrient concentrations showed that N was the most limiting nutrient, with evidence that hybrid poplar growth was positively affected by increased N supply provided by intercrop management. Hybrid poplar clones responded similarly to treatments, with no consistent differences in tree growth observed between clones. We conclude that TBI systems may offer an effective means of improving the profitability of hybrid poplars planted for high-value timber in eastern Canada.

## **Introduction**

Agricultural practices in industrialized nations, such as Canada, have undergone modernization over the past century, which has subsequently led to a remarkable increase in crop yields. In many parts of Canada, however, the implementation of modern agricultural practices has excluded trees from the rural landscape and has incurred negative environmental impacts such as depletion of soil fertility, soil erosion, non-point-source pollution and loss of biodiversity. Yet studies from southern Ontario and several European countries have shown that the integration of trees into the agricultural landscape, in the form of tree-based intercropping systems (TBI), may mitigate these negative impacts (Thevathasan *et al.* 2004; Palma *et al.* 2007). In contrast to regular tree plantations, TBI systems offer many economic benefits, including income derived from intercrops, while at the same time maintaining the long-term agricultural potential of the plantation site. For example, Thevathasan and Gordon (2004) reported that yields of C<sub>3</sub> crops, such as soybean and wheat, were either higher or generally on par with yields from conventional monocropping systems in 12-years-old TBI systems. Overall productivity of TBI systems depends, however, on the sum of yields for both agricultural intercrops and tree components. Another concern in any TBI system, which has received less attention, is the effect of intercropping on the growth of trees. Indeed, most TBI studies in North America (e.g., Thevathasan and Gordon 2004; von Kiparski and Gillespie 2008) lack proper control

plots (i.e., trees without intercrops), which would allow this effect to be tested experimentally; the few trials performed in Europe have yielded contradictory results (Burgess *et al.* 2004; Chiffлот *et al.* 2006). In the present study, the effects of TBI on tree growth were evaluated by comparing plots, with and without an intercrop, in two TBI experiments that were designed within mixed plantations of hybrid poplars (*Populus* spp.) and hardwood species. Here, we focused on hybrid poplar because it is recognized as a suitable model for the study of tree growth and its underlying production physiology (Ceulemans and Deraedt 1999).

Hybrid poplar plantations, which present considerable yield potential, are an effective means of reducing both the harvesting pressure on Canadian native forests (Gordon 2001), as well as greenhouse gas emissions (Liberloo *et al.* 2006). Growing hybrid poplar is, however, challenging, and good early growth is critical to long-term success. This is particularly true in eastern Canada, where the growing season is relatively short. Accordingly, rapid early growth of hybrid poplar is advantageous, both for reducing the time between tree planting and harvesting, and for rapidly accruing environmental benefits provided by the trees. Hybrid poplar growth may be optimized with adapted management of high performing clones (Ceulemans and Deraedt 1999). Poplars have higher nutrient requirements than most plantation tree species, especially for N (Stanturf *et al.* 2001). Consequently, fertilization is expected to increase tree growth and leaf nutrient concentrations (e.g., Coleman *et al.* 2006; van den Driessche *et al.* 2007). We expect, therefore, that intercrop management, which includes fertilization, will significantly benefit growth and nutrient status of hybrid poplars planted in TBI systems. Evidence for these benefits was shown recently by Lacombe (2007), who found that hybrid poplar roots in a TBI system in southern Québec reduced soil nitrate leaching, presumably due to uptake.

The objective of this study was to determine the effects of intercropping on the growth and nutrient status of different hybrid poplar clones in the early stages of development of TBI systems, which were implemented in two pilot study sites in southern Québec. These study sites were selected to investigate different management schemes, including tree and



intercrop combinations, so that such prospective TBI systems can be better designed in eastern Canada.

## **Materials and methods**

### **Study sites and field operations**

Two experimental sites (St-Rémi and St-Édouard) were selected for this study. The first site is located near Saint-Rémi-de-Napierville (45°14'N, 73°40'W, 53 m above sea-level) on an Orthic Melanic Brunisol (Agriculture Canada Expert Committee on Soil Survey 1987). Mean annual temperature is 6 °C and mean annual precipitation is 1027 mm (Environment Canada 2008). The second study site is located near Saint-Édouard-de-Maskinongé (46°20'N, 73°11'W, 176 m a.s.l.) on an Orthic Humo-Ferric Podzol. Mean annual temperature is 3 °C and mean annual precipitation is 1079 mm. Relevant soil characteristics for each site are summarized in Table 5.1.

Alternating rows of hybrid poplars and hardwood tree species were spaced 8 and 10 m apart at St-Rémi and St-Édouard, respectively. The hybrid poplar clones and hardwood species were being grown for high value-added veneer production. Both experiments compared two alley treatments introduced since 2004: intercropping versus harrowing. Each treatment was applied to each of the selected hybrid poplar clones (three at St-Rémi or two at St-Édouard). These locally produced clones from the Québec Ministry of Natural Resources were chosen, based on their availability, on their operational use, and on their differing parentage (St-Rémi). A summary of selected hybrid poplar clones and intercrop species succession is shown in Table 5.1. In each site, the experimental design was a split-plot that was arranged in a randomized complete block design (St-Rémi,  $n = 4$ ; St-Édouard,  $n = 6$ ). Alley treatments were assigned to the whole-plot level, and hybrid poplar clones to the sub-plot level. This design corresponds to a total of 24 experimental plots in each site. Each plot measured 288 m<sup>2</sup> (18 x 16 m) at St-Rémi and 400 m<sup>2</sup> (20 x 20 m) at St-Édouard. Plots were bounded on each side by a row of hardwood species, with two alleys in the middle separated by one row of hybrid poplars. Rows of hardwoods were used as buffers to separate the main plots.

Table 5.1. Main characteristics of the St-Rémi and St-Édouard experimental sites in southern Québec, Canada

St-Rémi	
Soil characteristics	Loam (19% clay and 46.5% sand), 26 g organic C kg <sup>-1</sup> , 2.5 g total N kg <sup>-1</sup> , pH <sub>water</sub> 6.9
Hybrid poplar clones (parentage, cultivar and origin)	TD3230 ( <i>P. trichocarpa</i> Torr. & Gray x <i>deltoides</i> Bartr. Ex Marsh, cv. Boelare, Belgium) DN3308 ( <i>P. deltoides</i> x <i>nigra</i> L., cv. Regenerata Bâtard d'Hauterive, France) NM3729 ( <i>P. nigra</i> x <i>maximowiczii</i> A. Henry cv. Max 5, Germany)
Hardwood tree species	Black walnut ( <i>Juglans nigra</i> L.) and white ash ( <i>Fraxinus americana</i> L.)
Intercrop species, sowing date and fertilization (kg ha <sup>-1</sup> of N:P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> :K <sub>2</sub> O)	Soybean ( <i>Glycine max</i> (L.) Merr.), June 21, 2004 (no fertilizer) Soybean, June 11, 2005 (15:81:72); July 3, 2006 (25:66:58) Barley ( <i>Hordeum vulgare</i> L.), June 16, 2007 (45:45:25)
St-Édouard	
Soil characteristics	Sandy loam (10% clay and 78% sand), 25 g organic C kg <sup>-1</sup> , 1.9 g total N kg <sup>-1</sup> , pH <sub>water</sub> 5.5
Hybrid poplar clones (parentage, cultivar and origin)	DN3333 ( <i>P. deltoides</i> x <i>nigra</i> , cv. Stormont, Ontario, Canada) DN3570 ( <i>P. deltoides</i> x <i>nigra</i> , no cv. name, Belgium)
Hardwood tree species	Red oak ( <i>Quercus rubra</i> L.), red ash ( <i>Fraxinus pennsylvanica</i> Marsh.) and white ash
Intercrop species, sowing date and fertilization (kg ha <sup>-1</sup> of N:P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> :K <sub>2</sub> O)	Common buckwheat ( <i>Fagopyrum esculentum</i> Moench), June 8, 2004 (no fertilizer) Winter rye ( <i>Secale cereale</i> L.), September 6, 2004 (40:0:0) Winter wheat ( <i>Triticum aestivum</i> L.), September 12, 2005 (104:38:43)

At St-Rémi, 20-cm cuttings of hybrid poplar were planted in May 2000, every 2 m along the row, for a total of nine cuttings of a same clone per plot. In January 2006, a thinning increased the spacing between hybrid poplars in each row from 2 to 6 m. Hardwood species (Table 5.1) were planted every 3 m along the rows. At St-Édouard, one-year-old bare root hybrid poplar seedlings were planted in June 2004 every 2 m along the row, for a total of ten seedlings of a same clone per plot. Hardwood tree species (Table 5.1) were planted at 2-m intervals. At each site, strips of black polythene-film mulch (150 cm-wide) suppressed weeds close to the tree bases. Before sowing the intercrops, the soil was amended with standard applications of fertilizer (Table 5.1) as recommended for each selected intercrop species (CRAAQ 2003). At St-Rémi, soybean received a conventional herbicide (mixture of cloransulam-methyl, quizalofop-p-ethyl and thifensulfuron-methyl). The other intercrops did not receive any herbicide. In the harrowing treatment, the alleys were regularly disked (ca. 10-cm depth; two times from June to early August) during each growing season so that the hybrid poplars would have minimal competition from native herbaceous vegetation. No fertilizer was applied in this treatment.

### **Hybrid poplar growth**

Hybrid poplar height and diameter were measured before alley treatment application (i.e., June 2004) and at the end of each growing season (October) between 2004 and 2007. Heights were estimated with a Vertex III hypsometer (Haglof Inc., Långsele, Sweden) at St-Rémi and with a measuring pole at St-Édouard. Diameters were measured with standard calipers at breast height (DBH; 130 cm) at St-Rémi and at ground level (basal diameter) at St-Édouard. Destructive sampling was used to estimate aboveground biomass at St-Édouard. A total of 28 randomly selected hybrid poplars were harvested by hand in September 2005 and 2006 (basal diameter: 3.4 to 9.7 cm). Trees were cut at ground level, transported to the laboratory and oven-dried (65 °C for 3 wk). Hybrid poplar aboveground biomass was sorted into different components (leaves, branches and stem), oven-dried (65 °C for 96 h) and weighed. An allometric regression equation, with basal diameter ( $BD$ , cm) as the independent variable and foliage biomass ( $FB$ , kg dry matter tree<sup>-1</sup>) as the dependent variable, was developed:  $FB = -1093.48 + 367.18BD$  ( $r^2 = 0.95$ ). A second allometric equation relating leafless aboveground biomass ( $LAB$ , kg dry matter tree<sup>-1</sup>) to basal diameter was also developed:  $LAB = -2703.12 + 797.68BD$  ( $r^2 = 0.97$ ). At St-Rémi,  $LAB$

was estimated following a generalized hybrid poplar biomass equation derived from the data of Ben Brahim *et al.* (2000):  $LAB = 3.85 + 0.000068H_m D^{2.34} - 0.017D_m^{2.34}$ , where  $D$  is DBH (cm) at tree level, and  $H_m$  and  $D_m$  are respective mean height (cm) and mean DBH (cm) estimates at the stand level.

### **Foliar sampling and analysis**

At both sites, foliar samples were collected in early August 2005 and 2006 to measure nutrient concentrations and unit leaf dry mass and area. Clones sampled were DN3308 and NM3729 at St-Rémi, and DN3333 and DN3570 at St-Édouard. Ten (St-Édouard) to twenty (St-Rémi) fully expanded leaves with petioles were collected from the upper tree crowns from each of the four trees in each plot, and bulked into two composite samples (totalling 20 (St-Édouard) to 40 (St-Rémi) leaves per sample). In 2005, 64 trees were sampled on both sites (4 blocks x 2 treatments x 2 clones x 4 randomly chosen trees per plot). In 2006, sampling was repeated again from 64 trees at St-Édouard and 32 trees at St-Rémi (4 blocks x 2 treatments x 2 clones x 2 trees per plot). Leaves were scanned and their unit areas determined using Winfolia software (Régent Instruments, Québec, QC, Canada). Foliar samples were oven-dried (65 °C for 48 h) to determine unit foliar mass. Dried material was ground to pass a 250 µm mesh, and 0.3 g subsamples were digested in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O-Se (Parkinson and Allen 1975). N concentration in the digest was measured colorimetrically (nitroprusside/salicylate) using flow-injection analysis (FIA Quick-Chem 4000, Lachat Instruments, Miliwaukee, WI, USA); P, K, Ca and Mg were measured by inductively coupled plasma spectrometry (Perkin Elmer® Plasma Model 40, Wellesley, MA, USA). An index of nitrogen use efficiency (NUE) was calculated at St-Édouard in 2006. NUE was estimated as LAB increment in 2006, divided by N content of the whole tree foliage (FB x N concentration).

### **Data analyses**

A mixed ANOVA model (with blocks as random effects) followed by multiple comparison of means according to Tukey's method were performed on growth, leaf morphological traits, and nutrient concentration and content data using SAS (SAS 8.2, SAS Institute, Cary, NC, USA). In the cases where the residuals were not normally distributed, non-parametric

transformation was applied to the raw data. The significance level for all tests was fixed at  $P = 0.05$ .

Vector analysis (Haase and Rose 1995) was performed to diagnose the nutritional status of each hybrid poplar clone in each treatment at each site. This technique evaluates the extent to which observed treatment effects are linked to nutrient supply. Vector analysis has often been restricted to tree species with determinate growth, emphasizing the first year following treatments. Recently, this method has been applied successfully to diagnose the nutrient status of poplars (i.e., indeterminate growth) in later growing seasons following treatments (van den Driessche *et al.* 2003; Schuler and Robinson 2008). Correlation analysis was used to explore the relationship between hybrid poplar growth (annual diameter increment and unit leaf area) and leaf nutrient concentrations.

## Results

### Growth of hybrid poplars

At St-Rémi, hybrid poplars were of relatively uniform size at the beginning of the study (2004, fifth year growth), but significant effects of intercropping on DBH was observed in 2005 ( $p = 0.02$ ), 2006 ( $p = 0.003$ ) and 2007 ( $p = 0.003$ ), regardless of clone (Figure 5.1a). Although not significantly different ( $p = 0.11$ ), tree height was greater in the intercropping treatment in 2007 (Figure 5.1a). At the end of 2007, four years after intercropping began, hybrid poplars were greater to those in the harrowing treatment by an average of 2.2 cm (13%) in DBH (Figure 5.1a), and by 20.3 kg (37%,  $p = 0.0069$ ) in leafless aboveground biomass (Table 5.2). In 2007, height and diameter (data not shown) as well as leafless aboveground biomass (Table 5.2) did not differ among the clones.

At St-Édouard, no significant effect of intercropping on hybrid poplar growth was found at the end of the first year of the experiment (2004). However, after the second (2005) and third (2006) growing seasons, basal diameter ( $p \leq 0.001$ ) and height ( $p \leq 0.007$ ) in the intercropping treatment were greater than those in the harrowing treatment, regardless of clone (Figure 5.1b). After the third growing season, hybrid poplars in the intercropping

treatment were greater than those in the harrowing treatment by an average of 1.7 cm (25%) in basal diameter, by 66 cm (17%) in height and by 1.2 kg (40%,  $p = 0.0002$ ) in leafless aboveground biomass (Table 5.2). Height and diameter (data not shown), together with leafless aboveground biomass (Table 5.2), did not differ between clones. Mean height of clone DN3570 (434 cm), though, tended ( $p = 0.06$ ) to be greater than that of clone DN3333 (404 cm).

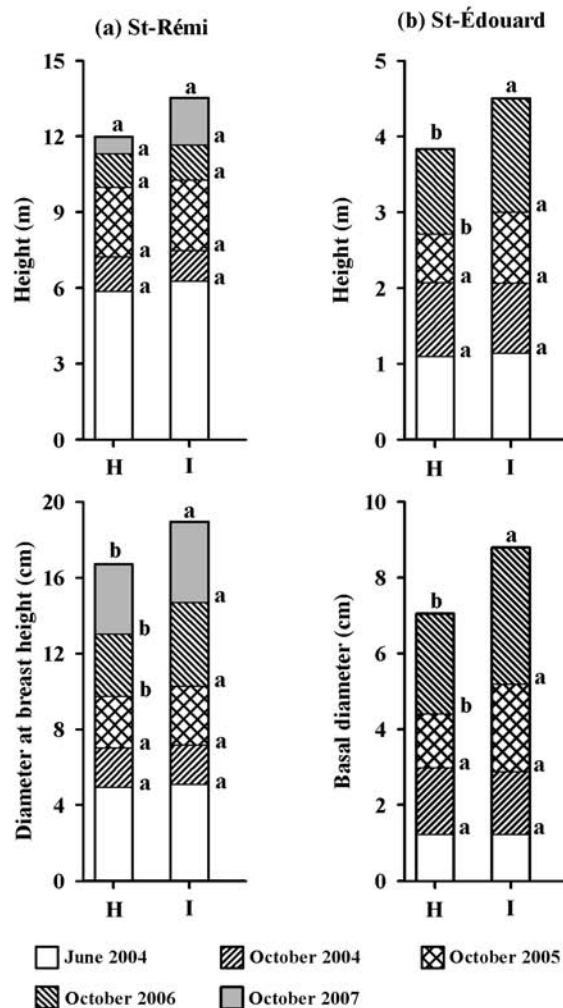


Figure 5.1. Effect of treatments on hybrid poplar height and diameter over time in two experiments at (a) St-Rémi ( $n = 36$  to 108 plants per treatment) and (b) St-Édouard ( $n = 49$  to 126 plants per treatment), in southern Québec, Canada. Treatment abbreviations: H = harrowing, I = intercropping. Significant differences ( $p < 0.05$ ) between treatments are indicated by different letters (Tukey's multiple means comparison test). In each site, treatments were introduced since June 2004. In October 2004, hybrid poplars were 5-y-old at St-Rémi and 1-y-old at St-Édouard.

Table 5.2. Effect of treatments and hybrid poplar clones on leafless aboveground biomass in two experiments at St-Rémi and St-Édouard in southern Québec, Canada.

	Dry biomass (kg tree <sup>-1</sup> )			
	Treatment		Clone	
St-Rémi (2007)	Harrowing	54.72 b	TD3230	61.35
	Intercropping	75.01 a	DN3308	62.50
	<i>P</i> value	0.0069	NM3729	71.38
			<i>P</i> value	0.3475
St-Édouard (2006)	Harrowing	3.08 b	DN3333	3.85
	Intercropping	4.31 a	DN3570	3.53
	<i>P</i> value	0.0002	<i>P</i> value	0.3447

Note: At St-Rémi, 2007 represents the 8<sup>th</sup> year after plantation establishment, and the 4<sup>th</sup> year after alley treatment introduction. At St-Édouard, 2006 represents the 3<sup>rd</sup> year after plantation and alley treatment establishment. At St-Rémi, n = 32 per treatment and n = 24 per clone. At St-Édouard, n = 48 per treatment and per clone. Significant differences ( $p < 0.05$ ) between treatments or clones are indicated by different letters (Tukey's multiple means comparison test).

### Nutrition of hybrid poplars

At St-Rémi, in 2005, intercropping increased unit leaf dry mass, N concentration, N:P ratio, and all leaf macronutrient contents of the clones DN3308 and NM3729 (Tables 5.3 and 5.4). Only Mg concentration declined in the intercropping treatment in 2005. Leaves of NM3729 had higher unit dry mass, K (content), Ca (content and concentration) and Mg (content and concentration) than those of DN3308 in both treatments. In contrast, N and P concentrations were greater in leaves of DN3308. In 2006, unit leaf area of both clones was increased significantly by intercropping treatment (Tables 5.3 and 5.4). Unit leaf dry mass, N:P ratio and leaf N content also tended to be greater in the intercropping, although treatments did not significantly differ for these variables ( $p \leq 0.07$ ). That same year, unit leaf dry mass, unit leaf area and all leaf macronutrient contents were greater in NM3729 than in DN3008 in both treatments, while N concentration was lower.

At St-Édouard, in 2005, intercropping induced a significant increase in unit leaf dry mass, unit leaf area, N, P and K foliar concentrations, N:P ratio, and all macronutrient contents of clones DN3333 and DN3570 (Tables 5.5 and 5.6). Similarly, in 2006, leaves of both clones in the intercropping treatment had higher unit leaf dry mass, unit leaf area, N (concentration and content), K (concentration and content) and Mg (content) than those in the harrowing treatment. Only Ca concentration (both years) declined in the intercropping treatment.

Generally, both clones tended to have similar morphological leaf traits and nutrient status regardless of treatment in 2005 and 2006. However, unit leaf dry mass (2005), K content (2005), Ca concentration and content (2006), and Mg content (2006) of DN3570 were significantly greater than those of DN3333. Near-significant effects of treatment and clone ( $p \leq 0.1$ ) were detected for NUE in 2006. Across clones, NUE was 20% higher in the harrowing treatment than in the intercropping treatment. NUE of DN3333 tended to be greater than that of DN3570, regardless of treatment.

Table 5.3. Effect of treatments and hybrid poplar clones on morphological leaf traits and nutrient status in leaves (concentration and content) at St-Rémi in 2005 and 2006.

	DN3308		NM3729	
	Harrowing	Intercropping	Harrowing	Intercropping
August 2005				
Unit Leaf dry mass (g)*	0.50 b	0.62 a	0.71x	0.98 y
N (mg/g)*	21.6 b	25.2 a	16.0 x	19.8 y
P (mg/g)*	2.1	2.3	1.9	1.9
K (mg/g)	12.5	12.2	12.9	11.8
Ca (mg/g)*	10.4	10.0	15.0	14.0
Mg (mg/g)*	2.8 a	2.6 b	3.3 x	3.0 y
N:P	10.2 b	11.2 a	8.3 y	10.7 x
N (mg/leaf)	10.9 b	16.2 a	11.5 y	19.5 x
P (mg/leaf)	1.1 b	1.5 a	1.4 y	1.9 x
K (mg/leaf)*	6.3 b	7.9 a	9.1 y	11.6 x
Ca (mg/leaf)*	5.2 b	6.4 a	10.5 y	13.9 x
Mg (mg/leaf)*	1.4 b	1.7 a	2.3 y	2.9 x
August 2006				
Unit leaf dry mass (g)*	0.57	0.69	1.02	1.17
Unit leaf area (cm <sup>2</sup> )*	59.09 b	73.22 a	102.20 y	130.27 x
N (mg/g)*	18.4	19.5	16.5	17.9
P (mg/g)	2.6	2.1	2.4	1.8
K (mg/g)	9.9	10.9	10.6	11.5
Ca (mg/g)	8.6	6.9	10.7	8.7
Mg (mg/g)	2.3	2.1	2.4	2.1
N:P	7.2	10.0	7.0	10.2
N (mg/leaf)*	10.5	13.4	16.9	21.0
P (mg/leaf)*	1.5	1.4	2.4	2.1
K mg/leaf)*	5.7	7.5	10.9	13.5
Ca (mg/leaf)*	4.9	4.8	11.0	10.0
Mg (mg/leaf)*	1.3	1.4	2.5	2.5

Note: 2005 and 2006 represent the 6<sup>th</sup> and the 7<sup>th</sup> years after plantation establishment, and the 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> years after alley treatment introduction. n = 8 for each treatment per clone combination. For each clone, different letters indicate significant differences ( $p < 0.05$ ) between treatments (Tukey's multiple means comparison test); an asterisk indicates significant differences between clones.



Table 5.4. ANOVA *P*-values for morphological leaf traits and nutrient status in leaves at St-Rémi in 2005 and 2006.

Source of variation	LDM	LA	N	P	K	Ca	Mg	N:P	N	P	K	Ca	Mg
	Concentration							Content					
2005													
Treatment (T)	<b>0.0045</b>	N.D.	<b>0.0065</b>	0.5530	0.2262	0.5193	<b>0.0158</b>	<b>0.0486</b>	<b>0.0035</b>	<b>0.0484</b>	<b>0.0290</b>	<b>0.0470</b>	<b>0.0355</b>
Clone (C)	<b>0.0142</b>	N.D.	<b>0.0165</b>	<b>0.0209</b>	0.8968	<b>0.0005</b>	<b>0.0355</b>	0.1340	0.2416	0.0768	<b>0.0082</b>	<b>0.0044</b>	<b>0.0145</b>
T x C	0.2175	N.D.	0.8979	0.1481	0.2082	0.6146	0.6946	0.1898	0.4162	0.8038	0.5438	0.1773	0.2368
2006													
Treatment (T)	0.0700	<b>0.0117</b>	0.1149	0.1226	0.2921	<b>0.0060</b>	0.1313	0.0506	0.0703	0.5433	0.1277	0.3674	0.3683
Clone (C)	<b>0.0013</b>	<b>0.0001</b>	<b>0.0024</b>	0.1258	0.1764	0.0687	0.1505	0.9520	<b>0.0014</b>	<b>0.0006</b>	<b>0.0033</b>	<b>0.0038</b>	<b>0.0017</b>
T x C	0.2711	0.2439	0.7371	0.7821	0.9584	0.3076	0.5881	0.4191	0.6681	0.3355	0.6227	0.5464	0.6369

LDM, unit leaf dry mass; LA, unit leaf area; N.D., not determined.

Table 5.5. Effect of treatments and hybrid poplar clones on morphological leaf traits, nutrient status in leaves (concentration and content) and nitrogen-use efficiency at St-Édouard in 2005 and 2006.

	DN3333		DN3570	
	Harrowing	Intercropping	Harrowing	Intercropping
August 2005				
Unit leaf dry mass	0.42 b	0.63 a	0.43 y	0.75 x
Unit leaf area (cm <sup>2</sup> )	38.10 b	61.82 a	36.92 y	68.83 x
N (mg/g)	15.1 b	22.3 a	14.4 y	20.7 x
P (mg/g)	1.4 b	1.7 a	1.3 y	1.5 x
K (mg/g)	4.4 b	5.8 a	5.7 y	6.6 x
Ca (mg/g)	7.7 a	6.9 b	8.2 x	6.9 y
Mg (mg/g)	2.2	2.1	2.0	2.0
N:P	11.4 b	13.2 a	11.0 y	13.8 x
N (mg/leaf)	6.4 b	14.0 a	6.3 y	15.6 x
P (mg/leaf)	0.6 b	1.1 a	0.6 y	1.1 x
K (mg/leaf)*	1.9 b	3.6 a	2.5 y	5.0 x
Ca (mg/leaf)	3.3 b	4.4 a	3.6 y	5.2 x
Mg (mg/leaf)	0.9 b	1.3 a	0.9 y	1.5 x
August 2006				
Unit leaf dry mass (g)	0.59 b	0.83 a	0.58 y	0.90 x
Unit leaf area (cm <sup>2</sup> )	68.40 b	98.80 a	74.88 y	119.33 x
N (mg/g)	14.8 b	16.9 a	15.7 y	18.0 x
P (mg/g)	1.6	1.5	1.5	1.7
K (mg/g)	7.3 b	8.8 a	7.8 y	9.8 x
Ca (mg/g)*	5.4 a	4.6 b	7.7 x	6.2 y
Mg (mg/g)	1.8	1.5	1.9	1.8
N:P	10.5	11.6	10.9	10.6
N (mg/leaf)	8.7 b	14.0 a	9.2 y	16.2 x
P (mg/leaf)	0.9	1.2	0.9	1.6
K (mg/leaf)	4.3 b	7.2 a	4.5 y	8.9 x
Ca (mg/leaf)*	3.2	3.7	4.5	5.5
Mg (mg/leaf)*	1.0 b	1.2 a	1.1 y	1.6 x
N-use efficiency	106.4	83.7	86.5	77.8

Note: 2005 and 2006 represent the 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> years after plantation and alley treatment establishment. n = 8 for each treatment x clone combination. For each clone, different letters indicate significant differences ( $p < 0.05$ ) between treatments (Tukey's multiple means comparison test); an asterisk indicates significant differences between clones.

Table 5.6. ANOVA *P*-values for morphological leaf traits, nutrient status in leaves and nitrogen-use efficiency at St-Édouard in 2005 and 2006.

Source of variation	LDM	LA	N	P	K	Ca	Mg	Concentration			Content			NUE
								N:P	N	P	K	Ca	Mg	
2005														
Treatment (T)	<b>0.0035</b>	<b>0.0007</b>	<b>0.0036</b>	<b>0.0124</b>	<b>0.0185</b>	<b>0.0490</b>	0.7201	<b>0.0020</b>	<b>0.0032</b>	<b>0.0062</b>	<b>0.0039</b>	<b>0.0366</b>	<b>0.0090</b>	N.D.
Clone (C)	<b>0.0084</b>	0.2281	0.0544	0.3176	0.0657	0.6254	0.2542	0.8581	0.0693	0.3555	<b>0.0458</b>	0.0983	0.4537	N.D.
T x C	0.0572	0.1983	0.3620	0.2721	0.3521	0.3790	0.5376	0.1858	<b>0.0424</b>	0.4875	0.1144	0.1781	<b>0.0170</b>	N.D.
2006														
Treatment (T)	<b>0.0030</b>	<b>0.0039</b>	<b>0.0413</b>	0.3420	<b>0.0327</b>	<b>0.0338</b>	0.0915	0.9797	<b>0.0085</b>	0.1108	<b>0.0005</b>	0.1410	<b>0.0336</b>	0.1023
Clone (C)	0.5210	0.1386	0.1224	0.1708	0.3197	<b>0.0203</b>	0.1752	0.3931	0.2341	0.2157	0.3118	<b>0.0026</b>	<b>0.0380</b>	0.0944
T x C	0.4701	0.3817	0.8368	0.6481	0.3493	0.5335	0.6580	0.8033	0.4463	0.1902	0.1009	0.5469	0.3012	0.2653

LDM, unit leaf dry mass; LA, unit leaf area; NUE, N-use efficiency; N.D., not determined.

Vector analysis indicated that hybrid poplars had foliar N deficiencies in the harrowing treatment (i.e., positive shift in dry mass, nutrient concentration and nutrient content in the intercropping treatment) for both clones at St-Rémi in 2005 (Figure 5.2a). To a lesser extent, P (DN3308) in 2005, as well as N and K for both clones in 2006 (Figure 5.2b), were also deficient. At St-Édouard, N, P (except for DN3333 in 2006) and K laid in the direction of deficiency in both years (Figures 5.2c, 5.2d). For each clone, in both sites and both years, Ca and Mg were non-limiting since they were grouped along vector directions associated with sufficiency or dilution.

### **Relationships between growth of hybrid poplars and leaf nutrient concentrations**

Across treatments, leaf N concentration of each clone was generally highly and positively correlated with unit leaf area and diameter growth (except for NM3729) for both sites and both years (Table 5.7). At St-Rémi, P concentration was negatively correlated with diameter growth of NM3729 in 2006. In contrast, at St-Édouard, P concentration was positively correlated with unit leaf area of both clones in 2005 and of DN3570 in 2006. Leaf P concentration was also positively correlated with diameter growth of DN3570 in 2005. Significant positive correlation was observed between leaf K concentration and unit leaf area of DN3308 at St-Rémi in 2006. Similarly, K concentration was positively correlated with unit leaf area and diameter growth of DN3333 (2005) and DN3570 (2006) at St-Édouard. For both sites, Ca and Mg concentrations were weakly or negatively correlated (although not always significantly) with unit leaf area and diameter growth.

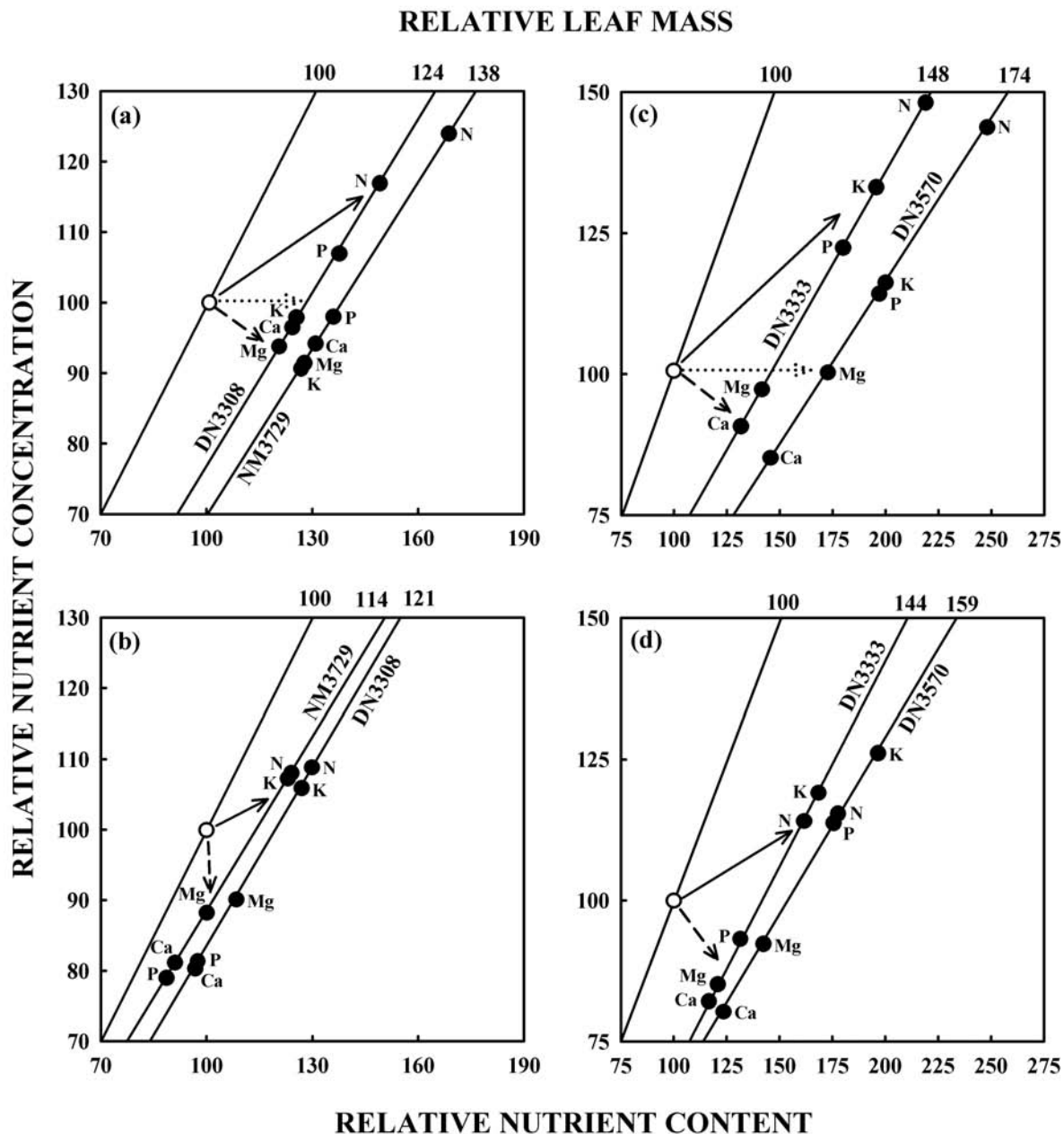


Figure 5.2. Leaf macronutrient vector diagrams for different hybrid poplar clones as affected by intercropping in two experiments at St-Rémi in 2005 (a) and 2006 (b), and at St-Édouard in 2005 (c) and 2006 (d). All values are normalized with respect to harrowing treatment values (set to 100), represented by the open circles. Solid vectors indicate nutrient deficiency; dotted vectors indicate nutrient sufficiency; dash vectors indicate nutrient dilution (Haase and Rose 1995).

Table 5.7. Pearson product-moment correlations ( $r$ ) for growth traits of various hybrid poplar clones versus leaf nutrient concentrations measured in two experiments at St-Rémi and St-Édouard, Québec, in 2005 and 2006.

	Clone	2005 (n = 16)		2006 (n = 16)	
		Unit leaf area (cm <sup>2</sup> )	Diameter growth (cm)	Unit leaf area (cm <sup>2</sup> )	Diameter growth (cm)
<b>St-Rémi</b>					
N (mg/g)	DN3308	N.D.	0.78***	0.50*	0.53*
	NM3729	N.D.	0.26ns	0.57*	0.45ns
P (mg/g)	DN3308	N.D.	0.23ns	-0.05ns	-0.42ns
	NM3729	N.D.	0.25ns	-0.16ns	-0.62*
K (mg/g)	DN3308	N.D.	-0.22	0.66**	0.12ns
	NM3729	N.D.	-0.29ns	0.48ns	-0.03ns
Ca (mg/g)	DN3308	N.D.	-0.27ns	-0.65**	-0.29ns
	NM3729	N.D.	0.04ns	-0.48ns	-0.38ns
Mg (mg/g)	DN3308	N.D.	-0.70**	-0.53*	-0.44ns
	NM3729	N.D.	-0.50*	-0.30ns	-0.20ns
<b>St-Édouard</b>					
N (mg/g)	DN3333	0.90***	0.75***	0.68**	0.77**
	DN3570	0.94***	0.92***	0.72**	0.72**
P (mg/g)	DN3333	0.52*	0.19ns	0.04ns	0.38ns
	DN3570	0.55*	0.60*	0.65**	0.32ns
K (mg/g)	DN3333	0.70**	0.75***	0.40ns	0.25ns
	DN3570	0.48ns	0.48ns	0.58*	0.56*
Ca (mg/g)	DN3333	-0.40ns	-0.63**	-0.35ns	-0.02ns
	DN3570	-0.48ns	-0.37ns	-0.64**	-0.59*
Mg (mg/g)	DN3333	-0.32ns	-0.65**	-0.22ns	0.08ns
	DN3570	0.05ns	0.02ns	-0.37ns	-0.28ns

N.D., not determined; \* $p \leq 0.05$ ; \*\* $p \leq 0.01$ ; \*\*\* $p \leq 0.001$ .

## Discussion

Our results showed that intercrops such as soybean and cereals may significantly improve hybrid poplar growth. Indeed, diameter and leafless aboveground biomass of all hybrid poplar clones in the intercropping treatment were greater than those in the harrowing treatment after three and four respective treatment years at St-Édouard and St-Rémi. These results are in agreement with other studies that have shown positive effects of intercropping on the growth of young hybrid poplars or high-value hardwood tree species, whose water supply was not limiting (McLaughlin *et al.* 1987; Chiffot *et al.* 2006). However, they

contrast with those of Burgess *et al.* (2004), who showed that the diameters of hybrid poplars in an intercropping treatment were only 75-83% of those in a regularly cultivated fallow treatment by the end of the seventh growing season in three lowland sites of England (mean annual precipitation of 688 mm). The authors argued that the main cause of these results was likely to be the competition between trees and crops for water. Yet, water competition has appeared to play a minor role compared to nutrient competition (and particularly, N) in the growth of hybrid poplars planted in southern Québec (Coll *et al.* 2007), where precipitations during the summer are usually frequent and abundant (Environment Canada 2008). Therefore, it seems that intercrop management of non-irrigated TBI systems will benefit hybrid poplar growth preferentially in temperate regions that are not limited by water shortage.

The increased growth observed in the intercropping treatment of the present experiments may be attributed to root capture of inorganic fertilizer nutrients supplied primarily to meet the intercrop needs. This could be corroborated by the fact that hybrid poplar growth was unaffected by intercropping after the first year (2004) of the study, when no fertilizers had been delivered yet to the intercrops in both sites (Table 5.1). In contrast, hybrid poplar growth increased in the intercropping treatment after the second year (2005), when intercrop fertilization was applied. In 2005 and 2006, leaf growth responses and increases in leaf concentrations of the nutrients supplied by fertilizers, particularly N (both sites) and K (St-Édouard), also suggested that some fertilizer-based nutrients had been taken up by trees in the intercropping treatment. Results from tropical (Rowe *et al.* 1999) and temperate (Jose *et al.* 2000; Allen *et al.* 2004; Lacombe 2008) TBI systems have demonstrated that tree roots are able to scavenge mobile fertilizer nutrients below the rooting zone of the intercrops. For example, Rowe *et al.* (1999) estimated that recovery of  $^{15}\text{N}$ -urea by *Gliricidia sepium* L. and *Peltophorum dasyrrhachis* (Miq.) Kurz was 11.3 and 9.2%, respectively, of the labelled fertilizer that had been applied 70 days previously. There is also a growing body of literature that has illustrated the dramatic capacity of *Populus* spp. and their hybrids to rapidly take up and use N derived from fertilizer (e.g., Coleman *et al.* 1998; Cooke *et al.* 2005). The use of fertilizers combined with intercrop residues in our intercropping plots may also have provided a favourable soil environment which was

optimal for microbiological activity. This activity, in turn, could have resulted in rapid mineralization of organic matter, thereby facilitating the uptake of nutrients by the trees. Evidence for this was given by Kaur *et al.* (2000) and Wang *et al.* (2005), who found higher soil available nutrients, and greater microbiological and biochemical activity in TBI systems, compared to regular tree plantations. Additional investigation is necessary to explore the specific role of fertilizers, which are intended for the intercrops, in tree nutrients uptake and growth dynamics and nutrient cycling patterns of TBI systems. An accurate experimental design should integrate a fertilization factor (i.e., with or without fertilizer), both in the intercropping and control treatments. Finally, in the specific case of St-Rémi, the transfer of fixed-N<sub>2</sub> from the soybean intercrop to trees may also have contributed to increased tree growth (Dupraz *et al.* 1999).

Improvement of N availability for the growth of hybrid poplars is often rapidly reflected in their leaf nutrient status (van den Driessche 1999; Coleman *et al.* 2006). Hence, our foliar analyses suggest that the greater hybrid poplar growth in the intercropping treatment of both sites may have been due principally to more plant-available N. Indeed, vector analysis of the nutritional status clearly indicated that N was a major determinant of growth limitation in the harrowing treatment, where no fertilizers had been applied (Figure 5.2). Although hybrid poplars do not have such determinate growth, which would limit to some extent the use of the vector analysis method, it does provide insight about the physiological processes (e.g., nutrient deficiency) that may limit hybrid poplar growth when no fertilizer is applied (Lteif *et al.* 2008). In fact, foliar N concentrations in the harrowing treatment (both sites; Tables 5.3 and 5.5) were often near or below the 17 mg g<sup>-1</sup> considered sufficient for many hybrid poplar clones (Jug *et al.* 1999; Bungart and Huttl 2004). Nitrogen limitation was revealed by the fact that N:P ratios in the harrowing treatment were generally lower than those in the intercropping treatment (Tables 5.3 and 5.5). In a variety of plant communities, Koerselman and Meuleman (1996) found that a plant tissue N:P ratio lower than 14 was indicative of N-limitation. Average N:P ratios in our study (ca. 9.3 at St-Rémi and 11.6 at St-Édouard, regardless of treatment and clone) suggested N-limitation on both sites. Unit leaf area of hybrid poplars was also the lowest in the harrowing treatment and was positively correlated with leaf N concentrations in both sites, again suggesting N-



limitation. Cooke *et al.* (2005) observed that *Populus balsamifera* spp. *trichocarpa* x *deltoides* had lower unit leaf area when N-limited. They indicated that this response was caused by an acceleration of leaf maturation, leading to a considerably shortened sink-to-source leaf transition zone. Finally, the nearly significant ( $p = 0.1$ ) and higher NUE values that were measured in the harrowing treatment at St-Édouard may also have reflected N-limitation in this treatment. Indeed, increased NUE with decreasing N availability has been demonstrated previously for many deciduous trees, including poplar (e.g., Ingestad 1979; Kubiske *et al.* 1997).

At St-Édouard, N was not the only element limiting growth. Results from vector analysis (Figures 5.2c, 5.2d) and correlation analysis (Table 5.7) pointed to K, and to a lesser extent P, as being deficient. Leaf P and K concentrations of both clones in both treatments at St-Édouard (Table 5.3) were near or lower (specifically K in 2005) than the critical deficiency values reported for these nutrients (1-4.4 mg P g<sup>-1</sup>; 7-20 mg K g<sup>-1</sup>; Jug *et al.* 1999; Bungart and Huttl 2004). Conversely, in both treatments, leaf Ca concentrations of all hybrid poplar clones at St-Édouard (Table 5.3), together with those at St-Rémi (Table 5.5), were generally above the range (3-6.8 mg g<sup>-1</sup>) reported for adequate Ca nutrition (Jug *et al.* 1999). High exchangeable-Ca contents in the soil column may limit K uptake and result in a decrease in hybrid poplar growth (Clarkson 1985). This supposition was corroborated in this study by the negative correlations between leaf Ca concentration and unit leaf area (although not always significant) and by low K/Ca ratios. Average K/Ca ratios (calculated from data in Tables 5.3 and 5.5) were below the “normal” K/Ca ratios reported for deciduous trees (1-3.5; Kopinga and van den Burg 1995) at St-Édouard for both clones in both treatments in 2005 (0.57-0.96), and at St-Rémi for clone NM3729 in both treatments in 2005 (0.84-0.86) and in the harrowing treatment in 2006 (0.99). Concerning leaf Mg concentrations, a range of 1 to 3 mg Mg g<sup>-1</sup> may be assumed as a guideline for adequate Mg nutrition (Jug *et al.* 1999; Bungart and Huttl 2004). Therefore, leaf Mg nutrition of the clones studied in both sites was adequate.

The fact that no significant difference in tree growth was found between the clones may be associated with the relatively young age of the hybrid poplars. Growth differences between

clones may become more evident as the trees approach maturity (Paquette *et al.* 2008). On the other hand, the lack of a treatment x clone interaction on hybrid poplar growth indicated that clones responded similarly to treatments. This response is consistent with results synthesized by Ceulemans and Deraedt (1999), who suggest that growth variation between clones is weakly controlled by cultural management regime. Differences in leaf nutrient concentrations among the clones in the present study also tended to be consistent between treatments (Table 5.4 and 5.6), and, therefore, can be expected to arise under a wide range of nutrient supply conditions. Our results showed, however, some intrinsic nutritional strategies among the clones. For example, at St-Rémi, NM3729 seems to have diluted N and P in leaves with higher unit dry mass and area, compared to DN3308. At St-Édouard, DN3333 tended ( $p = 0.09$ ) to use N more efficiently than DN3570. This result may indicate to some extent that DN3570 had a higher potential to remove nitrogen from the soil than DN3333 (Adegbidi *et al.* 2001). Consequently, we can hypothesize that DN3570 would be more effective than DN3333 in alleviating nitrate leaching to the groundwater through the safety-net role (Allen *et al.* 2004). Future studies in this area should address a more comprehensive inventory of nutrient removal and nutrient-use for hybrid poplar clones of varying origins that are commonly used in TBI systems.

## Conclusions

Tree growth was significantly improved in the intercropping treatment of both sites, possibly as a result of nutrients made readily available through the addition of fertilizers meant for the intercrops. Hybrid poplar clones responded similarly to the treatments. No consistent differences in tree growth were observed between clones, despite differences in their nutrient status, especially at St-Rémi where different genotypes were compared. Overall, the most growth-limiting nutrient was N, and there was evidence that hybrid poplars were positively affected by the increase in N supply provided by intercrop management. This result may have important practical implications for designing TBI systems that can maximize the use efficiency of N derived from fertilization, while concurrently minimizing nitrate pollution of surface and subsurface drainage waters. For

example, it could be profitable to associate hybrid poplars with intercrops such as maize, which requires high amounts of N fertilizer.

## Acknowledgements

This work was made possible by grants from Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT), Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC), and the Programme de mise en valeur des ressources du milieu forestier (ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (volet II)). The authors thank A. Paquette, B. Patarin, A. Brousseau and A.J. Lalanne, S. Daigle and W.F.J. Parsons for their contributions.

## References

- Adegbidi, H.G., Volk, T.A., White, E.H., Abrahamson, L.P., Briggs, R.D., Bickelhaupt, D.H. 2001. Biomass and nutrient removal by willow clones in experimental bioenergy plantations in New York State. *Biomass Bioenergy* 20: 399-411.
- Agriculture Canada Expert Committee on Soil Survey. 1987. The Canadian system of soil classification (CSSC), 2<sup>nd</sup> ed. Agriculture Canada, Ottawa, Ontario. Publication 1646: 1-164.
- Allen, S.C., Jose, S., Nair, P.K.R., Brecke, B.J., Nkedi-Kizza, P., Ramsey, C.L. 2004. Safety-net role of tree roots : evidence from a pecan (*Carya illinoensis* K. Koch) – cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States. *For. Ecol. Manage.* 192: 395-407.
- Ben Brahim, M., Gavaland, A., Cabanettes, A. 2000. Generalized allometric regression to estimate biomass of *Populus* in short-rotation coppice. *Scand. J. For. Res.* 15: 171-176.
- Burgess, P.J., Incoll, L.D., Corry, D.T., Beaton, A., Hart, B.J. 2004. Poplar (*Populus* spp) growth and crop yields in a silvoarable experiment at three lowland sites in England. *Agrofor. Syst.* 63: 157-169.
- Bungart, R., Huttli, R.F. 2004. Growth dynamics and biomass accumulation of 8-year-old hybrid poplar clones in a short rotation plantation on a clayey-sandy mining substrate with respect to plant nutrition and water budget. *Eur. J. For. Res.* 123: 105–115.
- Ceulemans, R., Deraedt, W. 1999. Production physiology and growth potential of poplars under short-rotation forestry culture. *For. Ecol. Manage.* 121: 9-23.

- Chiffot, V., Bertoni, G., Cabanettes, A., Gavaland, A. 2006. Beneficial effects of intercropping on the growth and nitrogen status of young wild cherry and hybrid walnut trees. *Agrofor. Syst.* 66: 13-21.
- Clarkson, D.T. 1985. Factors affecting mineral nutrient acquisition by plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 36: 77-115.
- Coleman, M.D., Dickson, R.E., Isebrands, J.G. 1998. Growth and physiology of aspen supplied with different fertilizer addition rates. *Physiologia Plantarum* 103: 513-526.
- Coleman, M.D., Tolsted, D., Nichols, T., Johnson, W.D., Wene, E.G., Houghtaling, T. 2006. Post-establishment fertilization of Minnesota hybrid poplar plantations. *Biomass Bioenergy* 30: 740-749.
- Coll, L., Messier, C., Delagrange, S., Berninger, F. 2007. Growth, allocation and leaf gas exchanges of hybrid poplar plants in their establishment phase on previously forested sites: effect of different vegetation management techniques. *Ann. For. Sci.* 64: 275-285.
- Cooke, J.E.K., Martin, T.A., Davis, J.M. 2005. Short-term physiological and developmental responses to nitrogen availability in hybrid poplar. *New Phytologist* 167: 41-52.
- CRAAQ. 2003. Guide de référence en fertilisation. Centre de Référence en Agriculture et en Agroalimentaire du Québec, Sainte-Foy, Québec, Canada. 294 pp.
- Dupraz, C., Simorte, V., Dauzat, M., Bertoni, G., Bernadac, A., Masson, P. 1999. Growth and nitrogen status of young walnuts as affected by intercropped legumes in a Mediterranean climate. *Agrofor. Syst.* 43: 71-80.
- Environment Canada. 2008. The National climate data and information archive. Canadian climate normals or averages 1971-2000. <http://climate.weatheroffice.ec.gc.ca>.
- Gordon, J.C. 2001. Poplars: trees of the people, trees of the future. *For. Chron.* 77: 217-219.
- Haase, D.L., Rose, R. 1995. Vector analysis and its use for interpreting plant nutrient shifts in response to silvicultural treatments. *For. Sci.* 41: 54-66.
- Ingestad, T. 1979. Nitrogen stress in birch seedlings. II. N, K, P, Ca, Mg nutrition. *Physiologia Plantarum* 45: 149-157.
- Jose, S., Gillespie, A.R., Seifert, J.R., Mengel, D.B., Pope, P.E. 2000. Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the midwestern USA. 3. Competition for nitrogen and litter decomposition dynamics. *Agrofor. Syst.* 48: 61-77.

- Jug, A., Hofmann-Schielle, C., Makeschin, F., Rehfuss, K.E. 1999. Short-rotation plantations of balsam poplars, aspen and willows on former arable land in the Federal Republic of Germany. II. Nutritional status and bioelement export by harvested shoot axes. *For. Ecol. Manage.* 121: 67–83.
- Kaur, B., Gupta, S.R., Singh, G. 2000. Soil carbon, microbial activity and nitrogen availability in agroforestry systems on moderately alkaline soils in northern India. *Appl. Soil Ecol.* 15: 283-294.
- Koerselman, W., Meuleman, A.F.M. 1996. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. *J. App. Ecol.* 33: 1441-1450.
- Kopinga, J., van den Burg, J. 1995. Using soil and foliar analysis to diagnose the nutritional status of urban trees. *J. Arboricult.* 21: 17–24.
- Kubiske, M.E., Pregitzer, K.S., Mikan, C.J., Zak, D.R., Maziasz, J.L., Teeri, J.A. 1997. *Populus tremuloides* photosynthesis and crown architecture in response to elevated CO<sub>2</sub> and soil N availability. *Oecologia* 110: 328-336.
- Lacombe, S. 2007. Diminution des pertes du nitrate par lixiviation et augmentation de la diversité microbienne dans les systèmes agroforestiers. M.Sc. thesis, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC.
- Lteif, A., Whalen, J.K., Bradley, R.L., Camiré, C. 2008. Diagnostic tools to evaluate the foliar nutrition and growth of hybrid poplars. *Can. J. For. Res.* 38: 2138-2147.
- Liberloo, M., Calfapietra, C., Lukac, M., Godbold, D., Luos, Z.B., Polle, A., Hoosbeek, M.R., Kull, O., Marek, M., Raines, C., Rubino, M., Taylor, G., Scarascia-Mugnozza, G., Ceulemans, R. 2006. Woody biomass production during the second rotation of a bio-energy *Populus* plantation increases in a future high CO<sub>2</sub> world. *Glob. Chang. Biol.* 12: 1094–1106.
- McLaughlin, R.A., Hansen, E.A., Pope, P.E. 1987. Biomass and nitrogen dynamics in an irrigated hybrid poplar plantation. *For. Ecol. Manage.* 18: 169-188.
- Palma, J.H.N., Graves, A.R., Bunce, R.G.H., Burgess, P.J., de Filippi, R., Keesman, K.J., van Keulen, H., Liagre, F., Mayus, M., Moreno, G., Reisner, Y., Herzog, F., 2007. Modeling environmental benefits of silvoarable agroforestry in Europe. *Agric. Ecosyst. Environ.* 119: 320-334.
- Paquette, A., Messier, C., Périnet P., Cogliastro, A., 2008. Simulating light availability under different hybrid poplar clones in a mixed intensive plantation system. *For. Sci.* 54: 481-489.
- Parkinson, J.A., Allen, S.E. 1975. A wet oxidation procedure suitable for the determination of nitrogen and mineral nutrients in biological material. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 6: 1-11.

- Rowe, E.C., Van Noordwijk, M., Suprayogo, D., Cadish, G. 1999. Nitrogen use efficiency of monocultures and hedgerow intercropping in the humid tropics. *Plant Soil* 268: 61-74.
- Schuler, J.L., Robinson, D.J. 2008. The effects of intensive management on the leaf characteristics and growth phenology of young yellow-poplar stems. *For. Ecol. Manage.* 255: 787-796.
- Stanturf, J.A., van Oostsen, C., Netzer, D.A., Coleman, M.D., Portwood, C.J. 2001. Ecology and silviculture of poplar plantations. In: Dickmann, D.I., Isebrands, J.G., Eckenwalder, J.E., Richardson, J. (eds.), *Poplar culture in North America*. NRC Research Press, Ottawa, Ontario, Canada. pp. 153-206.
- Thevathasan, N.V., Gordon, A.M. 2004. Ecology of tree intercropping systems in the North temperate region: experiences from southern Ontario, Canada. *Agrofor. Syst.* 61: 257-268.
- Thevathasan, N.V., Gordon, A.M., Simpson, J.A., Reynolds, P.E., Price, G.W., Zhang, P. 2004. Biophysical and ecological interactions in a temperate tree-based intercropping system. *J. Crop Improv.* 12: 339-363.
- van den Driessche, R. 1999. First-year growth response of four *Populus trichocarpa* x *Populus deltoides* clones to fertilizer placement and level. *Can. J. For. Res.* 29: 554-562.
- van den Driessche, R., Rude, W., Martens, L. 2003. Effect of fertilization and irrigation on growth of aspen (*Populus tremuloides* Michx.) seedlings over three seasons. *For. Ecol. Manage.* 186: 381-389.
- van den Driessche, R., Thomas, B.R., Kamelchuck, D.P. 2007. Effects of N, NP, and NPKS fertilizers applied to four-year old hybrid poplar plantations. *New For.* 35: 221-233.
- von Kiparski, G.R., Gillespie, A.R. 2008. Agroforestry management effects on plant productivity vectors within a humid-temperate hardwood alley-cropping system. In: Jose, S., Gordon, A.M. (eds.), *Toward agroforestry design: an ecological approach*. Springer, Dordrecht, Netherlands. pp. 149-173.
- Wang H., Huang, Y., Huang, H., Wang, K.M., Zhou, S.Y. 2005. Soil properties under Chinese fir-based agroforestry system in mid-subtropical China. *Agrofor. Syst.* 64: 131-141.

## Chapitre 6. Conclusion générale

### Sommaire des résultats

Cette recherche avait pour objectif général d'analyser les effets de systèmes de culture intercalaires (SCI) intégrant des peupliers hybrides (PH), des feuillus nobles et des plantes agricoles sur la disponibilité de la lumière, la qualité du sol, la croissance des PH et le rendement des cultures agricoles. Un premier site expérimental a été établi à même une plantation mixte déjà existante sur un terrain à potentiel agricole élevé. Nous y avons notamment étudié pendant deux ans le climat lumineux et la productivité d'une culture intercalaire de soya, en relation avec le type de clone de PH, l'orientation et la distance de la culture par rapport aux rangées d'arbres. La densité de plantation différait entre les deux années de l'étude. À la première année, une densité élevée de PH sur la rangée a été volontairement maintenue afin de mieux saisir l'importance relative des relations de compétition arbre-culture pour la lumière et les ressources souterraines. À la deuxième année, l'espacement des PH sur le rang a été augmenté de façon à représenter un contexte opérationnel davantage approprié à l'optimisation du rendement de la culture intercalaire et à la production de bois de grande qualité. Parallèlement, la qualité du sol, la croissance des clones de PH et leur statut nutritif ont été évalués dans le SCI et dans un système de plantation d'arbres sans culture intercalaire. Les effets de la culture intercalaire sur la croissance et la nutrition de différents clones de PH ont aussi été étudiés sur un deuxième site expérimental établi sur un terrain à potentiel agricole marginal.

Dans le chapitre 3 de cette thèse, nous avons observé un maximum de réduction du rendement du soya à l'interface PH-soya, en situation de forte densité d'arbres. Bien que le dispositif expérimental de l'étude ne permettait pas de distinguer formellement l'effet de la concurrence aérienne de celui de la concurrence souterraine, les résultats indiquent que la disponibilité de la lumière s'est avérée plus déterminante que celle de l'eau dans l'élaboration du rendement du soya. Cet énoncé est appuyé notamment par : 1) l'observation d'une réponse comparable de la proportion de lumière totale transmise, du rendement du soya et de ses composantes de rendement aux effets du clone de PH et de l'orientation par rapport à la rangée de PH, et 2) le fait que le nombre de gousses par m<sup>2</sup> a

contribué davantage à la variation du rendement que le poids de 100 grains, tel que cela a été observé dans d'autres études réalisées en conditions contrôlées d'ombrage. Une réduction significative de la minéralisation de l'azote du sol a aussi été observée à l'interface PH-soya, suggérant que la concurrence pour l'azote a pu être responsable, du moins en partie, de la réduction de rendement, bien que les besoins du soya en azote du sol soient relativement faibles. Ce résultat laisse entrevoir que la disponibilité de l'azote en SCI pourrait être davantage limitante pour la croissance de cultures plus exigeantes comme le maïs. À la deuxième année de l'étude, suite à l'élimination de deux tiers des PH, nous avons observé une plus grande uniformité des conditions environnementales, du rendement du soya et de ses composantes de rendement. Les résultats des deux années de l'étude suggèrent qu'un rendement optimal et régulier du soya dans les allées est envisageable en deçà d'un ombrage modéré de 25 à 30 %. Pour éviter de dépasser ce seuil critique, le producteur devrait : 1) favoriser, dès la plantation, de larges espacements des arbres sur les rangées et entre elles, 2) privilégier l'emploi de traitements sylvicoles comme l'élagage et l'éclaircie, d'autant plus que cela est souhaitable pour la production de bois de qualité, 3) opter pour un choix d'espèces d'arbres qui minimisent l'ombrage (e.g., forte porosité et faible largeur de cime), et 4) favoriser une orientation des rangées d'arbres qui se rapproche autant que possible de l'axe nord-sud.

Dans le chapitre 4 de cette thèse, nous avons confirmé l'hypothèse selon laquelle la culture intercalaire peut contribuer à améliorer la qualité des sols, comparativement aux plantations forestières, grâce à une augmentation de la biomasse microbienne et à l'activation de la minéralisation de l'azote, entraînant ainsi une amélioration de la croissance des arbres. En effet, à chacune des six dates échantillonnées au cours des deux années de l'étude, la disponibilité de l'azote et la biomasse microbienne dans le sol du SCI avec soya étaient supérieures ou similaires à celles observées dans la traitement de référence sans culture intercalaire. Qui plus est, les résultats du quotient métabolique ( $qCO_2$ ) indiquent que, dans le SCI, la biomasse microbienne a démontré une plus grande efficacité à utiliser le carbone disponible du sol pour assurer ses besoins énergétiques. L'augmentation de la qualité nutritionnelle du sol dans le SCI était aussi associée à un plus grand accroissement de biomasse aérienne des PH, lesquels ont été plus efficaces à utiliser l'azote minéralisé



dans le sol. Globalement, ces résultats appuient l'idée selon laquelle la culture intercalaire pourrait accroître l'efficacité de l'utilisation des ressources édaphiques, tout en participant à la conservation des sols. Nous avons par ailleurs observé que la qualité du sol à la base des PH était inférieure à celle dans l'allée, ce qui est contraire à ce qui a été observé dans d'autres études portant sur des SCI sans paillis. Nous émettons donc l'hypothèse que ce résultat est attribuable au paillis de plastique qui freine l'apport d'eau et de composés issus de la décomposition des litières d'arbres, ce qui perturbe le cycle biochimique des éléments minéraux sous les rangées d'arbres. Nous émettons aussi l'hypothèse que, en comparaison avec la répression chimique de la végétation dans la bande non-cultivée, le paillis crée des conditions environnementales qui favorisent davantage le développement des racines des arbres dans les allées cultivées. Un tel déploiement racinaire pourrait faciliter la récupération d'une partie des éléments fertilisants échappant à la culture par lixiviation, bien que cela puisse, en revanche, entraîner une certaine concurrence entre l'arbre et la culture pour l'eau et les éléments minéraux du sol. Il serait intéressant de valider ces hypothèses en SCI, mais aussi dans d'autres systèmes agroforestiers comme les haies brise-vent et les bandes riveraines, où l'usage du paillis est très répandu.

Les résultats du chapitre 5 de cette thèse ont démontré le grand potentiel de la culture intercalaire pour intensifier la production de bois de grande valeur en milieu agricole. En effet, tous les clones de PH dans le traitement de culture intercalaire présentaient une croissance supérieure à celle observée dans un traitement de hersage des allées, une technique communément utilisée dans la monoculture intensive de PH. Ces résultats sont cohérents entre les deux sites expérimentaux, ce qui suggère qu'une production accrue de bois en SCI peut être atteinte autant sur les terres fertiles dévolues aux grandes cultures que sur celles qui n'ont plus qu'une importance marginale pour l'agriculture québécoise. Par ailleurs, la nutrition des clones de PH, en particulier celle en azote, a été favorisée par la culture intercalaire. Ceci porte à croire que les résidus de fertilisants dévolus à la culture intercalaire, qui autrement auraient été exportés du système, ont été captés par les racines des arbres. Bien que cette étude ne se soit attardée qu'au suivi des PH, tout indique que la culture intercalaire constitue aussi une méthode efficace pour l'établissement de feuillus nobles en plantation. Cet énoncé peut être corroboré par le fait que tous les clones de PH

ont répondu positivement et de façon similaire à la culture intercalaire. Des recherches supplémentaires sont toutefois nécessaires pour préciser l'effet de la culture intercalaire sur les différents feuillus nobles communément plantés dans le sud du Québec.

Les principaux résultats issus des trois chapitres précédents permettent donc de développer le modèle conceptuel suivant. En l'absence de sécheresse prolongée, un rendement uniforme (i.e. d'une distance à l'autre à l'intérieur des allées cultivées et de part et d'autre de la rangée d'arbres) et optimal de la culture intercalaire peut être maintenu jusqu'à la septième année de l'association, du moins en ce qui concerne le soya, dans la mesure où la gestion du système permet de limiter l'interception de la lumière par les arbres sous un seuil critique d'ombrage de l'ordre de 25 à 30 %. L'exposition du soya à un ombrage au-delà d'un tel seuil augmente les risques d'abscission des fleurs et des gousses, entraînant une réduction du rendement du soya. En plus de générer des revenus annuels, la culture intercalaire, grâce à l'incorporation au sol de ses résidus de production, contribue à augmenter la biomasse microbienne et à activer la minéralisation de l'azote par la conversion rapide de l'azote ammoniacal en nitrates à travers le processus de nitrification autotrophe. La diversité des niches générée par le SCI accroît la diversité microbienne du sol comparativement aux monocultures agricole et forestière, comme l'ont suggéré deux études complémentaires à la présente thèse (Lacombe 2007; Chiffot 2008). L'augmentation de la diversité microbienne entraîne pour sa part une plus grande efficacité d'utilisation des substrats organiques, qui s'est reflétée dans la présente étude à travers la diminution du quotient métabolique microbien (i.e.  $qCO_2$ : SCI < plantation forestière). Parallèlement, les microbes du sol en SCI offrent une plus faible concurrence pour l'azote qu'ils exercent sur les arbres qui, en retour, font un usage plus efficace de l'azote minéralisé (i.e. *nitrogen response efficiency*: SCI > plantation forestière). Les arbres, notamment les PH à croissance rapide dont les besoins nutritifs sont élevés, profitent indirectement des apports de fertilisants dévolus à la culture intercalaire. Puisque le développement superficiel des racines des arbres dans les allées est limité par les travaux mécaniques du terrain (i.e. labour et hersage, 10-20 cm de profondeur), la récupération des résidus de fertilisation s'effectue principalement sous l'horizon superficiel du sol exploré par la culture qui, par conséquent, peut bénéficier pleinement de l'engrais qui lui est

apporté. Le paillis de polyéthylène, en forçant les racines des arbres à se développer dans les allées cultivées plus fertiles, augmente le potentiel des arbres à intercepter les éléments fertilisants échappant à la culture par lixiviation. Il est cependant à craindre, en particulier pour les cultures intercalaires dont l'enracinement est profond, que l'effet du paillis se traduise par l'accroissement de la concurrence des arbres pour l'eau et les éléments minéraux du sol. Néanmoins, il y a tout lieu de croire que le paillis conduit à rediriger les bénéfices du recyclage des litières provenant des arbres vers les allées cultivées. L'accès à un plus grand pool d'éléments minéraux, qui résulte du recyclage des résidus de la culture intercalaire et des soins qui lui sont apportés, se reflète dans les tissus foliaires des arbres par l'accroissement de la concentration de certains macronutriments, en particulier l'azote. Ce constat, combiné à celui d'une plus grande superficie foliaire, indique une augmentation du taux d'acquisition des nutriments et de la capacité photosynthétique des arbres en SCI, laquelle s'est exprimée ici par une amélioration de croissance en biomasse ligneuse aérienne chez différents clones de PH. En somme, les premiers stades de l'association arbre-culture offrent une grande efficacité au plan de l'utilisation des ressources biophysiques, accélèrent la croissance des arbres et maintiennent un rendement de la culture intercalaire comparable à celui obtenu en monoculture, dans le contexte où les effets négatifs de la concurrence des arbres pour la lumière sont bien maîtrisés, notamment par le biais de la densité de plantation et de l'éclaircie.

### **Limites de l'étude et pistes de recherches futures**

L'implantation, l'entretien et le suivi des sites expérimentaux a nécessité des investissements en argent et en ressources humaines substantiels. Cette contrainte, combinée à la superficie restreinte des sites et au fait qu'ils étaient implantés chez des propriétaires privés, ont limité l'inclusion de certains facteurs expérimentaux qui auraient sans doute permis de préciser les conclusions de cette étude. Nous retenons un certain nombre d'éléments qui pourraient être considérés lors de la planification de futurs dispositifs expérimentaux visant à saisir les interactions arbre-culture et à quantifier les effets des SCI sur les propriétés du sol et la productivité des plantes associées :

- Afin de comparer formellement différents systèmes de production, tout dispositif expérimental devrait intégrer, selon une répartition aléatoire et répétée : 1) une monoculture agricole témoin (i.e. sans arbres), et 2) une plantation d'arbres témoin (i.e. sans culture intercalaire) d'une densité représentative de celle utilisée communément dans un contexte opérationnel de plantation forestière;
- Afin de distinguer formellement les effets de la concurrence pour la lumière, pour l'eau et pour les éléments nutritifs, tout dispositif expérimental devrait inclure : 1) un traitement comportant une barrière souterraine à l'interface arbre-culture, 2) le même traitement, mais avec une fertilisation supplémentaire de la culture intercalaire, et 3) un témoin sans barrière ni fertilisation supplémentaire;
- Afin de distinguer formellement l'effet de la plante agricole associée de celui des fertilisants qui lui sont apportés, tout dispositif expérimental devrait inclure : 1) un SCI comprenant une fertilisation ajustée aux besoins de la culture intercalaire, 2) le même SCI, mais sans fertilisation de la culture intercalaire, 3) une plantation d'arbres témoin d'une densité équivalente à celle utilisée dans le SCI de référence avec le même apport de fertilisant que celui de la culture intercalaire, et 4) la même plantation d'arbres, mais sans fertilisation. Une démonstration directe de la captation de résidus azotés par les arbres pourrait aussi être obtenue grâce à l'utilisation d'un fertilisant enrichi en  $^{15}\text{N}$ .

Sur le site de St-Rémi, les semis du soya ont été réalisés, de façon générale, assez tardivement, comparativement à ce qu'on observe dans la pratique conventionnelle. Il est probable que ces semis tardifs aient contribué à réduire la durée du stade végétatif du soya et, par le fait même, à accélérer l'initiation de son stade reproductif, ce qui n'est pas sans conséquences sur le rendement final. Il n'est donc pas surprenant de constater que, en 2006 par exemple, le rendement du soya mesuré lors de l'expérimentation, même dans les meilleures conditions d'ensoleillement (i.e.  $\sim 1,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), se soit maintenu légèrement sous le rendement moyen auquel on pourrait s'attendre dans le contexte d'une régie conventionnelle, dans la région de la Montérégie (i.e.  $\sim 2,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). Néanmoins, il est peu plausible que la date de semis ait interagi avec les facteurs expérimentaux de l'étude comme le type de clone de PH ou l'orientation et la distance de la culture par rapport à la

rangée de PH. Les conclusions tirées dans cette thèse devraient donc être valides également pour des dates de semis plus hâtives.

Au cours de cette étude, des efforts importants ont été déployés pour la mise en place d'un troisième site expérimental situé à St-Paulin, en Mauricie. Malheureusement, malgré une implantation rigoureuse de blocs expérimentaux, une variabilité intra-blocs excessive des variables mesurées, causée par la forte hétérogénéité spatiale des propriétés du sol, nous a forcé à abandonner le suivi expérimental de ce site, bien qu'il ait conservé toute sa valeur de démonstration. L'expérimentation au champ des SCI nécessite généralement la tenue de dispositifs complexes, comportant des blocs expérimentaux de grande dimension. Ceci peut se traduire par des interactions néfastes entre le bloc et les traitements qui limitent l'inférence d'un point de vue statistique, comme cela a été observé sur le site de St-Rémi pour certaines variables comme l'humidité du sol (chapitre 3). Ces constats témoignent donc de l'importance, lors du choix d'un site expérimental potentiel, de favoriser des terrains présentant des conditions édaphiques relativement homogènes à l'intérieur d'une petite échelle spatiale.

Quelques espèces de plantes agricoles seulement ont été expérimentées dans cette étude. Le maïs, en particulier, mériterait plus d'attention, étant donnée son importance au plan économique, l'étendue des superficies plantées et la gravité des problèmes environnementaux qu'il génère en monoculture. Dans le contexte où l'azote constitue un facteur limitant pour la croissance des arbres, tel que nous l'avons observé chez le PH au chapitre 5, nous croyons que la culture du maïs, qui nécessite des apports importants en azote, pourrait être extrêmement favorable à cette croissance.

Les connaissances actuelles en ce qui concerne les effets des SCI sur le microclimat (e.g. vitesse du vent, température et humidité relative de l'air), la physiologie des plantes agricoles associées (e.g. potentiel hydrique et taux de photosynthèse) et leur bilan énergétique sont limitées. Bien que ces aspects aient été étudiés en profondeur dans divers systèmes de haies brise-vent, les enseignements acquis sur ces systèmes sont difficilement

transposables aux SCI, où de plus faibles écartements entre les rangées d'arbres sont préconisés.

Les résultats présentés dans cette étude sont issus de SCI relativement jeunes. Or, dans les SCI, les interactions arbre-culture se caractérisent non seulement par leur dynamique spatiale, comme nous l'avons observé dans cette thèse, mais aussi par leur dynamique temporelle. Les SCI s'inscrivent en effet dans un horizon de plusieurs décennies. Il importera ainsi dans le futur de poursuivre le suivi de ces interactions à des stades plus avancés, tout en développant et en testant des interventions prometteuses visant à maximiser, à long terme, une production soutenue et de qualité des plantes associées. Il serait par exemple intéressant de quantifier les effets du remplacement des cultures intercalaires annuelles par des cultures fourragères pérennes, plus tolérantes à l'ombre, sur la croissance des arbres et des cultures intercalaires, ainsi que sur la qualité des fourrages et du bois produits. Aussi, en tenant compte du contexte biophysique propre au sud du Québec, il serait particulièrement important d'estimer, avec des outils de modélisation, la valeur économique et l'efficacité biologique (i.e. coefficient de rendement équivalent) d'un cycle complet de divers scénarios possibles de SCI comparativement aux monocultures agricoles et forestières. Les résultats présentés dans cette thèse procurent de l'information utile et constituent un bon point de départ pour atteindre cet objectif.

## **Quelques considérations sociales et politiques**

L'adoption à grande échelle des SCI par les exploitants agricoles et forestiers du Québec est loin d'être acquise. Les connaissances actuelles sur ces systèmes doivent être diffusées et aboutir sur la formation de praticiens spécialisés qui pourront appuyer les producteurs dans leur choix, notamment en ce qui concerne les itinéraires techniques avantageux pour eux. Cela pourrait être facilité par l'élaboration de documents de vulgarisation et d'outils d'analyse de projets. L'adoption d'une nouvelle technologie comme la culture intercalaire repose aussi en bonne partie sur des facteurs politiques et institutionnels. Or, il existe actuellement un manque important de souplesse au sein de la plupart des programmes d'incitatifs financiers, lesquels s'adressent soit à des producteurs agricoles, soit à des

producteurs forestiers (Marchand et Masse 2007). D'ailleurs, la Commission sur l'avenir de l'agriculture et de l'agroalimentaire québécois (2008) soulignait dans son rapport que : « Parmi les biens environnementaux qui devraient être promus et soutenus par des mesures adéquates de financement, notons l'aménagement de haies brise-vent, [...], le reboisement de certaines parties sensibles du territoire, [...], la réduction des engrais minéraux au-delà des normes environnementales, [...], et les mesures d'entretien et de valorisation du paysage. ». Une action concertée entre les décideurs des divers ministères fédéraux et provinciaux gérant l'agriculture, la forêt et l'environnement apparaît incontournable dans l'atteinte d'un cadre réglementaire unique aux SCI. En France, par exemple, grâce à l'assouplissement des réglementations agricoles et forestières, ainsi qu'à la création d'un article de loi favorable à la création de systèmes agroforestiers sur les terres agricoles, plus de 2000 ha de nouvelles parcelles de culture intercalaire ont été mises en place par les producteurs au cours des dernières années (Liagre 2008). Cet intérêt grandissant pour l'agroforesterie en France est aussi attribuable à la capitalisation des expériences de recherche et développement à l'échelle nationale. Au Canada, en dépit des nombreuses initiatives locales visant à promouvoir l'adoption de techniques agroforestières, force est de constater qu'il existe encore un manque important de cohésion entre les divers acteurs du développement et ceux de la recherche. La mise en place d'une structure nationale officielle, à l'intérieur de laquelle pourrait s'articuler l'échange d'informations, offrirait sans doute une excellente opportunité de faire le pont entre la recherche et le développement. Enfin, nous croyons qu'une attention particulière devrait être portée, dans un avenir rapproché, au rôle que pourraient jouer les crédits de carbone dans la promotion des SCI auprès des exploitants agricoles et forestiers.

## Références

- Chiffлот, V. 2008. Étude moléculaire des champignons mycorhiziens arbusculaires dans un système agrisylvicole. M.Sc., Université Laval, Québec, QC.
- Commission sur l'avenir de l'agriculture et de l'agroalimentaire québécois. 2008. Agriculture et agroalimentaire québécois, assurer et bâtir l'avenir : rapport. [www.caaaq.gouv.qc.ca/documentation/rapportfinal.fr.html](http://www.caaaq.gouv.qc.ca/documentation/rapportfinal.fr.html).

- Lacombe, S. 2007. Diminution des pertes du nitrate par lixiviation et augmentation de la diversité microbienne dans les systèmes agroforestiers. M.Sc., Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC.
- Liagre, F. 2008. L'agroforesterie en France. *Agroforesteries* 1: 7-10.
- Marchand, P.P., Masse, S. 2007. Short-rotation afforestation and agroforestry on Quebec private land: review of laws, regulations, policies, and programs. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Laurentian Forestry Centre. Information report LAU-X-130E.