Cultures intercalaires avec arbres feuillus : quel potentiel pour le Québec ?

par David Rivest¹ et Alain Olivier^{1,2}

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.

Mots clés : bénéfices environnementaux, bois de qualité, compétition pour les ressources, croissance des arbres, écozone des plaines à forêts mixtes, itinéraire technique, plantation de feuillus, productivité des cultures, rentabilité, systèmes de cultures intercalaires

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 stimulating 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 mixedwood 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 mixedwood plain ecozone in Quebec.

Key words: environmental benefits, high-value wood, resource competition, tree growth, mixedwood plain ecozone, technical itinerary, hardwood plantation, crop productivity, profitability, intercropping systems

David Rivest

Alain Olivier

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 2006, il ne s'est en effet planté que 209 ha de feuillus en moyenne annuellement sur les terres privées du Québec (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune 2007). Or, l'industrie québécoise du sciage et du déroulage fait face à un important déficit de bois de feuillus. Ainsi, en 2003,

¹Département de phytologie, Université Laval, Québec (Qc), G1K 7P4.

²Auteur-correspondant. Courriel : Alain.Olivier@plg.ulaval.ca

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 tout 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*) (Lelle et Gold 1994), à l'amandier (*Prunus amygdalus*), à l'arganier (*Argania* spp.), au châtaignier (*Castanea sativa*) et aux chênes fruitiers fourragers (*Quercus* spp.) (Dupraz et Newman 1997). En Chine, dès le 13^e 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*), 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*) 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 deux et 15 ans (Dupraz *et al.* 1994a ; 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*) (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* × *Juglans regia*) et le noyer noir (*Juglans nigra*), ont été associées à des cultures annuelles comme le blé dur (*Triticum durum*) et le colza (*Brassica napus*) (INRA et CRPF 2000), ou à des cultures fourragères pérennes comme la luzerne (*Medicago sativa*), le sainfoin (*Onobrychis sativa*) et la fétuque élevée (*Festuca arundinacea*) (Dupraz *et al.* 1999b). Le suivi de

plusieurs autres sites français, où l'on a associé notamment le merisier (*Prunus avium*) à des cultures pérennes (Balandier et Dupraz 1999) ou annuelles (Chiffhot 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* hybr.) 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, blé, soya, avoine (*Avena sativa*), orge 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*) (Gillespie et al. 2000), le peuplier hybride (Thevathasan et Gordon 2004), le frêne d'Amérique (*Fraxinus americana*) (Williams et Gordon 1992) et l'érable argenté (*Acer saccharinum*) (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 permet 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*), 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*). Chiffhot 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*) 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 (deux passages annuels de la herse à disque), et cela dès la première année d'application des traitements dans un site établi cinq 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, en effet, 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*), de pois (*Pisum sativum*) et de moutarde (*Brassica alba*) 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*) et la luzerne ou le calamagrostis du Canada (*Calamagrostis canadensis*), 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, cependant, 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* × *Populus nigra*), 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 implanté 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 cœur 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* 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* × *Populus 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 du sol.

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* et le *Desmodium paniculatum*, 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) 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 et 11 ans (7 m de hauteur) 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 du taux brut de 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, Brandt *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 CO₂ 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* × *Populus 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*) 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 (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 bicolore (*Quercus bicolor*), dont le système racinaire est superficiel, récupérerait plus efficacement les nutriments lessivés provenant du ruissellement hypodermique que le chêne à gros fruits (*Quercus macrocarpa*) ou le chêne des marais (*Quercus palustris*). 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 soja 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, Klaa *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 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 soja, 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* × *Populus nigra*, AAM de 14 m³/ha, 188 arbres/ha) et 10 169 £ (*Populus deltoides* × *Populus trichocarpa*, AAM de 22 m³/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 seraient réduits de 20 % par rapport à ceux utilisés dans le scénario de base, la VAN du SCI avec le *Populus deltoides* × *Populus trichocarpa* (8 806 £) s'avérerait 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 (maïs les huit 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 son adaptation à un large éventail de conditions édaphiques, 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 main-

tenue 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 sept 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 × 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* × *Populus 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 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*) 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*), 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'élague 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'adianté pédalée (*Adiantum pedatum*), la matteuccie fougère-à-l'autruche (*Matteuccia struthiopteris*) et l'asaret du Canada (*Asarum canadense*), 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.

Références

- Akbulut, S., A. Keten et W.T. Stamps. 2003. Effect of alley cropping and arthropod diversity in Duzce, Turkey. *J. Agr. Crop Sci.* 189 : 261–269.
- Allen, S.C., S. Jose, P.K.R. Nair, B.J. Brecke et C.L. Ramsey. 2004a. Competition for ¹⁵N-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., S. Jose, P.K.R. Nair, B.J. Brecke, P. Nkedi-Kizza et C.L. Ramsey. 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. et C. Dupraz. 1999. Growth of widely spaced trees. A case study from young agroforestry plantations in France. *Agrofor. Syst.* 43 : 151–167.
- Baldy, C., C. Dupraz et S. Schilizzi. 1993. Vers de nouvelles agroforesteries en climats tempérés et méditerranéens. I. Aspects agronomiques. *Cahiers Agricoles*. 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. [Internet]. Voir site www.bape.gouv.qc.ca/sections/archives/eau/index.htm
- Benjamin, T.J., W.L. Hoover, J.R. Seifert et A.R. Gillespie. 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., L. Hodges et X. Zhou. 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, P.J., L.D. Incoll, D.T. Corry, A. Beaton et B.J. Hart. 2004. Poplar (*Populus* spp) growth and crop yields in a silvoarable experiment at three lowland sites in England. *Agrofor. Syst.* 63 : 157–169.
- Burgess, S.S.O., M.A. Adams, N.C. Turner et C.K. Ong. 1998. The redistribution of soil water by tree roots systems. *Oecologia* 115 : 306–311.
- Burken, J.G. et J.L. Schoor. 1997. Uptake and metabolism of atrazine by poplar trees. *Environmental Science Technology*. 31 : 1399–1406.
- Cabanettes, A., D. Auclair et W. Imam. 1999. Diameter and height growth curves for widely-spaced trees in European agroforestry. *Agrofor. Syst.* 43 : 169–182.
- Campbell, G.E., G.J. Lottes et J.O. Dawson. 1991. Design and development of agroforestry systems for Illinois, USA: silvicultural and economic considerations. *Agrofor. Syst.* 13 : 203–224.
- Chiffot, V., G. Bertoni, A. Cabanettes et A. Gavaland. 2006. Beneficial effects of intercropping on the growth and nitrogen status of young wild cherry and hybrid walnut trees. *Agrofor. Syst.* 66 : 13–21.
- Chirko, C.P., M.A. Gold, P.V. Nguyen et J.P. Jiang. 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., M.A. Gold, P.V. Nguyen et J.P. Jiang. 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., K. Benjamin et A. Paquette. 2001. Nouvelles avenues vers une production de bois feuillus de qualité en plantation. *Dans* A. Cogliastro et A. Hallé (eds.). Actes du colloque : Dynamiser la sylviculture des feuillus. 24 novembre 2000, Montréal, QC. pp. 39–49. La société des amis de la maison de l'arbre, Montréal.
- Cogliastro, A., K. Benjamin et A. Bouchard. 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 Forests* 32 : 197–210.
- Cogliastro, A., D. Gagnon et A. Bouchard. 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., D. Gagnon, S. Daigle et A. Bouchard. 2003. Improving hardwood afforestation success: an analysis of the effects of soil properties in southwestern Quebec. *For. Ecol. Manage.* 177 : 347–359.
- 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. [Internet]. Voir site www.commission-foret.qc.ca/rapportfinal.htm.
- Cutter, B.E. et H.E. Garrett. 1993. Wood quality in alleycropped eastern black walnut. *Agrofor. Syst.* 22 : 25–32.
- Dix, M.E., R.J. Johnson, M.O. Harrell, R.M. Case, R.J. Wright, L. Hodges, J.R. Brandle, M.M. Schoeneberger, N.J. Sunderman, R.L. Fitzmaurice, L.J. Young et K.G. Hubbard. 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.
- 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 écophysologique de l'association noyer – blé dur. *Dans* Programme intégré de recherches en agroforesterie à Restinclières (PIRAT): rapport d'étude 2000, Montpellier. pp. 2–18. INRA, Montpellier, France.
- Dupraz, C., P.J. Burgess, A. Gavaland, A.R. Graves, F. Herzog, L.D. Incoll, N. Jackson, K. Keesman, G. Lawson, I. Lecomte, F. Liagre, K. Mantzanas, M. Mayus, G. Moreno, J. Palma, V. Papanastasis, P. Paris, D. Pilbeam, Y. Reisner, M. van Noordwijk, G. Vincent et W. van der Werf. 2005. Synthesis of the SAFE (Silvoarable Agroforestry for Europe) project. INRA-UMR System Editions, Montpellier. 254 p. Voir site www.montpellier.inra.fr/safe/french/index.htm
- Dupraz, C., C. Fournier, Y. Balvay, M. Dauzat, S. Pesteur et V. Simorte. 1999a. Influence de quatre années de culture intercalaire de blé et de colza sur la croissance de noyers hybrides en agroforesterie. *Dans* Actes du colloque de Clermont-Ferrand : Bois et forêts des agriculteurs. pp. 95–114. CEMAGREF, Antony, France.
- Dupraz, C. et S.M. Newman. 1997. Temperate agroforestry : the european way. *Dans* A.M. Gordon et S.M. Newman (eds.). Temperate agroforestry systems. pp. 181–236. CAB International, Wallingford, UK.
- Dupraz, C., V. Simorte, M. Dauzat, G. Bertoni, A. Bernadac et P. Masson. 1999b. Growth and nitrogen status of young walnuts as affected by intercropped legumes in a Mediterranean climate. *Agrofor. Syst.* 43 : 71–80.
- Dyack, B., K. Rollins et A.M. Gordon. 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., P. Paris, F. Herzog, L.D. Incoll, F. Liagre, K. Mantzanas, M. Mayus, G. Moreno, V.P. Papanastasis, D.J. Pilbeam, A. Pisanelli et C. Dupraz. 2006. Silvoarable systems in Europe – past, present and future prospects. *Agrofor. Syst.* 67 : 29–50.
- Environnement Canada. 2006. Les écozones du Canada. [Internet]. Voir site www.ccea.org/ecozones/fr/index.html.
- Frochot, H., J.F. Picard et P. Dreyfus. 1986. La végétation herbacée, obstacle aux plantations. *Rev. For. Fr.* 37 : 271–279.
- Gakis, S., K. Mantzanas, D. Alifragis, V.P. Papanastasis, A. Papaioannou, D. Seilopoulos et P. Platis. 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. et L.E. Buck. 1997. Agroforestry practice and policy in the United States of America. *For. Ecol. Manage.* 91 : 5–15.
- Garrett, H.E. et L.S. Harper. 1998. The science and practice of black walnut agroforestry in Missouri, USA: a temperate zone assessment. *Dans* L.E. Buck, J.P. Lassoie et E.C.M. Fernandes (eds.). Agroforestry in sustainable agricultural systems. pp. 97–110. CRC Press, New York, NY.
- Garrett, H.E., J.E. Jones, W.B. Kurtz et J.P. Slusher. 1991. Black Walnut (*Juglans nigra* L.) agroforestry – its design and potential as a land-use alternative. *For. Chron.* 67 : 213–218.
- Garrett, H.E. et W.B. Kurtz. 1983. Silvicultural and economic relationships of integrated forestry farming with black walnut. *Agrofor. Syst.* 1 : 245–256.
- Garrett, H.E. et R.L. McGraw. 2000. Alley cropping practices. *Dans* H.E. Garrett, W.J. Rietveld et R.F. Fisher (eds.). North American agroforestry: an integrated science and practice. pp. 149–188. American Society of Agronomy Inc., Madison, WI.
- Gillespie, A.R., S. Jose, D.B. Mengel, W.L. Hoover, P.E. Pope, J.R. Seifert, D.J. Biehle, T. Stall et T.J. Benjamin. 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. et S.M. Newman. 1997. Temperate agroforestry systems. CAB International, Wallingford, UK. 267 p.
- Graves, A.R., P.J. Burgess, F. Liagre, J.-P. Terreaux et C. Dupraz. 2005. Development and use of a framework for characterising computer models of silvoarable economics. *Agrofor. Syst.* 65 : 53–65.
- Hou, Q., J. Brandle, K. Hubbard, M. Schoeneberger, C. Nieto et C. Francis. 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. et R. Courraud. 2002. Élagage et taille de formation des arbres forestiers. 3^e édition. Institut pour le développement forestier, Paris, France. 282 p.
- INRA et CRPE. 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 p.
- Janin, G., J.M. Leban, F. Ducci, B. Charrier et J. Mosedale. 1997. L'utilisation en agroforesterie des résineux et des feuillus. Les conséquences sur la qualité du bois produit. *Dans* Comptes rendus de l'atelier international : L'agroforesterie pour un développement rural durable. 23 au 29 juin 1997, Montpellier, France. pp. 303–305. CIRAD – Forêts, Montpellier, France.
- Jose, S. et A.R. Gillespie. 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., A.R. Gillespie et S.G. Pallardy. 2004. Interspecific interactions in temperate agroforestry. *Agrofor. Syst.* 61 : 237–255.
- Jose, S., A.R. Gillespie et J.R. Seifert. 1995. The microenvironmental and physiological basis for temporal reductions in crop production in an Indiana alley cropping system. Dans J.H. Ehrenreich, D.L. Ehrenreich, et H.W. Lee (eds.). *Proceedings of the 4th North American Agroforestry Conference : Growing a sustainable future.* 23 au 29 juillet 1995, Boise, ID. pp. 54–55. University of Idaho, Moscow, ID.
- Jose, S., A.R. Gillespie, J.R. Seifert et D.J. Biehle. 2000a. Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the mid-western USA. 2. Competition for water. *Agrofor. Syst.* 48 : 41–59.
- Jose, S., A.R. Gillespie, J.R. Seifert, D.B. Mengel et P.E. Pope. 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.
- Klaa, K., P.J. Mill et L.D. Incoll. 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. et R. Turnock. 1999. Carbon reservoir and biomass in Canadian prairie shelterbelts. *Agrofor. Syst.* 44 : 175–186.
- Kurtz, W.B. 2000. Economics and policy of agroforestry. Dans H.E. Garrett, W.J. Rietveld et R.F. Fisher (eds.). *North American agroforestry: an integrated science and practice.* pp. 321–360. American Society of Agronomy Inc., Madison, WI.
- Kurtz, W.B., S.E. Thurman, M.J. Manson et H.E. Garrett. 1991. The use of agroforestry to control erosion: Financial aspects. *For. Chron.* 67 : 254–257.
- Lee, K.H. et S. Jose. 2003. Soil respiration and microbial biomass in a pecan – cotton alley cropping system in southern USA. *Agrofor. Syst.* 58 : 45–54.
- Lelle, M.A. et M.A. Gold. 1994. Agroforestry systems for temperate climates: lessons from Roman Italy. *Forest Conserv. Hist.* 38 : 118–126.
- Lin, C.H., R.L. McGraw, M.F. George et H.E. Garrett. 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., C. Dupraz, E. Delannoy et F. Liagre. 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 and Bioenergy* 28 : 249–266.
- Miller, A.W. et S.G. Pallardy. 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. 2007. Ressources et industries forestières. Portrait statistique édition 2007. Direction du développement de l'industrie des produits forestiers, Chapitre 5.6 Reboisement. www.mrnfp.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-statistiques.jsp.
- Montagnini, F. et P.K.R. Nair. 2004. Carbon sequestration : An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agrofor. Syst.* 61 : 281–295.
- Mulia, R. et C. Dupraz. 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., P.P. Motavalli, R.J. Kremer et K.A. Nelson. 2005. Spatial variation of enzyme activities and microbial functional diversity in temperate alley cropping systems. *Biol. Fertil. Soils* 42 : 129–136.
- Newman, S.M. et A.M. Gordon. 1997. Temperate agroforestry: synthesis and future directions. Dans A.M. Gordon et S.M. Newman (eds.). *Temperate agroforestry systems.* pp. 251–266. CAB International, Wallingford, UK.
- Oelbermann, M., R.P. Voroney et A.M. Gordon. 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., J.E. Corlett, R.P. Singh et C.R. Black. 1991. Above and below ground interactions in agroforestry systems. *For. Ecol. Manage.* 45 : 45–57.
- Ong, C.K., J.D. Deans, J. Wilson, J. Mutua, A.A.H. Khan et E.M. Lawson. 1999. Exploring belowground complementarity in agroforestry using sap flow and root fractal techniques. *Agrofor. Syst.* 44 : 87–103.
- Ong, C.K. et P.A. Huxley. 1996. Tree-crop interactions: a physiological approach. CAB International, Wallingford, UK. 386 p.
- Pan, D., G. Domon, S. de Blois et A. Bouchard. 1999. Temporal (1958–1993) and spatial patterns of land use changes in Haut-Saint-Laurent (Quebec, Canada) and their relation to landscape physical attributes. *Lands. Ecol.* 14 : 35–52.
- Pandey, D.N. 2002. Carbon sequestration in agroforestry systems. *Climate Policy* 2 : 367–377.
- Paquette, A., A. Bouchard et A. Cogliastro. 2006. Successful underplanting of red oak and black cherry in early-successional deciduous shelterwoods of North America. *Ann. For. Sc.* 63 : 823–831.
- Paris, P., F. Cannata et G. Olimpieri. 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., G. Olimpieri, L. Todaro, A. Pisanelli et F. Cannata. 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., A. Pisanelli, L. Todaro, G. Olimpieri et F. Cannata. 2005. Growth and water relations of walnut trees (*Juglans regia* L.) on a mesic site in central Italy : effects of understorey herbs and polyethylene mulching. *Agrofor. Syst.* 65 : 113–121.
- Park, J., S.M. Newman et S.H. Cousins. 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., P.J. Polglase, J.G. Nyakuengama et P.K. Khanna. 2002. Change in soil carbon following afforestation. *For. Eco. Manage.* 168 : 241–257.
- Peich, M., N.V. Thevathasan, A.M. Gordon, J. Huss et R.A. Abohassan. 2006. Carbon sequestration potentials in temperate tree-based intercropping systems, southern Ontario, Canada. *Agrofor. Syst.* 66 : 243–257.
- Peng, R.K., L.D. Incoll, S.L. Sutton, C. Wright et A. Chadwick. 1993. Diversity of airborne arthropods in a silvoarable agroforestry system. *J. Appl. Ecol.* 30 : 551–562.
- Powell, G.W. et E.W. Bork. 2004. Competition and facilitation in mixtures of aspen seedlings, alfalfa, and marsh reedgrass. *Can. J. For. Res.* 34 : 1858–1869.
- Price, G.W. et A.M. Gordon. 1999. Spatial and temporal distribution of earthworms in a temperate intercropping system in southern Ontario, Canada. *Agrofor. Syst.* 44 : 141–149.
- Rasmussen, S.D. et C.A. Shapiro. 1990. Effect of tree root-pruning adjacent to windbreaks on corn and soybeans. *J. Soil Water Conservation* 45 : 571–575.
- Reich, P.B., D.F. Grigal, J.D. Aber et S.T. Gower. 1997. Nitrogen mineralization and productivity in 50 hardwood and conifer stands on diverse soils. *Ecology* 78 : 335–347.
- Reynolds, P.E., J.A. Simpson, N.V. Thevathasan et A.M. Gordon. 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.
- Rivest, D., A. Cogliastro et A. Olivier. 2005. Tree growth and crop productivity in a hybrid poplar – hardwood – soybean intercropping system in southwestern Quebec, Canada. Dans K.N. Brooks et P.F. Ffolliott (eds.). Proceedings of the 9th North American Agroforestry Conference : Moving agroforestry into the mainstream. June 12–15, 2005, Rochester, MN. Dept. of Forest Resources, University of Minnesota, St. Paul, MN.
- Robitaille, D. 1999. Analyse comparative coûts/bénéfices. Dans Étude de sensibilité, programme de revalorisation des friches dans les rangs agricoles déstructurés du territoire de la MRC de Papineau. pp. 8–23. Service de la planification et de l'aménagement du territoire de la MRC de Papineau, MRC de Papineau, QC.
- Sanchez, P.A. 1995. Science in agroforestry. *Agrofor. Syst.* 30 : 5–55.
- Schultz, R.C., T.M. Isenhardt, W.W. Simpkins et J.P. Colletti. 2004. Riparian forest buffers in agroecosystems – lessons learned from the Bear Creek Watershed, central Iowa, USA. *Agrofor. Syst.* 61 : 35–50.
- Seiter, S., E.R. Ingham et R.D. William. 1999. Dynamics of soil fungal and bacterial biomass in a temperate climate alley cropping system. *Appl. Soil Ecol.* 12 : 139–147.
- Singh, H.P., R.K. Kohli et D.R. Batish. 2001. Allelopathic interference of *Populus deltoides* with some winter season crops. *Agronomie* 21 : 139–146.
- Stamps, W.T. et M.S. Linit. 1998. Plant diversity and arthropod communities: Implications for temperate agroforestry. *Agrofor. Syst.* 39 : 73–89.
- Stamps, W.T. et M.S. Linit. 1999. The problem of experimental design in temperate agroforestry. *Agrofor. Syst.* 44 : 187–196.
- Stamps, W.T., T.W. Woods, M.S. Linit et H.E. Garrett. 2002. Arthropod diversity in alley cropped black walnut (*Juglans nigra* L.) stands in eastern Missouri, USA. *Agrofor. Syst.* 56 : 167–175.
- Thevathasan, N.V. et A.M. Gordon. 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. et A.M. Gordon. 2004. Ecology of tree intercropping systems in the North temperate region: Experiences from southern Ontario, Canada. *Agrofor. Syst.* 61 : 257–268.
- Truax, B. et D. Gagnon. 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., D. Gagnon et N. Chevrier. 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., P. Nygren et H.E. Garrett. 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., G. Lawson, A. Soumaré, J.J.R. Groot et K. Hairiah. 1996. Root distribution of trees and crops: competition and/or complementarity. Dans C.K. Ong et P. Huxley (eds.). Tree-crop interactions: a physiological approach. pp. 319–364. CAB International, Wallingford, UK.
- Van Sambeek, J.W., F. Jr. Ponder et W.J. Rietveld. 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. et J.F. Shogren. 1992. Characteristics of the crop-paulownia system in China. *Agric. Ecosyst. Environ.* 39 : 145–152.
- Williams, P.A. et A.M. Gordon. 1992. The potential of intercropping as an alternative land use system in temperate North America. *Agrofor. Syst.* 19 : 253–263.
- Williams, P.A. et A.M. Gordon. 1994. Microclimate and soil moisture effects of tree rows of an intercropped plantation. Dans de R.C. Schultz et J.P. Colletti (eds.). Proceedings of the 3th North American Agroforestry Conference : Opportunities for Agroforestry in the Temperate Zone Worldwide. 15 au 18 août 1993, Ames, IA. pp. 127–135. Iowa State University, Ames.
- Williams, P.A. et A.M. Gordon. 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., H. Koblents et A.M. Gordon. 1995. Bird use of an intercropped, corn and old field in southern Ontario, Canada. Dans J.H. Ehrenreich, D.L. Ehrenreich, et H.W. Lee (eds.). Proceedings of the 4th North American Agroforestry Conference : Growing a sustainable future. 23 au 29 juillet 1995, Boise, ID. pp. 158–162. University of Idaho, Moscow, ID.
- Williams, P.A., A.M. Gordon, H.E. Garrett et L. Buck. 1997. Agroforestry in North America and its role in farming systems. Dans A.M. Gordon et S.M. Newman (eds.). Temperate agroforestry systems. pp. 9–84. CAB International, Wallingford, UK.
- Williams, R.D. 1990. *Juglans nigra* (L.). Black walnut. Dans *Silvics of North America* : 2. Hardwoods. Agriculture Handbook 654. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC.
- Willis, R.W., T.H. Thomas et J. van Slycken. 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. et O. Cacho. 2005. Tree-crop interactions and their environmental and economic implications in the presence of carbon-sequestration payments. *Environmental Modelling and Software* 20 : 1139–1148.
- Wojewoda, D. et S. Russel. 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. et Z.H. Zhu. 1997. Temperate agroforestry in China. Dans A.M. Gordon et S.M. Newman (eds.). Temperate agroforestry systems. pp. 149–179. CAB International, Wallingford, UK.
- Zhu, Z. 1991. Evaluation and model optimisation of Paulownia intercropping system: a project summary report. Dans Z. Zhu, M. Cai, S. Wang et Y. Jiang (eds.). Agroforestry Systems in China. pp. 30–43. The Chinese Academy of Forestry, People's Republic of China et International Development Research Centre (Canada), Beijing, China.