

LOUIS-MATHIEU GAGNON

# **Performance des fourrages en système de culture intercalaire au Québec**

Essai présenté  
dans le cadre du programme de maîtrise en agroforesterie pour l'obtention du  
grade de maître ès sciences (M.Sc.)

FACULTÉ DE FORESTERIE, DE GÉOGRAPHIE ET DE GÉOMATIQUE  
UNIVERSITÉ LAVAL

2015

# Table des matières

Remerciements.....	- 2 -
Introduction.....	- 3 -
Chapitre 1: Fonctionnement et gestion des systèmes agrosylvicoles .....	- 6 -
Le système de culture intercalaire .....	- 6 -
Le système sylvopastoral .....	- 14 -
L'itinéraire technique agroforestier .....	- 16 -
Protection contre les herbivores.....	- 25 -
Contrôle de la compétition .....	- 31 -
Espèces arborées.....	- 33 -
Espèces herbacées .....	- 41 -
Chapitre 2 : Effets des arbres sur le rendement et la qualité des cultures fourragères dans un système de culture intercalaire intégrant des feuillus nobles et des peupliers hybrides .....	- 47 -
Résumé.....	- 47 -
Introduction .....	- 48 -
Matériel et méthodes .....	- 52 -
Résultats et discussion .....	- 54 -
Conclusion générale .....	- 66 -
Bibliographie.....	- 67 -

## Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu le directeur de mes travaux de maîtrise, David Rivest. Son aide a été indispensable à la réussite de ce projet et il a su m'orienter tout au long du cheminement vers la rédaction de cet essai. Il a été un guide d'une qualité exceptionnelle tout au long de ce parcours académique.

Je tiens également à remercier chaleureusement Alain Cogliastro de l'Institut de recherche en biologie végétale pour sa précieuse aide dans la collecte des données. Un merci tout spécial à Léa Bouttier pour m'avoir aidé dans la collecte des données et pour avoir partagé avec moi une partie de ses propres données.

Je veux aussi adresser un grand merci à Alain Olivier et Damase Khasa pour leur support tout au long de mon cheminement.

## Introduction

Au fil des années et des siècles, l'évolution des pratiques agricoles a mené à des gains sans cesse grandissants de rendements des terres. Cette amélioration soutenue est en effet une caractéristique dominante de l'agriculture des pays développés au cours des trois derniers siècles (Bairoch 1989). Malgré ce point indéniablement positif, les régions agricoles du Québec se voient aujourd'hui confrontées à des défis dépassant largement le cadre de la simple production de denrées alimentaires. Dans les régions où l'agriculture est plus intensive, les agriculteurs et leurs communautés sont aux prises avec des problèmes environnementaux et technico-économiques. Quelques-uns de ces problèmes sévères incluent la baisse du taux de matière organique des sols, l'érosion des sols, le fractionnement des habitats et la réduction de la biodiversité, autant à l'échelle de l'agroécosystème que du paysage (Latendresse et al. 2008). Les effets négatifs de l'agriculture intensive au Québec sont souvent exportés dans les milieux urbains et périurbains par le biais de l'eutrophisation des cours d'eau. Ce phénomène est généralisé dans les régions agricoles du Québec et l'intensité de l'eutrophisation d'un cours d'eau est fortement reliée à l'intensité de l'agriculture dans son bassin versant (Daniel et al. 1998). Dans les zones moins intensivement exploitées pour leur potentiel de production agricole, fréquentes dans les régions nordiques ou éloignées des grands centres urbains, des problèmes sociaux menacent la durabilité de l'agriculture et par le fait même la vitalité des communautés qui en dépendent. En effet, le manque de relève agricole, l'abandon des terres et le manque de diversité de l'économie frappent plusieurs de ces régions.

Le présent essai de maîtrise est fondé sur l'hypothèse centrale que les systèmes de culture intercalaire et sylvopastoraux ont le potentiel d'apporter une partie de la solution à une grande partie des défis associés à l'agriculture moderne. Ils représentent une approche alternative répondant de façon intégrée à plusieurs des problèmes environnementaux, sociaux et économiques qui sont à l'heure actuelle présents ou anticipés dans le secteur de l'agriculture au Québec.

Les systèmes de culture intercalaire et les systèmes sylvopastoraux sont des modes de gestion des terres intégrant des arbres aux terres agricoles. Ces systèmes agroforestiers tentent par le biais d'une approche intégrée de combler le besoin de diminuer l'empreinte environnementale liée à certaines pratiques agricoles et celui de produire à grande échelle des produits agroalimentaires, du bois et des produits forestiers non ligneux de qualité. Ainsi, l'idéal recherché

est l'augmentation de la productivité globale du système par une utilisation optimale des ressources dans l'espace et dans le temps.

Le Québec, en particulier le sud de son territoire, offre un bon potentiel de production d'essences de feuillus nobles variées. La plantation de feuillus nobles sur ces terres utilisées en grande partie à des fins agricoles implique une gestion efficace et harmonieuse de ces deux types de production. L'utilisation du système de culture intercalaire ou sylvopastoral a été identifiée comme une voie intéressante d'exploitation de ce potentiel du territoire (Rivest et al. 2007). Plusieurs études de cas sous climat tempéré ont en effet révélé qu'il peut être plus avantageux sur le plan de la productivité d'associer des arbres et des cultures que de les produire séparément. De tels systèmes ont été utilisés abondamment pendant de longues périodes dans l'histoire, en particulier en Europe (Herzhog 1998). Au cours du XX<sup>e</sup> siècle, on a toutefois assisté à une diminution significative de l'adoption et du renouvellement des parcelles agroforestières. La liquidation de bois de haute valeur (p. ex. : noyer) issus de ces terres aurait permis de dégager les fonds nécessaires à la mécanisation de plusieurs entreprises agricoles en Europe (Mary et al. 1999). D'un autre côté, au Québec, on a assisté au cours des vingt dernières années à un taux d'adoption notable de certains systèmes agroforestiers tels que les haies brise-vent et les bandes riveraines arborées. Par contre, le taux d'adoption des systèmes sylvopastoraux et des systèmes de culture intercalaire demeure marginal.

Le système sylvopastoral est un système où le schéma de plantation des arbres est plus ou moins organisé, selon les besoins de l'agriculteur. Le passage de la machinerie y est peu fréquent puisqu'il s'agit essentiellement d'un pâturage arboré. L'importance accordée au fourrage dépend largement des buts du système. L'influence des arbres sur la qualité du fourrage est néanmoins de première importance puisque la composante animale qui le consomme représente la seule source de revenus jusqu'à la récolte des arbres. Les pré-vergers européens représentent un exemple particulier de systèmes sylvopastoraux axés essentiellement sur la production de fruits. Les animaux sont introduits principalement dans le but d'entretenir la strate herbacée et de détruire les fruits parasités tombés au sol. La qualité fourragère, bien que désirable, y est moins importante, mais la persistance du couvre-sol en zone ombragée est primordiale (Herzhog 1998).

Dans le système de culture intercalaire, les arbres sont généralement plantés en rangées espacées de 10 à 40 mètres. Ceci permet de semer entre les arbres et de cultiver le sol sans trop de

changements apportés à la régie de culture. Il est envisageable de planifier des systèmes de culture intercalaire et des systèmes sylvopastoraux où la biomasse ligneuse est récoltée en courtes rotations. De tels systèmes peuvent s'avérer intéressants pour leur potentiel productif. Dans ce cas, la rotation des cultures adoptée au cours des premières années de croissance des arbres peut être très similaire à celle que le producteur aurait utilisée en monoculture.

L'objectif fondamental de cet essai était de déterminer, en contexte expérimental, l'impact d'un système de culture intercalaire implanté au Québec sur la performance d'une culture fourragère. Afin de bien situer cette expérience, cet essai présente d'abord, dans le chapitre 1, une analyse de la littérature concernant les caractéristiques des systèmes de culture intercalaire et des systèmes sylvopastoraux et du contexte dans lequel il serait approprié de les utiliser. Les connaissances actuelles concernant les facteurs devant être considérés dans la planification du système et influant ultimement sur l'itinéraire technique, la structure de la parcelle et la performance de différents types de fourrages seront par la suite analysées. Dans le chapitre 2, cet essai présente le cadre contextuel et méthodologique, ainsi que les résultats de notre expérience réalisée au Québec en 2011 et 2012 concernant les effets des arbres sur la qualité et les rendements d'une culture fourragère. Ce chapitre est présenté selon le format classique d'un article scientifique.

# Chapitre 1: Fonctionnement et gestion des systèmes agrosylvicoles

## Le système de culture intercalaire

L'un des buts premiers du système de culture intercalaire intégrant des arbres est d'accroître la productivité des terres agricoles par une utilisation optimale de l'espace et des ressources. Nordenstahl et al. (2011), par exemple, ont constaté une hausse de productivité globale des terres à vocation fourragère en système agroforestier, en comparaison avec une monoculture fourragère en Argentine. Cette productivité est définie comme la quantité de biomasse produite par unité de temps sur une surface donnée. L'ampleur à laquelle il est possible d'optimiser l'utilisation des ressources dépend d'une multitude de facteurs. Dans l'étude de Nordenstahl et al. (2011), il a été possible d'obtenir une hausse de la productivité allant jusqu'à 75 % à certaines périodes de l'année. De façon générale, les systèmes de culture intercalaire sont caractérisés par une productivité globale plus élevée que les monocultures. Par exemple, Graves et al. (2007) et Tsonkova et al. (2012) ont estimé des valeurs de surface équivalente de l'association (appelée LER, Land Equivalent Ratio, en anglais) de systèmes de culture intercalaire variant de 0,98 à 2,40. Un LER de 2,40 signifie que 1 ha en agroforesterie produit autant que 2,4 ha où les arbres et les cultures seraient produits séparément. Cette hausse de productivité globale a plusieurs implications, autant sur le plan économique qu'environnemental.

L'efficacité d'utilisation de la lumière peut être accrue (Feldhake et Belesky 2009), pour peu que les traits fonctionnels des espèces arborées et herbacées soient complémentaires. Dans l'étude de Nordenstahl et al. (2011), un des problèmes identifiés des prairies en milieu ouvert est la dominance des plantes ayant un métabolisme de fixation du C en C<sub>4</sub>. Alors que cette composition favorise une forte production de biomasse aérienne par période de températures élevées, la productivité diminue et devient presque nulle par temps froid. Le peuplement change naturellement au cours de la première année vers des espèces plus tolérantes à l'ombre, soit des graminées de saison froide en C<sub>3</sub>. Suite à ce changement, la hausse de productivité est plus appréciable puisque la production est mieux répartie au cours de l'année.

Les plantes fourragères peuvent également montrer une plasticité phénotypique variable en fonction de l'espèce et même du cultivar en réponse à la compétition arborée. Certains changements de nature morphologique à l'échelle de l'individu au sein de la population fourragère

peuvent tendre à modifier la performance globale du système. Lin et al. (2001) ont montré une augmentation de la surface des feuilles de 13 à 126% pour des graminées fourragères évoluant sous une intensité lumineuse de 50% par rapport aux mêmes espèces croissant en plein soleil. Cette augmentation est accompagnée d'une baisse du poids spécifique des feuilles de 20 à 40% de même que d'une augmentation de la longueur des entre-nœuds. Les plantes fourragères croissant à l'ombre ainsi qu'à des températures plus fraîches sont retardées dans leur cycle de vie. Par conséquent, elles se trouveront à un stade phénologique moyen moins avancé que des plantes croissant en pleine lumière pour une même date de fauche. Par ailleurs, elles investissent plus de photosynthétats dans leurs parties aériennes (Belesky et al. 2011). Cette adaptation permet une productivité plus près de celle obtenue en pleine lumière malgré la situation de concurrence pour la lumière et modifie quelque peu la façon optimale de récolter ces fourrages. Puisqu'une partie importante des réserves de la plante fourragère se retrouve dans le feuillage, sa sensibilité à la hauteur de la fauche est ainsi accrue. Belesky et al. (2011) suggèrent qu'une fauche des fourrages à 10 cm induirait un plus faible stress physiologique aux fourrages croissant à l'ombre qu'une fauche conventionnelle à 5 cm du sol. L'association d'arbres aux fourrages permet aux agriculteurs de tirer des revenus diversifiés (bois de haute valeur, noix ou fruits) dans le temps, ce qui est nettement plus avantageux au plan économique que les produire séparément (Mary et al. 1999).

Le profil racinaire des arbres se développe souvent davantage en profondeur que celui des cultures agricoles herbacées (Mulia et Dupraz 2006). Par conséquent, l'association d'arbres et de cultures herbacées permet d'optimiser l'utilisation des ressources du sol, d'augmenter l'efficacité d'utilisation des fertilisants et de réduire la lixiviation de nutriments vers les nappes souterraines, les cours d'eau et les milieux humides (Jose et al. 2004, Tsonkova et al. 2012). La répartition des profils racinaires dans le sol est d'une importance capitale dans l'efficacité de prélèvement des nutriments du sol. La complémentarité entre plusieurs espèces de plantes permet de coloniser un plus grand volume de sol et ainsi récupérer les nutriments sur une plus grande superficie (Cannell et al. 1996). L'optimisation de la complémentarité arbre-culture dépend de l'habileté du planificateur à bien établir sa parcelle agroforestière, surtout dans l'implantation des bonnes associations d'espèces et dans l'adaptation de l'itinéraire technique (Smith et al. 1999). Le profil racinaire d'un arbre planté dans un champ diffère généralement passablement de celui d'un arbre en milieu forestier. Plutôt que de le développer en surface comme en milieu forestier, les



conditions de stress hydrique en surface, la compétition herbacée, les labours, ainsi que les forts vents typiques des milieux ouverts influencent l'arbre à établir son réseau racinaire en profondeur (Schroth 1995). Ceci laisse l'horizon supérieur du sol moins densément colonisé par les racines de l'arbre, ce qui est bénéfique pour les herbacées cultivées. Cette ségrégation racinaire est bien sûr un idéal à atteindre et n'est pas obtenue dans tous les cas. L'ampleur de ce phénomène dépend de plusieurs facteurs tels que le type de climat et de sol ainsi que les pratiques culturales et les espèces utilisées (Smith et al. 1999).

Ce phénomène de ségrégation souterraine est à l'origine de l'hypothèse du « filet de sécurité » racinaire, hypothèse vérifiée à plusieurs reprises dans différents contextes (Jose et al. 2004). Le prélèvement accru de nutriments par le système agroforestier par rapport au système agricole conventionnel peut-être directement relié au plus grand volume racinaire découlant de l'hétérogénéité spécifique du système. Or, la prise plus élevée de nutriments est considérée comme étant une preuve de l'hypothèse du filet de sécurité (Rowe et al. 1999, Bergeron et al. 2011). Wang et al. (2011) ont observé une perte de nitrates par lessivage souterrain dans une monoculture d'arachides (*Arachis hypogaea*) allant de 30 à 40% de la quantité de fertilisants azotés utilisés alors que cette perte était de 9,8 à 30% lorsque la culture d'arachides était associée à des citronniers (*Citrus reticulata*).

Tully et al. (2012) ont montré, en comparant une plantation de café en monoculture à une plantation agroforestière de café, qu'indépendamment de la source d'azote utilisée, soit minérale ou organique, la proportion de fertilisants perdus par le système est inversement proportionnelle à la biomasse totale du système et directement proportionnelle à la quantité d'azote appliquée. Les auteurs ont observé une perte d'azote trois fois moindre en système agroforestier en comparaison avec une monoculture de café. Leurs résultats montrent ainsi un effet bénéfique sur l'environnement de la productivité globale plus élevée des systèmes agroforestiers. Les arbres ont par ailleurs la capacité de restituer partiellement au sol les nutriments captés par le biais de la décomposition de leur litière.

En système de culture intercalaire, les résidus de taille et les tissus racinaires sectionnés par le travail mécanique du sol, de même que des organes entrant naturellement en sénescence comme les feuilles et les racines fines s'additionnent à la matière organique retournée au sol par les résidus de culture. Dans un système de culture intercalaire de cacaotiers (*Theobroma cacao*)

en association avec *Cordia alliodora*, Munoz et Beer (2001) ont mesuré que la proportion de l'azote sous forme organique apportée par la décomposition des racines fines de *C. alliodora* variait de 6 à 13% de l'azote organique total apporté au système.

L'utilisation d'instruments aratoires dans un système de culture intercalaire comprend un ensemble de pratiques pouvant aussi contribuer à un retour significatif de nutriments dans le système par le biais des racines taillées par la machinerie. Dans le sud de la France, en climat méditerranéen, Mulia et Dupraz (2006) ont mesuré que la densité racinaire de peupliers (*Populus* sp.) et de noyers noirs (*Juglans nigra*) en culture intercalaire avec du blé (*Triticum* sp.) était plus profonde que celle des arbres en plantation forestière monospécifique. Les auteurs ont estimé que l'horizon du sol où est concentrée 90% de la densité racinaire du noyer noir était significativement plus profond en système agroforestier qu'en plantation forestière. Cette répartition racinaire en profondeur a été partiellement expliquée par la taille des racines des arbres par le travail du sol, mais aussi par la compétition souterraine entre les arbres et les cultures.

Pour affirmer obtenir une réelle complémentarité entre les arbres et les cultures, il est nécessaire d'analyser la répartition de la densité racinaire de chaque espèce formant une association et d'évaluer la compétition souterraine (Vanlauwe et al. 2002). En ce sens, l'hypothèse du filet de sécurité et ses bénéfices associés n'assurent pas de la réelle complémentarité de deux espèces du point de vue de l'utilisation des ressources. Un prélèvement élevé de nutriments par le système est généralement bénéfique pour l'environnement. Cependant, celui-ci peut être fait dans une situation de compétition élevée, au détriment du rendement d'une ou plusieurs composantes d'un système multifonctionnel.

La répartition racinaire particulière de certains systèmes agroforestiers pourrait expliquer en partie l'évolution de la composition spécifique des pâturages sous les arbres vers des populations enrichies par certaines graminées tolérantes à l'ombre, qui développent un système racinaire très superficiel (Benavides 2009). Ceci pourrait se produire au détriment de plantes comme la luzerne (*Medicago sativa*), qui développent des racines relativement profondes, recoupant davantage la niche occupée par certains arbres (Pollock et al. 2009). Un tel profil racinaire global, ayant un volume élevé, permet de récupérer des nutriments très mobiles, tels que les nitrates, réduisant ainsi les pertes par lessivage (Tsonkova et al. 2012). Les rangées d'arbres sur les terres favorisent également la rétention du sol et minimisent l'érosion de surface éolienne

et hydrique des terres. L'implantation de plantes pérennes et d'arbres dans les champs réduit la vitesse d'écoulement de l'eau, favorise son infiltration et la rétention des nutriments dissous. Le contrôle de l'érosion de surface est en effet un avantage commun à bon nombre de systèmes agroforestiers (Cubbage et al 2012, Tsonkova et al. 2012, Larcher et Beaudry 2013).

Les systèmes de culture intercalaire peuvent aussi augmenter l'efficacité d'utilisation de l'espace aérien. Toutefois, une bonne gestion doit être exécutée afin de maintenir un taux acceptable de lumière transmise aux cultures herbacées (Van Noordwijk et Lusiana 1999). Une bonne sélection des espèces arborées et un programme de taille approprié permettent de minimiser le taux d'ombrage aux cultures. Ceci est particulièrement important dans les années où les arbres se rapprochent de leur maturité. Au cours de cette période, un taux d'ombrage élevé peut réduire de façon significative les rendements de cultures héliophiles. Par conséquent, dans un système de culture intercalaire, le transfert vers une culture plus tolérante à l'ombre est approprié à ce moment. Dans les pâturages naturels, le transfert vers de telles espèces s'effectuerait de façon naturelle au fil du temps (Garrett et al. 2004, Koukoura et Kyriazopoulos 2007).

Le contexte social, économique et environnemental associé à l'agriculture moderne est empreint de l'incertitude associée à la vulnérabilité des agroécosystèmes aux changements climatiques et à la perte de biodiversité. L'utilisation judicieuse de systèmes de culture intercalaire pourrait aider à réduire la pression exercée par l'agriculture sur les écosystèmes. La dégradation des écosystèmes locaux à l'échelle de petits bassins versants agricoles peut être réduite par le biais du phénomène du filet de sécurité, tel que vu précédemment. L'agroécosystème créé par le système de culture intercalaire modifie les habitats disponibles par rapport aux monocultures conventionnelles. Sur une échelle planétaire, les systèmes de culture intercalaire recèlent aussi un certain potentiel sur le plan de la réduction de l'émission globale de gaz à effet de serre.

Le bilan net de l'impact des activités agricoles sur la concentration globale de gaz à effet de serre a beaucoup été critiqué au cours des dernières années. L'agriculture est à la fois une victime potentielle et un responsable majeur du réchauffement climatique. Selon Goh (2011), l'agriculture serait responsable de 13,5% des émissions globales de gaz à effet de serre. Cette production se décline en trois principaux gaz, le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) et l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O). Smith et al. (2008) ont estimé que l'agriculture à l'échelle planétaire serait responsable de 52% des émissions de méthane et 84% des émissions d'oxyde nitreux.

Robertson et al. (2000) ont identifié le N<sub>2</sub>O comme le gaz à effet de serre ayant le plus d'importance dans la plupart des systèmes agricoles. Johnson et al. (2007) ont estimé que près de 78% des relâchements de N<sub>2</sub>O en agriculture proviennent de la gestion des sols agricoles. Les systèmes de culture intercalaire sont identifiés comme pouvant réduire considérablement les émissions de N<sub>2</sub>O par les sols en grandes cultures. Beaudette et al. (2010) ont mesuré que les émissions de N<sub>2</sub>O des sols en système agroforestier avec peupliers hybrides et feuillus nobles en association avec du canola (*Brassica napus*) étaient trois fois moins important que dans une monoculture de canola. Selon les auteurs, cette réduction des émissions de N<sub>2</sub>O peut être due à différents facteurs dont la réduction de la teneur en eau du sol ou la fixation plus rapide des fertilisants azotés dans le système de culture intercalaire.

Il est par ailleurs possible de fixer de grandes quantités de CO<sub>2</sub> en système de culture intercalaire. Ce carbone peut être fixé à plus ou moins long terme dans le système, par les arbres, la culture et le sol. Les flux nets de gaz à effet de serre en monoculture montrent en général un relâchement de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Grâce aux systèmes de culture intercalaire, il est possible de renverser cette tendance et de fixer une certaine quantité de CO<sub>2</sub>. La manipulation appropriée du système, notamment par l'utilisation des bonnes espèces, permet de faire varier la quantité de carbone emmagasiné par le système et la période au cours de laquelle ce carbone sera stocké. Peichl et al. (2006) ont estimé que le stockage annuel net de carbone dans un système de culture intercalaire de 13 ans avec peupliers hybrides en association avec de l'orge (*Hordeum vulgare*) peut être aussi élevé que 13,2 tonnes/ha, alors que la culture de l'orge seule libère 2,9 tonnes de carbone par ha. Dans la même étude, la captation de carbone dans le système associant l'épinette de Norvège (*Picea abies*) avec de l'orge était de 1,1 tonne/ha. L'utilisation de conifères à croissance lente apporterait un stockage de carbone à plus long terme par le biais d'une litière plus récalcitrante à la décomposition et d'un cycle de rotation plus long.

Les systèmes de culture intercalaire peuvent aussi contribuer à l'enrichissement de la biodiversité au sein de l'agroécosystème. L'augmentation du nombre d'espèces présentes et leur répartition dans l'agroécosystème apporte des bénéfices sociaux, technico-économiques et environnementaux directs et indirects dont l'ampleur et la variété est parfois difficile à saisir. Pour cette raison, la biodiversité des divers systèmes agronomiques prend parfois beaucoup d'ampleur dans la théorie, mais est moins considérée en pratique. Néanmoins, le consensus actuel est que

l'utilisation de pratiques favorisant l'augmentation de la biodiversité au sein des agroécosystèmes est un cheminement souhaitable des agriculteurs.

Gurr et al. (2003) ont argué qu'une diversité au niveau des espèces cultivées diminue le risque de pertes dues aux ravageurs et pathogènes et favorise la prolifération d'espèces bénéfiques telles que les prédateurs des ravageurs. Plus l'association comporte des espèces de groupes taxonomiques éloignés plus les pertes potentielles par un seul organisme nuisible diminuent. Cela peut se traduire par une diminution des besoins en intrants, ce qui est sans contredit désirable dans le cadre d'une agriculture visant l'innocuité alimentaire et l'optimisation des bénéfices économiques. Il est possible de favoriser la biodiversité dans l'agroécosystème par l'aménagement de zones non cultivées. Cependant, la diversification de la flore de l'agroécosystème par l'association de plusieurs espèces à intérêt commercial et de différence fonctionnelle élevée est préférable du point de vue de la rentabilité du système à l'échelle de la ferme. Sur un classement de sept différentes pratiques agronomiques, selon un ordre croissant d'impact positif sur la biodiversité au sein de l'agroécosystème, les systèmes de culture intercalaire à l'échelle de la ferme arrivent au 6e rang, surclassés seulement par la diversification des pratiques agricoles à l'échelle du paysage entier (Gurr et al. 2003).

Cette diversité visée par les systèmes de culture intercalaire affecte également la résistance et la résilience des agroécosystèmes aux aléas climatiques. Les événements climatiques extrêmes comme les orages violents ou les périodes de canicule et de sécheresse peuvent affecter les rendements et même l'intégrité de l'agroécosystème de façon variable en fonction de la structure du système, de la sensibilité des cultures ainsi que du moment et de l'intensité des perturbations. Par exemple, Wollenweber et al. (2003) ont montré que des plants de blé stressés par des températures élevées pendant 8 jours à 35°C au moment de l'anthèse peuvent produire jusqu'à 40% moins de biomasse que des plants se développant à 25 °C. L'augmentation de la fréquence d'épisodes climatiques extrêmes augmente les chances de stresser les cultures à un moment critique dans leur développement. Des techniques pouvant réduire l'amplitude des variations climatiques pourraient aider à diminuer le risque de dépasser les seuils de stress menant à de lourdes pertes de rendements. Les systèmes de culture intercalaire peuvent mitiger les effets des événements de fortes précipitations par l'intermédiaire de leur plus grande résistance à l'érosion de surface, tel que discuté précédemment. Il a par ailleurs été démontré que la présence de plantes ligneuses à enracinement profond peut limiter les effets négatifs de sécheresses prolongées par l'intermédiaire

de la redistribution de l'eau des couches inférieures du sol aux couches supérieures par le système racinaire des plantes ligneuses via un phénomène nommé « ascenseur hydraulique » (Wan et al. 2000).

La température de l'air à proximité des cultures peut également être diminuée de plusieurs degrés par la présence d'arbres de forte stature. Selon Stigter et al. (2005), les systèmes de culture intercalaire sont un moyen efficace et peu onéreux pour protéger les cultures contre les chaleurs extrêmes. L'ombre projetée par les arbres peut réduire la température au niveau des cultures de 1 à 5 °C (Lin et al. 1999). Cette différence de température peut réduire le stress thermique affectant la croissance des plantes lors de périodes de températures exceptionnellement élevées.

L'Amélioration du paysage est un autre bénéfice non négligeable apporté par les systèmes agroforestiers. Cet élément peut sembler distinct des technicités du monde agricole, mais est néanmoins un moteur important de l'adoption de pratiques agroforestières dans certaines régions, notamment celles qui misent fortement sur l'agrotourisme. La forte expansion de l'industrie du vin dans le comté de Santa Barbara (Californie, États-Unis) et les lois de conservation des chênes sur les terres agricoles qui en découlent en font un bon exemple. Alors que l'industrie du vin était en forte croissance dans les années 1990, l'expansion des superficies de terres utilisées pour cultiver le raisin empiétait sur les terres initialement occupées par des savanes arborées de chênes. La dégradation du paysage découlant de la coupe des chênes a été constatée et des lois ont été votées afin de conserver les chênes croissant sur les terres agricoles et ainsi protéger les paysages caractéristiques de la région. Le résultat de l'application de ces lois est une association de vignes et de chênes qui stimule l'industrie du vin, tout en contribuant à améliorer l'esthétique des paysages locaux. Ce système chêne-vigne constitue ainsi un des piliers de l'industrie agrotouristique de la région. Au Québec, l'utilisation de l'agroforesterie pour l'amélioration de la qualité du paysage est une solution qui est étudiée en profondeur depuis 2006 par la MRC du Rocher-Percé, dont l'économie dépend grandement du tourisme (Anel 2009).

En France, la culture de diverses plantes annuelles et vivaces telles que la lavande (*Lavandula* sp.), la luzerne, les céréales d'automne, le tournesol (*Helianthus annuus*), le framboisier (*Ribes* sp.), le tabac (*Nicotiana* sp.), le sorgho (*Sorghum* sp.) et le soya (*Glycine max*) dans de jeunes plantations de noyers représente un système traditionnel encore très répandu (Mary et al. 1999). À mesure que les arbres gagnent en volume, la culture herbacée perd en importance

et les activités agricoles s'orientent vers la production de bois et de noix de haute valeur économique. À maturité, le système est un verger de noyers taillés de façon à obtenir une bille de pied adéquate pour l'industrie du bois d'œuvre tout en compromettant le moins possible la production de noix. Les entre-rangs produisent alors du fourrage pour l'alimentation animale. La production animale stabilise les revenus des agriculteurs et valorise les prairies intercalaires, une ressource autrement perdue. L'agriculteur mise sur la possibilité de vendre ses arbres pour leur bois de haute valeur en cas de difficultés financières imprévues ou d'opportunités d'investissement particulières.

## Le système sylvopastoral

Les systèmes sylvopastoraux sont en réalité des pâturages arborés. Ils sont sans doute parmi les systèmes agroforestiers les plus répandus sous climat tempéré. Les avantages recherchés dans les systèmes sylvopastoraux modernes sont surtout d'ordre environnemental et économique. Dans les zones pâturées en pente forte, la dégradation des sols mène à une perte de productivité très problématique dans certaines régions dépendantes de l'élevage (Guevara-Escobar et al. 2007). Bakker et al. (2007) ont estimé que la diminution globale de rendements causés par la perte de sols en agriculture intensive en Amérique du Nord et en Europe était de 4% pour chaque 10 cm de sol perdu. La plantation d'arbres en rangées perpendiculaires à la pente modifie le microclimat des pâturages en zones sensibles à l'érosion. Ils résistent dans une certaine mesure aux chemins préférentiels de l'eau. Dans les pâturages inondés périodiquement ou sensibles à l'érosion, ils peuvent aider à retenir et assécher le sol plus rapidement, stabilisant ainsi la productivité (Guevara-Escobar et al. 2000). Certaines améliorations au bien-être des animaux peuvent aussi être apportées par la plantation d'arbres sur les terres agricoles.

Hahn (1997) a démontré qu'une température trop élevée diminue la prise alimentaire des vaches (*Bos taurus*) et augmente la fréquence des repas, ce qui conduit à une perte de productivité. Outre la température ambiante, l'exposition directe au soleil et un manque de mouvement de l'air sont identifiés comme des facteurs augmentant la température des animaux. Les grands arbres en système sylvopastoral offrent une ombre qui diminue la température des animaux, ce qui peut stimuler la prise de nourriture par journées de chaleur extrême et augmenter la performance des animaux (Garrett et al. 2004). Ces raisons, entre autres, ont poussé des éleveurs d'agneaux de la

Nouvelle-Zélande, de même que des éleveurs de bovins de l'Argentine, à transformer une partie des zones les plus susceptibles à la dégradation des sols en systèmes sylvopastoraux. Ces systèmes sont également plus adaptés à l'amélioration d'une agriculture extensive à faibles revenus que l'utilisation de techniques à coût élevé telles que l'implantation de drains et la construction de divers ouvrages anti-érosion artificiels.

Même si parmi les principaux objectifs de la plantation d'arbres sur les pâturages on retrouve le maintien de la fertilité et de la productivité, les retombées environnementales et économiques ne s'arrêtent pas là. De grands volumes de bois peuvent être cultivés. La qualité du bois produit peut être augmentée par une taille de formation visant à obtenir un tronc droit, ainsi que par des élagages fréquents sur les premiers mètres du tronc afin d'obtenir une bille de pied sans nœuds, de qualité déroulage ou sciage. L'élagage diminue par ailleurs la masse foliaire des arbres. Ceci augmente la quantité de lumière disponible au pâturage et limite la quantité d'eau évapotranspirée par les arbres. La concurrence des arbres sur les pâturages est ainsi maîtrisée tout en augmentant la valeur du produit final de l'arbre. Les revenus à moyen et long terme générés par les arbres peuvent être non négligeables même pour les essences à croissance lente, notamment par l'augmentation de la valeur de la propriété (Williams et Gordon 1992).

L'application de systèmes sylvopastoraux au Québec est une avenue intéressante, principalement sur les terrains dont l'usage purement agricole au détriment des bénéfices écosystémiques que cette zone pourrait apporter est source de conflits. Au Québec, une telle problématique est actuellement présente en zones riveraines et dans certaines zones qui sont ou ont déjà été des milieux humides. Une eutrophisation des cours d'eau est observée au Québec depuis plusieurs années (Painchaud 1997, Campeau et al. 2010) et les agriculteurs sont souvent pointés du doigt. Les cultures fourragères sont reconnues comme ayant une empreinte environnementale moindre lorsqu'elles sont comparées à d'autres grandes cultures, principalement les cultures en rangs telles que le maïs et le soya. Aussi ces cultures sont-elles souvent privilégiées dans des zones sensibles à l'érosion. Les terres situées en milieux riverains sont nombreuses au Québec et il est impensable de cesser d'y cultiver la terre pour les transformer en simples bandes riveraines. L'implantation de systèmes sylvopastoraux ou de culture intercalaire fourragère représente une alternative intéressante afin de garder en production ces terres sensibles tout en réduisant l'empreinte anthropique sur la qualité des cours d'eau.



L'utilisation de systèmes silvopastoraux et de culture intercalaire représente donc un ensemble d'outils utilisés de façon traditionnelle dans plusieurs pays de climat tempéré comme la France et l'Allemagne (Herzhog 1998). L'utilisation de ces outils a connu un regain d'intérêt au cours des dernières années puisqu'ils pourraient aider, tel que vu précédemment, à solutionner plusieurs problèmes liés à l'agriculture moderne. En Chine, des stratégies de déploiement à grande échelle des pratiques agroforestières ont été mises en place afin de maintenir ou améliorer la productivité agricole et forestière dans des zones particulièrement sensibles à l'érosion (World Agroforestry Centre 2007). L'agriculture et l'ensemble de la société québécoise pourraient bénéficier de l'emploi de pratiques telles que les systèmes de culture intercalaire et les systèmes silvopastoraux. Parmi les défis associés à l'adoption de telles pratiques se trouvent la bonne planification des systèmes et leur adaptation aux différents contextes locaux dans lesquels ils doivent être implantés. La prochaine section discutera de différents facteurs à prendre en compte dans la planification d'un système agroforestier à l'échelle de la parcelle agricole, mais également dans le contexte socio-économique dans lequel il s'insère.

## L'itinéraire technique agroforestier

L'intervalle de temps est élevé entre la plantation et la récolte des arbres pour leur bois en système de culture intercalaire ou silvopastoral. Entre la plantation et la récolte des arbres, les sources de revenus pour l'agriculteur sont essentiellement les mêmes : la culture de plantes annuelles ou vivaces pour leur vente directe ou pour nourrir le bétail. Ces activités sont celles qui apportent un revenu plus régulier à l'agriculteur. Bien que les systèmes de culture intercalaire puissent intégrer une large gamme de cultures agricoles, l'étude actuelle est axée sur les cultures fourragères et est ainsi orientée vers l'élevage.

Suite à l'implantation d'un système agroforestier vient une période où les arbres, alors de faible stature, ont peu d'effets sur les cultures. Cette période varie de 5 à 40 ans et dépend de plusieurs facteurs (Benavides et al. 2009). L'arrangement spatial des arbres du système agroforestier implanté, le climat ainsi que les espèces utilisées sont probablement les plus importants. L'espacement entre les rangs d'arbres ainsi qu'entre les arbres sur le rang déterminera la magnitude de l'effet de l'interaction entre les arbres et les cultures. Tel que mentionné précédemment, pour déterminer si l'association entre deux espèces différentes est bénéfique du

point de vue de la productivité, la surface équivalente relative (LER) est utilisée. Le LER est un indice initialement conçu pour n'importe quelle association de cultures (Mead et Willey 1980) et adapté aux systèmes agroforestiers. En agroforesterie, il peut être défini comme le ratio entre une surface en monoculture et la surface en système agroforestier nécessaire pour obtenir des rendements égaux (Graves et al. 2010). Il peut être calculé comme suit:

$$LER = \frac{\text{rendements des arbres en système agroforestier}}{\text{rendements des arbres en monoculture}} + \frac{\text{rendements des cultures en système agroforestier}}{\text{rendements des cultures en monoculture}}$$

Par exemple, Keesman et al. (2007) ont mesuré un LER de 1 à 1,16 pour des espacements d'arbres variant de 8 x 4 m à 11 x 11 m. La vitesse de croissance des arbres et les pratiques culturales employées déterminent quant à elles le moment où la compétition ou facilitation devient prédominante. Plus les arbres se rapprochent de leur maturité, plus l'ombre qu'ils projettent sur les cultures et leur pression potentielle sur les réserves en eau, les nutriments du sol et la lumière disponible devient importante.

Le LER mesuré dans les premières années de la plupart des systèmes de culture intercalaire en système agricole intensif est généralement supérieur à 1 (Dupraz 1999). Ceci s'explique par le fait que les jeunes arbres ont des effets négligeables, voire positifs, sur la productivité des cultures. Une augmentation du rendement des cultures associées aux arbres, dans de jeunes systèmes agroforestiers, se traduit souvent par un LER relativement élevé comparativement au LER d'un système avec arbres matures. Par ailleurs, la croissance des arbres en environnement agroforestier est souvent supérieure à celle en plantation forestière monospécifique, puisqu'ils peuvent bénéficier des soins apportés aux cultures et que la compétition intraspécifique pour les ressources est marginale (Rivest et Olivier 2007).

Lorsque les arbres se rapprochent de leur maturité, on observe généralement une diminution de l'accumulation de degrés-jours et une baisse de la radiation photosynthétiquement active au niveau des cultures. Un choix approprié d'espèces de plantes fourragères tel que discuté plus loin (p. 27, espèces herbacées) peut permettre au producteur agricole de s'adapter au changement de ces conditions environnementales. Néanmoins, dans des conditions comme au

Québec, il faut bien considérer qu'une des variables climatiques qui limite le choix des variétés de plantes herbacées pouvant être amenées à maturité avec un minimum de risque est le nombre de degrés-jours de la saison de croissance. Par ailleurs, la perte de rendements potentielle causée par la diminution de la quantité de radiation photosynthétiquement active atteignant les cultures est fortement liée au type de culture utilisée (Reynolds et al. 2007). Par conséquent, les systèmes agroforestiers matures sont peu compatibles avec certaines cultures et peuvent se traduire par des pertes de rendements importantes lorsque le choix des associations arbre-culture est inapproprié. Les cultures annuelles en C<sub>4</sub>, comme le maïs, sont très sensibles à la diminution de degrés-jours et de disponibilité de la lumière en climat nordique comme au Québec. Néanmoins, l'utilisation de très larges écartements entre les rangées d'arbres (p. ex. : 40 m et plus) permettrait sans doute de cultiver avantageusement de telles plantes héliophiles pendant plusieurs années si les effets de facilitation des arbres (p. ex. : effet brise-vent) sont supérieurs à leurs effets de compétition (p. ex. : ombrage excessif).

Selon le système étudié, même sous une diminution considérable de la radiation photosynthétiquement active atteignant les cultures, il est possible que l'ombrage d'arbres matures ne soit pas le principal facteur limitant de la performance des cultures. Néanmoins, plus les arbres se rapprochent de leur maturité, plus les risques d'interférence avec un ou plusieurs facteurs limitants pour la croissance des cultures sont élevés, particulièrement sur les sites où les sols et les conditions climatiques favorisent une productivité primaire élevée. Par exemple, Rivest et al. (2013) ont démontré dans une méta-analyse que la nature compétitive ou facilitante des interactions entre des arbres et des plantes fourragères est largement dépendante des précipitations annuelles et des groupes fonctionnels d'arbres. Il est à noter que cette étude concerne des prairies principalement constituées de végétation spontanée à très faibles niveaux d'intrants et non de plantes sélectionnées pour leur performance agronomique. Par conséquent, il est probable que les plantes ayant colonisé la niche écologique particulière près des arbres y soient adaptées, contrairement au cas d'une association inappropriée d'arbres avec des espèces sélectionnées pour leur performance en pleine lumière.

En système intensif plus contrôlé, la nécessité de changer pour une culture adaptée à la concurrence exercée par les arbres apparaît alors que les arbres se développent. Au cours des dernières années avant la récolte des arbres, la prairie agroforestière est une option intéressante afin de continuer de rentabiliser les entre-rangs. Il est ainsi possible de passer d'un système

intégrant des cultures annuelles à haute valeur monétaire, tel que le maïs et le soya, vers un système sylvopastoral. Un tel itinéraire technique permet par ailleurs de minimiser les investissements nécessaires à la protection des arbres contre le bétail dans les premières années d'un système sylvopastoral. Dans ce scénario, il est important d'implanter un fourrage de bonne qualité, ayant la propriété de se développer rapidement dans cette situation de compétition.

Implanter un système de culture intercalaire ou sylvopastoral représente tout de même un risque considérable, bien que d'un point de vue extérieur, ces systèmes apportent un bilan environnemental plus favorable à l'entreprise agricole, diversifient les revenus et les activités des agriculteurs, stimulent l'économie et augmentent la productivité des systèmes. Pour sa part, l'éleveur devra nourrir ses animaux avec une superficie totale cultivée amoindrie. En supposant que l'agriculteur n'ait pas de surplus de terres dès le départ, cela signifie qu'il devra réduire la taille de son cheptel, acquérir de nouvelles terres, s'approvisionner en fourrages à l'extérieur de son exploitation ou trouver le moyen de rendre les terres restantes plus productives. Réduire la taille de son cheptel équivaut à des pertes de revenus. Alors que des investissements viennent d'être faits dans l'implantation du système agroforestier, cette option semble peu viable. Acquérir de nouvelles terres est une autre option, requérant cette fois un investissement supplémentaire. La remise en culture de terres en friches représente le scénario idéal dans plusieurs situations, particulièrement dans le contexte actuel des régions agricoles du Québec. Cependant dans plusieurs régions où l'agriculture est plus intensive, comme la Montérégie, cette option n'est pas toujours disponible.

La perte potentielle de rendements des cultures suite à l'implantation du système de culture intercalaire ou sylvopastoral est causée principalement par la perte de surface cultivée. Alors que le système évolue dans le temps, une pression grandissante de compétition par les arbres sur les cultures s'ajoute. Dans l'optique où les arbres ne sont pas fixateurs d'azote et ne produisent aucun produit forestier non ligneux, d'un point de vue strictement productif, l'agriculteur peut avoir à composer avec une certaine perte de rendement jusqu'à la récolte des arbres, le moment où la rentabilité globale du système agroforestier atteint son optimum. Il est également possible de considérer les arbres comme augmentant d'année en année la valeur du capital foncier de la terre. Cette considération, bien qu'ayant un fondement réel, ne change rien au bilan productif de l'éleveur et n'apporte rien au fonds de roulement de l'entreprise agricole.

Du côté de la gestion de l'entreprise agricole, si aucun programme d'aide n'est disponible, l'éleveur doit apporter des investissements majeurs de temps et d'argent dans l'implantation du système agroforestier (p. ex. : achat et plantation des arbres). Ces investissements sont hautement variables en fonction des espèces et méthodes utilisées et de la main-d'œuvre disponible. Le brout et le frottis doivent être prévenus et la compétition contrôlée sur plusieurs années suivant la plantation. L'achat de protecteurs et le temps nécessaire à leur bon usage doivent être considérés. La rectitude de l'arbre doit être maintenue si une grande qualité est recherchée dans les tiges récoltées. Encore une fois, ceci demande du temps, mais aussi de la constance dans la réalisation et la répartition du travail.

Ainsi, du point de vue de l'éleveur et de son entreprise, les systèmes de culture intercalaire et sylvopastoraux peuvent sembler contraignants. Néanmoins, il est possible de dégager les **points positifs** suivants :

- maintien de la fertilité du sol ;
- récolte de bois de haute valeur ;
- fixation de carbone ;
- atténuation de la pollution des cours d'eau ;
- paysages améliorés ;
- augmentation de productivité globale du système ;
- augmentation de l'efficacité d'utilisation des fertilisants ;
- augmentation et conservation de la biodiversité ;
- augmentation de la valeur foncière des terres ;
- stabilisation des récoltes face aux aléas climatiques.

À l'opposé, il est aussi possible de dégager les **points négatifs** suivants :

- coûts d'implantation ;
- coûts d'entretien ;
- perte de superficies cultivées ;

- compétition des arbres sur les cultures ;
- charge de travail accrue ;
- perte de liberté de circulation avec la machinerie ;
- gestion des moments d'intervention dans la plantation.

Par un simple coup d'œil à ces points faibles et points forts, deux faits saillants peuvent être dégagés. En premier lieu, les points positifs n'interviennent de manière générale qu'à long terme. Ceci est particulièrement évident lorsqu'on considère les pertes de rendements et le relâchement de carbone atmosphérique associé au déploiement des divers protecteurs généralement en plastique et au désherbage mécanique ou chimique de la bande non cultivée. Plus la quantité d'énergies fossiles utilisées pour l'entretien de la plantation au départ est grande, plus on retarde le moment où le bilan de carbone du système est positif. Pendant les premières années, le système racinaire des arbres est faiblement développé et son effet sur l'érosion et le lessivage des nutriments est limité. En fait, le bilan de l'érosion est probablement négatif dans certains cas, dépendamment de la stratégie de désherbage de la bande non cultivée et des cultures comparées. L'effet brise-vent de petits arbres est pratiquement inexistant. En fait, au cours des premières années, les seuls points positifs potentiellement sensibles sont l'augmentation de la biodiversité et l'amélioration des paysages.

Alors que les points positifs associés à ces systèmes mettent du temps à s'établir, chacun des points négatifs énoncés est effectif dès la première année du système agroforestier. Alors que le fardeau de l'investissement initial, la charge de travail et les coûts d'entretien devraient diminuer avec le temps, l'ampleur de la compétition des arbres sur les cultures devrait augmenter.

Un second fait saillant peut être tiré de cette énumération de points positifs et négatifs. Alors que les points positifs sont de manière générale profitables à l'environnement et à la société qui en bénéficie, les points faibles ne concernent que l'agriculteur. Actuellement, dans le contexte du Québec, aucune prime sur les aliments produits n'est prévue pour cette pratique respectueuse de l'environnement et du bien-être animal, comme ce serait le cas pour les aliments biologiques par exemple. Les marchés du carbone ne sont pas encore pleinement fonctionnels et il est encore hasardeux de prévoir des revenus basés sur le développement de ce marché. La stabilisation des rendements pourrait être un argument de taille pour justifier un tel investissement. Cependant, au

Québec, il est aussi possible de se procurer une assurance couvrant les désastres naturels à coût compétitif. Les pertes majeures que représentent l'investissement de temps et d'argent de même que la diminution des surfaces cultivées doivent donc être compensées par des retombées du système lui-même sur l'agriculteur. En d'autres termes, en attendant les conditions économiques favorables à l'implantation de systèmes agroforestiers à grande échelle, il est nécessaire de trouver des moyens de mitiger les points négatifs et d'accélérer la venue des points positifs.

L'implantation d'un système agroforestier demande l'adaptation des méthodes de l'agriculteur concernant la régie de la terre. Des systèmes tels que la haie brise-vent ou la bande riveraine arborée peuvent être utilisés sans trop apporter de modifications à l'itinéraire technique tout en minimisant l'exclusion de l'espace cultivable. Ces méthodes demandent néanmoins un investissement initial suivi d'un entretien régulier pour atteindre leur pleine efficacité et les objectifs de production de bois visés. L'implantation de systèmes sylvopastoraux ou de culture intercalaire représente une situation différente puisqu'ils sont implantés sur toute la surface d'un champ. Des investissements de temps et d'argent élevés dans ces situations, motivés par la perspective des nombreux avantages de ces systèmes, pourraient justifier des adaptations majeures de l'itinéraire technique du producteur agricole.

Parmi les problèmes associés aux systèmes sylvopastoraux figurent les coûts élevés associés à la protection des arbres contre le brout et le frottis par les animaux et au contrôle de la compétition. La plantation d'arbres représente un investissement considérable. La récolte de ces arbres n'est généralement pas profitable avant 10 à 15 ans dans le cas des espèces à croissance rapide. Ce délai peut aller jusqu'à une génération, voir même plus d'un demi-siècle pour les espèces à croissance lente. Tel que discuté précédemment, d'autres incitatifs sont nécessaires à la plantation d'arbres en milieu agricole. En fait, une enquête réalisée en Ontario suggère que les revenus tirés de la production de bois de qualité ne feraient pas partie des principales motivations des agriculteurs à adopter de tels systèmes (Matthews et al. 1993). Néanmoins, dans cette étude, la grande majorité des répondants étaient peu informés par rapport aux caractéristiques des systèmes de culture intercalaire et sylvopastoraux. Graves et al. (2009) ont montré dans une étude effectuée dans divers pays européens que 90% des agriculteurs sondés considèreraient la vitesse de croissance et la valeur économique du bois comme un critère d'importance dans le choix des arbres implantés en système de culture intercalaire. Le coût d'implantation et le temps d'entretien sont toutefois des obstacles majeurs à l'adoption des systèmes de culture intercalaire et

sylvopastoraux. Dans l'étude de Graves et al. (2009), 17% des agriculteurs considéraient la complexité des opérations culturales comme la première contrainte en importance associée à l'adoption de ces systèmes (Graves et al. 2009). Par conséquent, il est nécessaire de réduire au minimum les coûts d'implantation et de maximiser le taux de survie et de croissance des arbres plantés afin de rentabiliser au maximum le temps investi.

Le choix des espacements entre les arbres a été identifié comme un facteur important à considérer afin de maîtriser la concurrence des arbres et augmenter les rendements des cultures (Gaafar et al. 2006, Bertomeu 2012). De faibles densités d'arbres (p. ex. : 40 arbres/ha) permettent un certain nombre de bénéfices sur le plan de la productivité. La compétition entre arbres et cultures est bien sûr réduite, les rendements des cultures sont accrus, la croissance en diamètre des arbres est améliorée et le nombre d'arbres à tailler est réduit, ce qui représente une moindre charge de travail. Par ailleurs, la circulation avec la machinerie est plus aisée et il est également possible que de larges espacements entre les arbres soient plus adaptés aux champs avec drainage souterrain.

Graves et al. (2009) ont établi que l'un des critères les plus importants dans la sélection d'un écartement entre les arbres pour les agriculteurs est la largeur de leur machinerie, notamment les rampes d'épandage de pesticides. La largeur des rangées doit ainsi être un multiple de la largeur des équipements utilisés afin d'éviter les pertes d'efficacité et l'augmentation de la consommation de carburant. La largeur des rangées doit tout de même être adaptée de façon à maximiser les interactions bénéfiques entre arbres et cultures et favoriser la productivité globale du système. Afin de déterminer l'espacement idéal entre les rangées et entre les arbres sur les rangées, de même que les cultures appropriées à un système au cours d'un certain intervalle de temps, il est nécessaire de bien établir la relation entre la compétition entre arbres et cultures et l'importance relative de la strate arborée par unité de surface sur la parcelle. Tel que vu précédemment, cette relation risque de varier au fil du temps d'une interaction allant de la compétition à la facilitation en fonction, notamment, de la vitesse de croissance des arbres et de leur densité sur la parcelle.

Dans le but de quantifier la pression potentielle d'une espèce d'arbre sur les cultures au sein d'un système de culture intercalaire dans un intervalle de temps spécifique, Nissen et Midmore (2002) ont suggéré d'utiliser la surface terrière des arbres dans le système. Cette mesure peut être appropriée puisqu'elle permet non seulement d'évaluer rapidement des parcelles comportant une



strate arborée d'âge hétérogène, mais aussi de donner un aperçu de la valeur économique de la strate arborée au moment de son évaluation. Cette méthode demande néanmoins une calibration pour chaque espèce dans chaque région. La courbe de calibration doit également être suffisamment étendue pour couvrir une surface terrière n'affectant pas les cultures, ce qui n'est pas le cas dans l'étude de Nissen et Midmore (2002). Ainsi, cette étude ne couvrait malheureusement que des systèmes à haute densité d'arbres (476 à 2603 arbres/ha) et a montré un déclin rapide de la productivité des cultures avec l'augmentation de la surface terrière des arbres. Bird et al. (2010) ont montré que les rendements de pâturages en association avec des pins radiata (*Pinus radiata*) étaient significativement inférieurs à la production obtenue dans un pâturage sans arbres, même à une densité de 60 arbres/ha. Néanmoins, à cette densité, la productivité du cheptel de moutons n'était réduite que de 13% pour un système de 17 ans. À 60 arbres/ha, les arbres sont également prêts à être récoltés à l'âge de 25 ans, alors que les arbres d'un système à 200 arbres/ha n'ont toujours pas atteint un diamètre commercialisable à cet âge en raison d'une croissance plus lente due à la compétition intraspécifique. En fait, l'analyse de la littérature montre peu de distinction faite entre un système de culture intercalaire visant simplement la rentabilisation des entre-rangs dans les premières années d'une plantation forestière et un système visant une association continue et optimisée entre arbres et cultures. Alors que dans le premier cas l'espacement entre les arbres peut être très faible et la densité d'arbres élevée, dans le second le système bénéficie généralement d'une densité relativement faible de 100 arbres/ha ou moins.

Les premiers essais au Canada montrent des résultats parfois décevants du point de vue du rendement des cultures avec l'utilisation d'espacements relativement faibles entre les rangées d'arbres. Reynolds et al. (2007) ont observé des pertes de rendements en maïs et soya dans un système où les arbres, des peupliers hybrides et des érables argentés (*Acer saccharinum*), étaient espacés de 6 m sur le rang et de 12 à 15 m entre les rangs (111 à 133 arbres/ha). La réduction des rendements des cultures a été observée particulièrement à 2 m de la rangée d'arbres (jusqu'à 78% dans le cas du maïs) ; le rendement à 6 m des rangées d'arbres étant davantage comparable à celui dans les parcelles témoins sans arbres. Néanmoins, à 6 m des arbres, des pertes de rendements ont été mesurées. L'utilisation de rangées espacées, comme dans l'étude de Ding et Su (2010) avec des espacements de 50 m entre les rangées d'arbres, permet d'optimiser le rendement des cultures entre les rangées d'arbres. Il est ainsi possible de bénéficier de l'effet brise-vent et des autres avantages apportés par les arbres, notamment du point de vue de la fertilité des sols, tout en

conservant un bon niveau de radiation lumineuse pour les cultures. Des espacements aussi larges représentent tout de même un compromis qui réduit la production de bois et, dans une certaine mesure, peut diminuer la qualité des billes puisque les arbres tendent à développer de plus grandes cimes et des troncs plus courts alors que la densité d'arbres diminue, bien qu'une taille appropriée puisse contrôler ce problème. L'intensité du programme de taille peut aussi diminuer la pression des arbres sur les cultures sans changer la densité de plantation (Braziotis et Papanastasis 1995). Au final, le choix dépend des objectifs de production du système de même que des ressources et du temps disponible.

## Protection contre les herbivores

La plantation forestière en zone où la densité d'herbivores sauvages est élevée nécessite des protecteurs pour les gros herbivores et pour les micromammifères. Le grand herbivore le plus problématique dans le sud du Québec est le cerf de Virginie (*Odocoileus virginianus*). Plus au nord, les populations d'orignaux (*Alces americanus*) pourraient être problématiques dans les régions où leur densité est très élevée (Huot et Lebel 2012). Le contrôle de ces gros herbivores s'avère nécessaire dans les zones à risque. Néanmoins, il est important de considérer le coût de la protection en fonction du risque associé à une protection moindre.

Le cerf de Virginie et l'orignal exercent une pression sur les jeunes plantations de feuillus par des dommages causés à diverses parties des jeunes arbres qu'ils intègrent dans leur diète. Ceci inclut les feuilles, bourgeons, fleurs et même l'écorce des jeunes arbres. Un autre type de pression est causé par certains aspects comportementaux des grands herbivores. Le cerf peut ainsi gravement endommager l'écorce des jeunes arbres par grattage avec ses bois. Gill (1992) a observé que tous ces dommages sont difficilement prévisibles avec précision et dépendent d'interactions entre les densités d'herbivores et d'autres variables spatiales et temporelles telles que la flore environnante et la disponibilité de sources de nourriture alternatives dans le temps. La pression exercée par les grands herbivores peut être concentrée sur une courte fenêtre temporelle dans l'année et affecter négativement le succès de la plantation. Cette pression ne mène pas nécessairement à une hausse très élevée de la mortalité des jeunes arbres. Elle peut cependant gravement affecter le taux de croissance de même que la structure des arbres.

La perte du bourgeon terminal, par exemple, est une situation particulièrement nuisible à la structure de feuillus destinés à la production de billes de déroulage ou sciage. Ceci occasionne des pertes monétaires importantes dues au travail accru nécessaire à la correction de la forme des arbres et par un délai plus important avant la récolte des arbres causé par un retard de croissance. Ainsi, il est difficile de tenter d'évaluer le risque associé à la plantation d'arbres sans protection dans une zone où les populations de grands herbivores sont élevées. En gardant en tête les objectifs de production de billes de bois de qualité en système de culture intercalaire ou sylvopastoral, il est clair que les arbres devraient être protégés lorsque plantés en zone à risque. Les protecteurs choisis peuvent être de nature variée. Il est néanmoins nécessaire que la protection soit efficace pour protéger le bourgeon terminal jusqu'à ce que ce dernier soit hors d'atteinte des gros herbivores.

Les micromammifères, en particulier les campagnols, exercent quant à eux un autre type de dommage. Ils peuvent ronger l'écorce et le cambium des jeunes arbres sur toute la circonférence de la tige au cours de l'hiver. Les arbres plantés dans les zones où les populations de micromammifères sont élevées peuvent subir de lourdes pertes. Le taux d'arbres affectés est directement lié à la taille des populations de micromammifères. Ces populations sont hautement variables dans le temps et dépendent entre autres de la qualité de l'habitat (Sullivan et Sullivan 2010). Divers protecteurs et répulsifs existent sur le marché pour protéger l'écorce de la partie inférieure des jeunes arbres contre les micromammifères. Certains protecteurs sont efficaces à la fois contre les grands herbivores et les micromammifères, comme les gaines *climatic*, fabriquées par Nortène (Nortène Technologies ©, Lille, France). Ces gaines sont fabriquées d'un tissu à mailles fines de 3 mm, renforcé par la superposition de plus grosses mailles de 27 mm. Cet assemblage particulier permettrait d'obtenir une gaine assez rigide et résistante pour être durable tout en ayant des mailles suffisamment fines pour protéger les plants à la fois contre les gros et les petits mammifères. Les protecteurs contre les mammifères peuvent également agir dans la réduction de divers stress environnementaux par la formation d'un microclimat plus humide et par la protection contre les vents. Benfeldt et al. (2001) ont testé l'effet des protecteurs sur les dommages causés par les mammifères et sur le taux de croissance des arbres dans une plantation agroforestière de féviers d'Amérique (*Gleiditsia triacanthos*) et de noyers noirs. Ils ont observé une réduction presque totale des dommages causés par les mammifères et une augmentation significative du taux de croissance des arbres lors de l'emploi de protecteurs.

Des essais comparatifs de méthodes de contrôle des dommages causés par les micromammifères en système agroforestier ont été initiés au Québec, entre autres dans la MRC du rocher percé (Anel 2009). Les premiers résultats de ces expérimentations semblent être favorables au protecteur spiralé blanc. Ces derniers représentent une solution qui, sans être à toute épreuve, a prouvé son efficacité à prix abordable dans le passé. En plus d'offrir une protection acceptable contre les dégâts associés aux petits rongeurs et lagomorphes, ils peuvent offrir une protection minimale contre les grattages de cerfs mâles à la base des arbres. Par ailleurs, leur couleur blanche prévient les blessures liées au gel de l'écorce en hiver.

Les protecteurs contre les micromammifères sont cependant une source de dépense et de travail supplémentaire pour leur pose et leur entretien. Un retrait tardif d'un protecteur spiralé ou négliger son réajustement, par exemple, peut causer un étranglement à la base de l'arbre. Cette blessure peut diminuer le taux de croissance de l'arbre et augmenter sa susceptibilité aux phytopathogènes. Considérant le temps nécessaire à leur pose, leur entretien, leur réajustement et leur retrait, le choix d'utiliser des protecteurs physiques doit être respecté comme un investissement à moyen terme puisqu'ils représentent un risque pouvant réduire le succès de la plantation dans l'éventualité d'une utilisation inadéquate.

Les tailles de populations de micromammifères sont fortement dépendantes de l'habitat qui leur est disponible. Une façon efficace de lutter contre ces animaux nuisibles consiste donc à éliminer l'habitat qui leur est favorable par l'emploi de pratiques culturales appropriées (Jacob 2003). Par exemple, les itinéraires techniques intégrant des périodes au cours de l'année où le couvert herbacé est bas ou absent, comme dans le cas du labour des surfaces cultivées, détruisent efficacement l'habitat des micromammifères nuisibles. La destruction du couvert végétal et le laps de temps avant son rétablissement fournissent une fenêtre temporelle au cours de laquelle les micromammifères ont peu de chances de se cacher des prédateurs. Jacob (2003) a observé des diminutions drastiques des populations de micromammifères en champs après le labour. Cette diminution est à la fois bénéfique pour les jeunes arbres et pour les semis.

La prairie et les bandes enherbées représentent un habitat particulièrement propice au développement de grandes populations de micromammifères (Cole et Batzli 1979, Briner et al. 2005). L'utilisation d'herbicides dans la bande non cultivée en association avec des cultures en rangs permettrait de limiter fortement les populations de micromammifères. La limitation de ces

populations est bénéfique aux arbres et aux cultures. Cette stratégie peut être employée pendant les années au cours desquelles les arbres sont vulnérables aux micromammifères. Ces années post-plantation, coïncident avec la période où la compétition des arbres sur les cultures est faible. Ceci assure une récolte acceptable des cultures en rangs susceptibles à cette compétition, comme le maïs. Ainsi, la nécessité d'investir dans une protection physique contre les micromammifères pourrait être évitée dans les cas où il est possible d'adapter l'itinéraire technique à des cultures fournissant un habitat de faible qualité pour ces derniers. Il est à noter que la bande non cultivée ne devrait pas être sous couvert herbacé sans protecteurs sur les arbres puisque les bandes herbacées représentent un habitat favorable (Briner et al. 2005) directement autour des arbres. Il serait plus prudent de traiter la bande non cultivée avec des herbicides ou de la désherber mécaniquement, comme il est recommandé pour le contrôle des micromammifères en verger (Merwin et al. 1995, Merwin et Ray 1999).

Dans le cas d'un système sylvopastoral où les arbres sont plantés directement sur une prairie existante et pâturée par des animaux la même année, les investissements nécessaires à la protection peuvent être très élevés. Divers produits répulsifs ont été testés, dont des abrasifs et répulsifs amers (Eason et al. 1996). Des protecteurs physiques ont aussi été utilisés, certains ayant l'avantage d'améliorer la vitesse de croissance en hauteur et dans une certaine mesure la forme et la structure de l'arbre (Sharrow 2001). La protection contre les ovins n'a guère besoin d'être plus robuste que celle contre les cerfs de Virginie (McAdam 1991). La pose de protecteurs est nécessaire dans les zones à forte densité de cerfs. La plantation d'arbres sur un pâturage de moutons dans de telles zones ne devrait donc pas être plus coûteuse que la plantation d'arbres sur une terre en friche.

Lorsque la question de la plantation d'arbres sur un pâturage de bovins est abordée, il est nécessaire de considérer des protecteurs beaucoup plus robustes. Les divers répulsifs chimiques semblent n'être efficaces que dans certaines situations précises. Eason et al. (1996) soulignent que l'exposition de nouveaux tissus non protégés due à la croissance de l'arbre diminue l'efficacité d'abrasifs appliqués sur la tige principale pour éviter qu'elle ne soit rongée. Les auteurs ont montré des résultats décevants pour le benzoate de denatonium, un répulsif amer systémique. Une réduction significative de la pression de broutage par les ovins et les cerfs a été observée à certaines périodes de l'année, cependant le contrôle ne semblait pas satisfaisant. Lehmkuhler et al. (2003) ont aussi essayé le benzoate de denatonium, cette fois dans de jeunes systèmes sylvopastoraux

intégrant des bovins. Les résultats étaient aussi décevants. Les auteurs mentionnent toutefois la possibilité qu'une application trop tardive de cet agent systémique puisse avoir causé une faible association entre tissus arborés et goût désagréable par les animaux. Le répulsif amer doit donc être appliqué et efficace avant que les animaux n'aient goûté aux arbres.

Il est certain que l'utilisation de répulsifs à pulvériser nécessite une application bien coordonnée dans le temps et possiblement à plusieurs reprises dans l'année. Ceci représente bien sûr un investissement de temps. À cet investissement s'ajoute un certain risque associé à la mauvaise gestion des traitements, causant une efficacité moindre et pouvant mener à l'échec de la plantation.

Les protecteurs physiques semblent donc être une alternative plus fiable, bien qu'ils soient relativement plus onéreux. Lehmkuhler et al. (2003) ont obtenu d'excellents résultats chez les bovins avec l'utilisation d'une clôture électrifiée protégeant l'ensemble de la bande non cultivée. Dans cette étude, l'utilisation de la clôture électrifiée a mené à un taux d'arbres endommagés de moins de 15% contre 70% d'arbres endommagés pour le traitement témoin sans protection et 62% suite à l'usage de répulsifs chimiques (benzoate de denatonium). Balandier et Dupraz (1999) ont décrit l'alternative des tubes protecteurs (Tubex™) utilisés contre les cerfs de Virginie comme risquée contre les bovins. Ces tubes peuvent par ailleurs causer une croissance en hauteur disproportionnée par rapport à celle en diamètre, menant à un arbre à faible résistance contre le vent suite à son retrait. Or, en système sylvopastoral ouvert, la résistance latérale de l'arbre au vent est importante puisque les arbres sont généralement soumis à des stress éoliens considérablement plus élevés qu'en milieu forestier à haute densité d'arbres. Outre les vents, les bovins peuvent se gratter sur les troncs, ce qui peut être fatal pour un arbre peu résistant, considérant le poids des animaux. L'utilisation de clôture électrifiée ou de deux ou trois piquets associés à un fil barbelé serait donc une solution plus appropriée contre les bovins.

Love et al. (2009) ont montré la faisabilité de l'utilisation de haies vives pour protéger les jeunes arbres contre les animaux en milieu tropical. Bien que cette expérience ait été faite dans des conditions différentes des milieux tempérés, il n'est pas impossible qu'une telle stratégie puisse être viable dans certaines situations au Québec. Moisan et al. (2009) ont montré par ailleurs un gain dans la qualité de la structure (rectitude du tronc) et dans la vitesse de croissance en hauteur de feuillus nobles lorsque plantés à proximité d'arbustes. Ce constat n'est pas surprenant,

puisque en termes de succession écologique, la conversion d'un site colonisé d'une flore herbacée vers un peuplement forestier est souvent facilitée par une strate arbustive (Kuiters et Slim 2003). Dans une plantation forestière, la végétation arbustive spontanée peut contribuer au développement d'une forme adéquate des jeunes arbres plantés (Balandier et Dupraz 1999). L'utilisation d'arbustes permettrait par ailleurs d'obtenir plus rapidement les effets brise-vent et d'amélioration du sol escomptés. Les espèces arbustives utilisées dans l'étude de Moisan et al. (2009) étaient l'*Elaeagnus* sp., et l'argousier (*Hyppophae rhamnoides*), tous deux fixateurs de l'azote atmosphérique, ainsi que le saule (*Salix viminalis*). L'espèce qui a le plus stimulé la croissance des feuillus nobles a été l'argousier. Cette espèce est également celle qui a eu le plus faible taux de croissance.

Love et al. (2009) ont identifié les arbustes les plus efficaces à prévenir les dommages aux arbres comme ceux étant les moins consommés par les animaux d'élevage. Bien qu'il y ait eu certains dommages aux arbres dans cette étude, il est estimé que les faibles coûts d'implantation d'un tel système permettent de compenser pour ces pertes par rapport à une implantation avec protecteurs artificiels. L'utilisation d'arbustes apporte néanmoins elle aussi son lot d'inquiétudes dans un champ et leur gestion est quelque peu plus complexe que celle des herbacées puisqu'elle nécessite un équipement spécialisé. Callaway et al. (2005) ont identifié au sein d'un pâturage un effet de protection contre les herbivores d'espèces fourragères appétentes telles que la fléole des Alpes (*Phleum alipnum*) et la flouve odorante (*Anthoxanthum odoratum*) en présence de plantes peu appétentes telles que la luzule des monts (*Luzula pseudosudetica*). Ce phénomène est donc observable autant dans la strate arborée qu'herbacée.

L'analyse globale de la littérature tend à montrer que la plantation d'arbres en pâturages intégrant immédiatement des bovins laisse pour l'instant le choix entre l'utilisation de clôtures électrifiées et de fils barbelés renforcés par des piquets assez solides. Dépendamment de la situation du producteur, l'une ou l'autre de ces solutions peuvent être viables. Il semble qu'il n'existe pas de solution unique et applicable chez tous les producteurs. Les systèmes agroforestiers multifonctionnels doivent s'adapter aux caractéristiques du site et à l'itinéraire technique du producteur agricole, lorsque possible.

Lewis et al. (1983) ont souligné l'intérêt d'un système intégrant les animaux une fois que les arbres ont atteint une taille les rendant moins vulnérables aux animaux. Dans cette étude, les

animaux sont envoyés au pâturage 5 ans après la plantation des pins. À cet âge, les arbres atteignent en moyenne plus de 4 m de hauteur et sont donc à l'abri de dommages majeurs par les bovins. Lehmkuhler et al. (2003) ont montré par ailleurs que l'espèce d'arbre utilisée revêt également une certaine importance. Certaines espèces seraient plus susceptibles que d'autres aux dommages par le bétail. Dans une étude visant à déterminer le niveau de dommage aux arbres subis dans un système sylvopastoral avec feuillus nobles et ovins, Eason et al. (1996) ont démontré que l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*) subissait des dommages de quatre à cinq fois moins importants que le frêne commun (*Fraxinus excelsior*), lorsqu'exposé à la même pression d'herbivorie. Lehmkuhler et al. (2003) ont observé un niveau de dommages significativement plus élevé sur les chênes rouges (*Quercus rubra*) que sur des féviers d'Amérique, des noyers noirs et des pacaniers (*Carya illinoensis*) dans les mêmes conditions au sein d'un système sylvopastoral avec bovins.

Eichhorn et al. (2006) ont décrit la plupart des systèmes agrosylvicoles traditionnels européens. Dans la plupart des modèles, l'itinéraire technique des cultures est modulé selon le stade de développement des arbres. Dans les premières années de la plantation, des céréales sont souvent cultivées dans les entre rangs. Par la suite, des cultures fourragères sont implantées, puis remplacées par des prairies en pâturage au cours des dernières années précédant la récolte des arbres. Une telle progression dans le temps a sans doute été développée afin de maximiser les revenus de la terre tout en minimisant les dépenses associées à la protection des arbres.

## Contrôle de la compétition

Le contrôle de la compétition herbacée ou arbustive est un des facteurs qui affecte le plus fortement le taux de croissance et de survie des jeunes arbres. Rose et Rosner (2005) ont observé une augmentation significative du taux de croissance et une diminution du taux de mortalité de sapins douglas (*Pseudotsuga menziesii*) avec l'augmentation du rayon de répression de la végétation compétitrice de 0 à 3 mètres autour de l'arbre. Il est connu depuis longtemps que la productivité des arbres fruitiers est beaucoup plus élevée et moins gourmande en fertilisants lorsque les mauvaises herbes sont maîtrisées. Albaugh et al. (2003) ont observé un effet additif incomplet de la fertilisation et du contrôle des mauvaises herbes sur la croissance du pin taeda (*Pinus taeda*). Ainsi, dans cette étude, le contrôle des mauvaises herbes et la fertilisation ont apporté tous deux une accélération de la croissance des arbres, mais la combinaison des deux a



causé un effet inférieur à la somme des deux effets isolés. Ceci suggère une compétition par les mauvaises herbes pour les nutriments qui peut être contrôlée de plus d'une façon, soit par la répression des mauvaises herbes ou par la fertilisation. Néanmoins, les mauvaises herbes entrent également en concurrence pour l'eau et l'absence d'un moyen de répression de ces plantes nuisibles peut mener à l'utilisation d'un niveau d'intrants diminuant la rentabilité du système. Aussi la recherche des solutions les plus efficaces et les moins coûteuses pour contrôler les mauvaises herbes sur un rang d'arbres fait-elle l'objet d'expérimentation continue. Parmi les moyens de contrôle figurent les différents paillis vivants et inertes, les herbicides et les méthodes mécaniques de répression des mauvaises herbes.

La lutte chimique à l'aide d'herbicides est souvent l'option de référence en horticulture fruitière lors de comparaisons de différentes méthodes de répression des mauvaises herbes. Elle représente une solution efficace de coût annuel généralement plus faible que la plupart des autres moyens de répression de la végétation herbacée dans une large gamme de situations (Granatstein et Mullinix 2008).

Une grande variété de paillis peut être utilisée dans le but de bloquer physiquement le développement de mauvaises herbes. L'usage de paillis synthétique noir est une option qui a fait ses preuves à maintes reprises. Abouziena et al. (2008) ont montré que l'utilisation d'un paillis de plastique noir est l'option la plus efficace dans la répression des mauvaises herbes et dans l'augmentation des rendements de mandarines en comparaison avec l'usage de paillis organiques ou d'herbicides. Litzow (1983) a classé également le paillis de plastique noir au premier rang dans l'augmentation du taux de croissance de frênes verts (*Fraxinus pennsylvanica*) en comparaison avec divers paillis organiques et un traitement au glyphosate. Il existe une grande variété d'études soulignant l'efficacité du paillis de plastique autant en horticulture qu'en production forestière. Néanmoins, ce produit doit être remplacé périodiquement, n'est pas biodégradable, est généralement plus coûteux que l'alternative des herbicides (Granatstein et Mullinix 2008) et nuit à l'infiltration de l'eau sur la bande arborée en comparaison avec des paillis organiques (Merwin et al. 1995).

L'usage de paillis organiques est une solution d'efficacité variable puisque la composition et l'effet de chaque paillis varient en fonction de la nature du paillis et de sa provenance. L'usage de foin de faible qualité, par exemple, est une solution qui a été utilisée avec des résultats proches

de ceux obtenus avec le paillis de plastique noir par Merwin et al. (1995). Cette option a l'avantage de fournir des nutriments aux arbres au cours de la décomposition du paillis. Par ailleurs, le foin ayant typiquement un rapport C:N plus faible que le bois fragmenté ou les résidus de papiers, les risques de limitation de la croissance dus à l'immobilisation de l'azote sont diminués. La teneur en éléments nutritifs d'un foin de faible qualité peut cependant changer en fonction de sa provenance et de sa composition spécifique. Malgré l'irrégularité des résultats dans le degré de répression, plusieurs paillis inertes organiques sont efficaces dans la répression des mauvaises herbes (Granatstein et Mullinix 2008) et doivent être considérés comme une option à faible coût lorsqu'ils sont disponibles en grandes quantités.

Chacune des options de répression des mauvaises herbes a ses avantages et inconvénients. Il est peu probable qu'une solution unique ne soit adaptable à toutes les situations. Entre autres, la disponibilité de certains paillis en vrac, tels que les résidus de scierie ou le foin de moindre qualité, peut varier d'une région à l'autre. Il est néanmoins peu probable que la tendance générale du prix de ces produits ne baisse alors que la filiale de la bioénergie prend de l'ampleur.

## Espèces arborées

Le choix des espèces arborées les plus appropriées en contexte québécois reste à faire. Il existe notamment un choix à faire entre la production de feuillus nobles et celle de bois à intérêt plus industriel tel que le peuplier hybride, destiné principalement à l'industrie de la pâte et papiers. Les plantations de feuillus nobles sont très rares au Québec. La fertilisation de plantations forestières est une technique susceptible d'accélérer la vitesse de croissance des feuillus nobles (Jacobs et al. 2005) et de résineux (Albaugh et al. 2003).

L'emploi de programmes de fertilisation dans des monocultures de feuillus nobles est cependant une pratique qui présente peu d'avantages au plan environnemental, bien que du point de vue économique cette pratique puisse être intéressante dans certaines situations. Binkley et al. (1999) ont observé une hausse significative de la concentration en nitrate dans les eaux issues du drainage forestier suite à des traitements de fertilisation azotée. L'une des problématiques soulevées par l'étude vient du fait que les eaux de drainage forestier sont typiquement de qualité exceptionnellement élevée et peuvent généralement être utilisées comme source d'eau potable pour les humains et le bétail. La dégradation de ces sources d'eau peut, au-delà de la pollution diffuse

générée, avoir un impact direct sur d'autres activités humaines au sein du bassin versant. En revanche, l'utilisation de feuillus nobles en systèmes agroforestiers permet d'exploiter le potentiel d'augmentation de la vitesse croissance de certaines espèces arborées en réponse à une fertilité accrue du sol, tout en récupérant une fraction de la fertilisation qui échappe aux cultures auxquelles ils sont associés (Cannell et al. 1996). Ceci permet parallèlement d'améliorer la qualité des nappes et des cours d'eau en milieu agricole.

Aux États-Unis, par exemple, il a été montré que les eaux en provenance de systèmes agricoles conventionnels sont en moyenne neuf fois plus concentrées en nitrates que les eaux en provenance d'écosystèmes forestiers (Omernik 1977). Par ailleurs, les zones à plus grand potentiel de production de feuillus nobles sont aussi celles ayant le meilleur potentiel de production de grandes cultures. L'objectif atteignable est un mariage de ces deux productions favorisant à la fois une productivité primaire plus élevée, une empreinte environnementale réduite et une offre stable des produits sur les marchés.

Au Québec, un travail de sélection génétique reste à faire pour améliorer certains traits des feuillus à haute valeur économique. La vitesse de croissance et la résistance aux insectes et maladies sont deux exemples d'importance majeure. La plus grande part de la sélection déjà faite est pour des feuillus à croissance rapide tels que le peuplier, dont la valeur économique du bois est assez faible. Par ailleurs, la sélection a été faite pour la production de biomasse, négligeant les traits génétiques affectant la forme de l'arbre. Le manque d'investissement dans la sélection poussée d'espèces d'arbres appropriées aux systèmes agroforestiers est identifié depuis un certain temps comme un enjeu important auquel il faudrait s'attarder. La problématique soulignée par plusieurs experts concerne l'utilisation de cultivars non adaptés, nécessitant souvent plus d'entretien pour assurer la formation d'une bille de qualité et minimiser les interactions de compétition sur les cultures. Le résultat est l'implantation de systèmes dont les bénéfices réels peuvent s'avérer inférieurs aux bénéfices théoriques de contrôle de l'érosion, de fonctionnement en tant que brise-vent ou de production de bois de qualité qui répond aux normes du marché (Klopfenstein et Kerl 1995). L'utilisation de cultivars d'arbres inappropriés (p. ex. : peuplier hybride) augmente ainsi les investissements nécessaires à structurer l'arbre pour une production de billes de bois de qualité. Des travaux de sélection futurs devraient favoriser un nombre limité d'espèces de feuillus nobles à croissance relativement rapide, adaptés à exploiter un milieu riche en nutriments en conditions de pleine lumière. Ces travaux devraient aussi favoriser les

croisements de descendance développant une structure optimale pour le sciage et déroulage (p. ex. : forte rectitude, faible défilement et forte dominance apicale).

En Nouvelle-Zélande, les programmes de plantation ont beaucoup été axés sur des arbres à croissance rapide, tel que les peupliers hybrides et les pins radiata. Ces essences d'arbres sont faciles à multiplier, s'implantent rapidement, déploient un système racinaire dense et étendu approprié au contrôle de l'érosion et produisent un bois qui peut être utilisé par plusieurs industries en deux à trois décennies (Benavides 2009). Le choix de la Nouvelle-Zélande vers un nombre limité d'espèces mérite d'être discuté.

Considérant l'orientation du présent ouvrage vers l'optimisation de la productivité de l'association entre les arbres et les cultures par l'emploi des bonnes cultures au bon moment, il est approprié de discuter des impacts de la diversité des espèces arborées utilisées en agroforesterie. L'emploi de plus d'une essence de feuillus nobles peut fournir une foule de services écosystémiques, dont l'amélioration de la biodiversité de l'agroécosystème, tout en étant favorable sur le plan de la productivité des arbres. L'importance du maintien d'une certaine diversité en plantations forestières a été montrée à plusieurs reprises, notamment du point de vue des risques d'infestations de divers ravageurs (Bragança et al. 1998, Jactel et al. 2002). Toutefois, il a aussi été montré que les coûts d'exploitation d'un peuplement augmentent avec sa diversité spécifique (Barkaoui et Vaezin 2007). Ceci pourrait être d'une certaine importance en particulier dans les faibles densités caractéristiques de plusieurs systèmes de culture intercalaire et sylvopastoraux, qui varient généralement entre 40 et 400 arbres/ha.

Par ailleurs, un nombre restreint d'espèces utilisées permet de mettre l'accent sur les plus performantes. Les produits forestiers en provenance de systèmes agroforestiers portent des caractéristiques particulières. Par exemple, il est généralement considéré que les arbres en provenance de systèmes agroforestiers affichent un taux de croissance en diamètre supérieur puisqu'ils bénéficient des soins apportés aux cultures et qu'ils se font peu de concurrence entre eux (Rivest et Olivier 2007). Les bénéfices ou désavantages apportés par des cernes plus larges dépendent toutefois largement de l'espèce d'arbre utilisée (Barkaoui et Vaezin 2007).

Les conifères produisent de façon générale un bois de moindre qualité au cours d'une croissance radiale rapide (Jozsa et Brix 1989). Certains feuillus tels que le chêne rouge (Genet et al. 2013) produisent un bois de plus haute densité alors que d'autres, comme l'aulne rouge ou le

peuplier, ne subissent pas de changements dans la densité du bois suite à des traitements augmentant la vitesse de croissance (Lei et al. 1997, DeBell et al. 2002). Plus important encore, la qualité structurelle de plusieurs résineux diminue rapidement alors que la vitesse de croissance augmente ; celle des feuillus tend à être la même ou à être améliorée (Zhang 1995). On peut donc facilement affirmer que les caractéristiques des bois de provenance agroforestière diffèrent passablement de celles des bois forestiers plus conventionnels pour l'industrie de la transformation.

Barkaoui et Vaezin (2007) ont montré que les billes en provenance de peuplements forestiers de faible densité présentaient une valeur inférieure à celles des peuplements de plus haute densité. Les arbres en provenance de peuplements à faible densité développent plus de nœuds problématiques, de défauts de forme tels que les fourches et requièrent généralement plus d'effort d'entretien que ceux se développant dans des peuplements à plus haute densité (Balandier et Dupraz 1999). Ces problèmes sont entre autres dus à une réduction de la dominance apicale. Un programme approprié de taille et d'élagage peut permettre d'obtenir des billes de qualité comparables à celles produites en systèmes forestiers à haute densité, à condition qu'une attention particulière soit apportée à la précocité, la fréquence et la rigueur de l'application de ces interventions.

Les systèmes de culture intercalaire et sylvopastoraux avec feuillus peuvent aussi s'orienter vers la production de bois de trituration ou de bois à des fins énergétiques plutôt que vers une production de billes de qualité destinées à l'industrie du sciage ou du déroulage. Cela dit, les objectifs de production de bois devraient être déterminés avant l'implantation du système, ce qui nécessite une bonne connaissance des marchés du bois et une planification appropriée des ressources nécessaires pour atteindre ces objectifs.

Il existe des systèmes justifiant une utilisation élevée de main d'œuvre tels que les pré-vergers et les exploitations de noyers agroforestiers. Dans ces systèmes, un retour est attendu sous forme de noix ou de fruits avant la récolte du bois et justifie un investissement de main d'œuvre plus élevé dans la taille. Il est incertain qu'un système axé seulement sur la production de bois de qualité ne soit rentable sans l'utilisation exclusive d'espèces performantes. Graves et al. (2007) ont montré qu'en fonction des aides gouvernementales, de la densité d'arbres et de l'espèce d'arbre, la rentabilité des systèmes de culture intercalaire peut facilement basculer d'un bilan positif vers

un bilan négatif. Par exemple, une simulation en France selon les législations en cours avant 2005 place les systèmes de culture intercalaire intégrant le merisier (*Prunus avium*) comme moins rentable que ceux intégrant le noyer noir et le peuplier.

Du point de vue des rendements fourragers, il est aussi intéressant de mentionner que les arbres peuvent contribuer aux rendements totaux par leur propre production fourragère. En effet, certaines espèces d'arbres peuvent produire une certaine quantité de fourrages par leurs fruits ou leurs feuilles, ce qui peut améliorer les rendements fourragers globaux (Addlestone et al. 1999). Plusieurs systèmes agroforestiers traditionnels font usage du potentiel productif des arbres. La *dehesa* espagnole et la *montado* portugaise en sont des exemples éloquents, où les fruits des chênes verts (*Quercus ilex*) et des chênes liège (*Quercus suber*) sont mis en valeur dans l'alimentation des porcs (Moreno et Pulido 2009). En fait, une multitude d'arbres montrent un réel potentiel d'amélioration des rendements fourragers des terres. Parmi ceux utilisables en milieu tempéré figurent différents mûriers (*Morus* sp.), chênes (*Quercus* sp.) et châtaigniers (*Castanea* sp.) (Smith 1953). Ces arbres ont le potentiel de produire une récolte abondante de fruits comestibles pour le bétail, en plus de produire un bois de qualité. Johnson et al. (2013) ont mesuré des rendements moyens de 11,8 kg de matière sèche par arbre par année de gousses sur des féviers d'Amérique (CV. *Millwood*) de 15 ans produits en Virginie. Ceci représente 1180 kg/ha par année de gousses fourragères en assumant une densité de 100 arbres/ha. L'analyse de ces gousses montre une qualité nutritive comparable au grain d'avoine, ce qui laisse croire que cet aliment pourrait remplacer directement une certaine proportion des céréales dans les rations.

Voici un exemple fictif en assumant que les résultats de Johnson (2013) sont directement applicables au Québec. Assumons donc 11,8 kg de fèves par arbre par année pour des arbres de 15 ans. Prenons un éleveur de vache veau possédant 100 ha de sylvopâturages de féviers de 15 ans. Prenons l'exemple de la prairie de St-Paulin (site expérimental de cet essai), dont la productivité fourragère est discutée dans la dernière section de cet ouvrage, en remplaçant les rangées de chêne rouge et de cerisiers tardifs par des féviers greffés à 4 m d'espacement sur le rang. On obtient alors 100 arbres/ha. La moyenne de productivité de l'avoine au Québec est de 1961 kg/ha en 2012 (Financière agricole du Québec 2012), donc environ deux tonnes. En considérant une moyenne de 1180 kg/ha de production de fèves et une réduction de 40 % de la productivité de la prairie, tel qu'observé dans l'étude actuelle avec 200 arbres/ha, notre fermier fictif produirait donc l'équivalent en monoculture de 60 ha de foin et de 60 ha d'avoine sur ses

100 ha. Le potentiel de production, en particulier en considérant le faible besoin de travail du sol d'un tel système, est certes important. Néanmoins, les facteurs limitants de l'exploitation d'arbres fourragers discutés plus haut doivent être considérés.

Les pré-vergers sont un exemple de système traditionnel mettant en valeur des pâturages parsemés d'arbres fruitiers. Dans les climats le permettant, on trouve des noyers (*Juglans* sp.), pruniers (*Prunus* sp.), cerisiers (*Prunus* sp.), poiriers (*Pyrus* sp.) et pommiers (*Malus* sp.). Du sud au nord de l'Europe, la diversité diminue graduellement en faveur du pommier, plus rustique. Ces arbres sont, à l'exception du noyer, des essences d'un intérêt marginal pour leur bois, en particulier lorsque greffés et taillés en vue d'une production fruitière. Les fruits qu'ils produisent sont par contre d'une valeur commerciale élevée et ces terres sont principalement à vocation de production fruitière, par opposition aux pâturages arborés tels que retrouvés en Nouvelle-Zélande qui sont principalement orientés vers la production ovine et bovine. L'effet des arbres sur la production fourragère y est par conséquent peu documenté. Les animaux ont toutefois une influence significative sur l'état sanitaire du verger, non seulement par l'entretien du couvre-sol, mais aussi par leur consommation des fruits. Les fruits qui tombent prématurément sont souvent le résultat d'une infection par un parasite. La larve de l'insecte émerge du fruit tombé pour se métamorphoser en adulte dans le sol ou pour retourner dans l'arbre. La présence d'animaux au pâturage sous les arbres fruitiers permet la consommation immédiate des fruits tombés, brisant ainsi le cycle de certains parasites ayant un impact économique majeur (Alston et al. 2010). Les fruits tombés et consommés par les animaux comblent par ailleurs une partie de leur bilan alimentaire. Le labour automnal des sols en périphérie des arbres fruitiers permet d'enfouir les feuilles tombées, et pourrait diminuer l'inoculum primaire de certains champignons parasites tels que la tavelure du pommier (*Venturia inaequalis*). Vincent et al. (2004) ont montré qu'un simple déchiquetage des feuilles tombées à l'automne suivi d'une application d'urée peut réduire la production d'ascospores au printemps subséquent de 80 à 92%.

Substituer des produits forestiers non ligneux aux céréales, en particulier lorsque présents en grande quantité dans les rations soulève cependant un questionnement quant à la possibilité qu'un aliment nouveau induise un goût particulier, potentiellement indésirable, dans les produits animaux générés. Cette substitution peut néanmoins être positive et aboutir dans le développement d'un produit de niche, comme dans le cas des produits carnés en provenance des porcs alimentés aux glands de chêne au sein de certains systèmes comme la *dehesa* (Moreno et Pulido 2009).

La présence de molécules antinutritives telles que les tanins, présents dans 80% des espèces ligneuses par opposition à seulement 15% des espèces herbacées (Perry 1994), soulève également des inquiétudes. Koukoura et Nastis (1994) montrent que la concentration printanière en tannins dans les feuilles de dix espèces d'arbustes d'intérêt fourrager est de plus du double de celle contenue dans le feuillage de la luzerne pour la même période. La sélection des bonnes génétiques végétales est un facteur d'importance sur ce point. À terme, il est attendu que le producteur agricole pourra récolter les tiges et les vendre. Cependant, le surplus de revenus annuels apporté par la fructification des arbres pourrait très bien être plus intéressant, en particulier par sa constance, que la vente du bois. De telles pratiques agroforestières exploitant des arbres multifonctionnels sont susceptibles de rendre les systèmes sylvopastoraux beaucoup plus intéressants aux yeux des éleveurs.

Deux obstacles majeurs se posent devant l'utilisation des fruits et noix d'arbres plantés en milieu agricole. Le manque de mécanisation de la récolte des fruits est notamment une lacune propre à l'horticulture fruitière en Amérique du Nord. Dans l'éventualité où les arbres ont une double vocation de production de bois de qualité et de fruits, il est nécessaire de planifier une récolte mécanique des fruits, puisque la récolte manuelle est une opération ardue sur des arbres de forte stature. Certains fruits peuvent être détachés des arbres par brassage mécanique puis récoltés au sol, comme les pommes ou les noix du noyer noir. Cette méthode de récolte peut diminuer la qualité des fruits et réduire leur durée de conservation. Il est donc possible que les fruits ainsi récoltés soient réservés à la transformation ou à l'alimentation animale. La récolte de fruits nécessite par ailleurs des passages additionnels de la machinerie et l'acquisition d'un équipement spécialisé. Smith (1953) a rapporté de façon anecdotique que les fèves du févier d'Amérique sont d'un format se prêtant bien aux méthodes normales de récolte du foin par raclage et pressage. Cette affirmation serait toutefois à vérifier. En système sylvopastoral, les animaux peuvent ramasser les fruits au sol eux-mêmes à mesure qu'ils tombent.

L'utilisation des fruits des arbres à leur plein potentiel implique de récolter la plus grande proportion possible des fruits produits consommables et de qualité globale appropriée. Puisque la chute naturelle des fruits est répartie sur une période non négligeable de temps, la gestion de leur récolte risque d'être complexe sans moyen de les faire tomber simultanément, comme par brassage mécanique des arbres.



Le deuxième obstacle de taille à l'exploitation des produits fourragers des arbres est le manque d'efforts en amélioration génétique pour développer des souches performantes en production de fruits ou de feuilles à vocation fourragère. Les variétés et espèces d'arbres disponibles laissent souvent peu de choix à un agriculteur qui verrait un intérêt envers de tels produits agroforestiers. Même dans les systèmes agroforestiers traditionnels les plus répandus sur la planète, comme la *dehesa*, la variabilité dans la production des fruits des arbres est très grande puisqu'essentiellement aucun travail poussé de sélection n'a été fait. Ces systèmes proviennent plutôt d'une simplification de la forêt méditerranéenne d'origine (Vincente et Alés 2006). Les techniques de greffe permettent néanmoins de remplir rapidement un tel manque puisqu'un seul individu exceptionnel suffit à devenir une variété largement répandue.

Il est de circonstance ici de discuter de la viabilité de vergers fourragers. La culture pure d'arbres à vocation fourragère est une entreprise risquée. Une variété de parasites et de maladies peut s'attaquer à chacune des espèces d'arbres à potentiel productif. L'épidémie de chancre du châtaignier (*Cryphonectria parasitica*) ayant décimé les populations de châtaignier d'Amérique (*Castanea dentata*) est un exemple éloquent de la perte d'une industrie par une épidémie fongique. L'adaptation des souches de tavelure du pommier aux cultivars de pommiers surutilisés comme le Macintosh est un autre exemple de maladie due à une faible diversité occasionnant des dépenses colossales en fongicides à l'échelle planétaire. La greffe, bien qu'étant un outil absolument indispensable permettant la domestication de variétés performantes d'arbres, est aussi un formidable réducteur de diversité au sein des cultures arborées. Il est cependant probable que les faibles densités utilisées en systèmes agroforestiers soient salutaires à un usage extensif de cultivars d'arbres fourragers performants, même si la diversité est faible.

Les espèces arborées utilisées pour la production fourragère ou fruitière sont souvent des espèces forestières. Bien que certaines de ces espèces aient montré un potentiel en système agroforestier, d'autres n'y sont pas adaptées puisqu'il ne s'agit pas d'arbres sélectionnés, de façon artificielle ou naturelle, pour atteindre leur plein potentiel au sein d'une prairie. Les espèces ayant le plus de succès en système de culture intercalaire sont souvent des espèces de pleine lumière, pionnières ou mi-successionnelles. Au sein des systèmes de culture intercalaire ou sylvopastoraux les plus performants on retrouve par exemple le noyer noir, le chêne vert et le chêne liège, l'acacia (*Acacia* sp.), le peuplier et différents arbres fruitiers.

Cette réflexion s'appliquant aux arbres s'applique tout autant aux plantes herbacées. Les herbacées cultivées modernes ressemblent parfois très peu à leurs ancêtres sauvages. Le maïs (*Zea mays*), descendant direct des téosintes (*Zea* sp.), en est un exemple frappant. Les travaux de sélection sur les herbacées cultivées ont parfois été réalisés sur de très longues périodes. Si cette sélection a été faite en pleine lumière, la façon dont la plante réagira à l'ombre est incertaine et il est peu probable qu'elle soit optimale.

## Espèces herbacées

Il est impensable de rejeter les systèmes agroforestiers sur la base d'expérimentations montrant une chute de productivité d'espèces de pleine lumière telles que le maïs (Thevathasan et Gordon 2004). L'utilisation de la bonne culture au bon endroit et au bon moment est cruciale à toute pratique agricole. Selon Feldhake et Belesky (2009), le choix de cultures bien adaptées au milieu agroforestier est un critère important de la planification de systèmes agroforestiers.

À mesure que les arbres approchent de la maturité, le programme de rotation de cultures doit être adapté. Certaines plantes cultivées ont montré des rendements réduits en situation de compétition avec des arbres (Ding et Su 2010, Bertomeu 2012). Les plantes en C<sub>4</sub> en général seraient peu intéressantes en situation de compétition modérée à élevée pour la lumière. Ces plantes sont plutôt adaptées à une situation de pleine lumière étant donné leurs adaptations à une température élevée et à leur haut point de saturation lumineuse (Lin et al. 1999, Lin et al. 2001). Par conséquent, l'utilisation de telles espèces devrait être réservée pour les débuts de la plantation agroforestière, alors que l'interception lumineuse par les arbres est faible. Néanmoins, une grande proportion des plantes cultivées sont des plantes en C<sub>3</sub> dont le point de saturation lumineuse est bien en deçà de la pleine lumière solaire. Par conséquent, une certaine proportion de l'énergie lumineuse en monoculture est inévitablement inutilisable.

Au-delà de la recherche d'un rendement maximal, la production en champ vise également l'obtention d'une qualité qui réponde aux besoins des consommateurs. Ainsi, la qualité recherchée dépend du marché visé. En horticulture fruitière, par exemple, l'aspect visuel des fruits est un caractère d'une importance capitale dans l'obtention du marché et du prix de vente désiré. En nutrition animale, les points qualitatifs d'importance des différents aliments disponibles dépendent

de leur aspect nutritif et de leur appétence. La qualité de certains aliments tels que les grains peut être évaluée rapidement par leur aspect visuel de même que par de simples tests tels que leur densité et leur contenu en eau (Commission canadienne des grains 2014). Le grain de maïs, par exemple, est un produit dont la qualité est relativement facile à évaluer, ce qui en fait une production facile à mettre en marché.

Le foin est un exemple de grande culture dont la qualité est complexe à évaluer. Les prairies sont des milieux typiquement plus hétérogènes que les monocultures de grains. Outre les variations à l'échelle du champ, les fourrages montrent de grandes variations qualitatives selon le mode de gestion des prairies. Le moment et la méthode de récolte sont des facteurs pouvant grandement faire varier la qualité d'un fourrage. La gestion de la fertilisation, entre autres l'utilisation de lisiers, peut réduire l'appétence des fourrages sans pour autant affecter négativement toutes les autres variables qualitatives. Par ailleurs, la qualité optimale recherchée dans les fourrages varie selon le marché visé (tableau 1).

Tableau 1: Qualités recherchées du foin selon les débouchés (Conseil québécois des plantes fourragères 2013)

<b>Débouché recherché</b>	<b>Espèces préférées</b>	<b>Qualités recherchées</b>
Chevaux	Fléole au stade mi-épiaison	Fibre, couleur verte, épis, aucune poussière ni moisissure
Bovins laitiers	Luzerne à un stade hâtif	Protéine, énergie
Bovins de boucherie	Mélanges à des stades variés	Fibre, énergie
Ovins	Mélanges à un stade hâtif	Protéine, énergie

Le Québec est un grand producteur et consommateur, de même qu'un exportateur de fourrages. En 2012, les superficies cultivées en prairie au Québec étaient de 753 kha (Institut de la statistique du Québec 2013). 80% de la production fourragère québécoise est consommée à la ferme. Le volume des exportations fourragères est identifié comme ayant un grand potentiel

d'expansion, notamment par l'atteinte des marchés de l'Asie. Il existe donc une demande pour un fourrage de qualité contrôlée.

La production de fourrages lors des stades avancés du système agroforestier est une option intéressante puisque le milieu agroforestier tend à modifier positivement la qualité des fourrages avec des variations acceptables de productivité. Le tableau 2 montre les résultats d'un test de tamisage d'espèces fourragères pour leur productivité en situation de restriction lumineuse. Ce tableau permet de constater la perte de productivité proportionnellement plus élevée observée chez les plantes en C<sub>4</sub>. De tels tests permettent de situer les plantes fourragères les plus appropriées au cours de l'évolution d'un système agroforestier afin d'éviter les associations moins productives.

Les arbres ont un effet non seulement sur l'intensité de la lumière, mais également sur sa qualité, entre autres par le biais de la modification du ratio rouge sur rouge lointain. Ces variables sont modifiées par les arbres en fonction de l'heure du jour, du couvert nuageux et de la période de la saison de croissance (Feldhake et Belesky 2009). Plusieurs études ont montré que les rendements ne diminuent pas toujours proportionnellement à la réduction lumineuse. Feldhake et Belesky (2009) montrent que la plasticité morphologique et physiologique de certaines espèces permet parfois d'obtenir des rendements supérieurs en situation de restriction lumineuse. Par exemple, Lin et al. (2001) ont obtenu des rendements de brome inerme (*Bromus inermis*) de 25% plus élevés à une intensité lumineuse de 50% par rapport à ceux obtenus en pleine lumière. La modification de la qualité et de la quantité de lumière incidente sur les plantes fourragères induit des réponses telles que l'élongation des feuilles et des tiges, la baisse du poids spécifique des feuilles ainsi que des variations dans la production de talles (Belesky 2005). La baisse de lumière incidente diminue la température de la plante, réduisant du même coup l'évapotranspiration en situation d'ombrage modéré (Debruyne et al. 2011). Une certaine réduction de l'évapotranspiration peut également être causée par l'effet brise-vent des arbres. East et Felker (1993) ont observé une hausse de rendements du panic (*Panicum maximum*) et de la sétairie (*Setaria vulpiseta*) sous la canopée de mesquite comparativement à ceux en prairie sans arbre. Ces deux espèces fourragères performant de façon médiocre en situation de pleine lumière malgré une bonne productivité en milieu agroforestier. L'étude suggère que plusieurs espèces fourragères pourraient ainsi être plus performantes en système agroforestier qu'en prairie conventionnelle.

En situation de sécheresse, les arbres peuvent augmenter le taux de survie des herbacées par soulèvement d'une certaine quantité d'eau des horizons inférieurs du sol, auxquels les racines superficielles des herbacées n'ont pas accès. Ce phénomène de facilitation, appelé « ascenseur hydraulique », n'est toutefois pas reconnu pour être capable de compenser la compétition pour l'eau qu'exercent les arbres sur les plantes herbacées (Ludwig et al. 2004). Néanmoins, il pourrait dans certaines situations prévenir la descente du potentiel hydrique du sol sous le point de flétrissement des herbacées, jouant un rôle crucial en situation de sécheresse (Jose et al. 2004). Ce phénomène montre la complexité des interactions arbre-culture et l'alternance possible dans le temps de cycles de compétition-facilitation entre arbres et cultures.

Techniquement, plus les racines des arbres occupent densément la zone colonisée par les racines des herbacées tout en atteignant une source d'eau constante en profondeur avec une certaine proportion de leur système racinaire, plus le potentiel bénéfique de l'ascenseur hydraulique en situation de sécheresse est élevé (Hirota et al. 2004). Cependant, une plus grande colonisation de la même zone par les arbres et les cultures signifie aussi une compétition potentielle plus élevée pour l'eau et les nutriments. Ceci est traduit par une baisse plus rapide de la teneur en eau au début d'un épisode de sécheresse jusqu'à un point critique auquel le phénomène d'ascenseur hydraulique peut jouer un rôle.

Les conditions hétérogènes du milieu agroforestier tendent par ailleurs à induire plusieurs réponses physiologiques de la plante herbacée. Ces changements incluent une surface foliaire augmentée, une plus grande proportion de ressources transférées aux parties aériennes de la plante et des feuilles plus minces et plus larges (Burner et West 2010). Peri et al. (2007) ont mesuré un étiolement et une réduction du tallage de plants de dactyle aggloméré (*Dactylis glomerata*) en pâturage agroforestier (200 arbres/ha) par rapport à un pâturage sans arbres. Ces réponses peuvent tendre à mitiger les effets de la situation de compétition du point de vue de la productivité en plus d'augmenter de façon générale la qualité nutritive des fourrages (Buergler et al. 2005, Belesky et al. 2006).

Tableau 2 : Résultats d'un test de tamisage de plantes fourragères pour leurs différences de productivité suite à la diminution de l'intensité lumineuse (adapté de Lin et al. 1999).

Espèce	Nom français	Plein soleil (g)	50 % ombre (g)	réduction (%)	80 % ombre (g)	réduction (%)
<i>Poa pratensis</i>	Pâturin des prés	12,45	12,3	1,2	8,06	35,3
<i>Dactylis Glomerata</i>	Dactyle aggloméré "Benchmark"	13,83	11,73	15,2	6,36	54,0
<i>Dactylis Glomerata</i>	Dactyle aggloméré "Justus"	11,71	11,16	4,7	9,53	18,6
<i>Lolium perenne</i>	Ray-grass anglais	12,69	11,1	12,5	8,59	32,3
<i>Bromus inermis</i>	Brome inerme	9,61	11,95	-24,3	9,54	0,7
<i>Festuca arundinacea</i>	Fétuque élevée "KY31"	13,28	16,24	-22,3	7,96	40,1
<i>Festuca arundinacea</i>	Fétuque élevée "Martin"	12,36	11,79	4,6	6,09	50,7
<i>Phleum pratense</i>	Fléole des prés	10,23	8,97	12,3	5,49	46,3
<i>Cynodon dactylon</i>	Chiendent pied-de-poule	56,05	37,04	33,9	8,59	84,7
<i>Andropogon gerardii</i>	Barbon de gérard	45,27	33,41	26,2	17,76	60,8
<i>Buchloe dactyloides</i>	Buchloë faux-dactyle	29,86	13,67	54,2	6,12	79,5
<i>Sorghastrum nutans</i>	Herbe des indiens	42,34	30,72	27,4	16,86	60,2
<i>Panicum virgatum</i>	Panic érigé	79,46	57,59	27,5	26,47	66,7
<i>Medicago sativa</i>	Luzerne cultivée "Cody"	6,21	5,31	14,5	3,76	39,5
<i>Medicago sativa</i>	Luzerne cultivée "Vernal"	9,44	7,13	24,5	4,23	55,2
<i>Trifolium hybridum</i>	Trèfle hybride	17,02	9,78	42,5	5,43	68,1
<i>Trifolium alexandrinum</i>	Trèfle d'Alexandrie	15,99	6,95	56,5	2,88	82,0
<i>Lotus corniculatus</i>	Lotier corniculé "Nocern"	15,01	9,83	34,5	5,28	64,8
<i>Lotus corniculatus</i>	Lotier corniculé	19,61	12,65	35,5	5,96	69,6
<i>Trifolium repens</i>	Trèfle blanc	15,98	13,02	18,5	9,45	40,9
<i>Trifolium pratense</i>	Trèfle rouge	19,88	12,08	39,2	5,92	70,2
Moyenne C3		13,46	10,75	16,85	6,53	48,02
Moyenne C4		50,6	34,49	33,84	15,16	70,38

	Plantes en C3
	Plantes en C4

Des expériences de tamisage d'espèces (Lin et al 1999, Lin et al. 2001) et même de cultivars fourragers (Burner et West 2010) ont déjà été réalisées. Les critères de sélection principaux sont la productivité et la qualité du fourrage à l'ombre. Ces expériences sont toutefois souvent réalisées en pots et sous un ombrage artificiel et uniforme. Varella et al. (2011) soutiennent que l'ombre uniforme engendrée par le tissu des ombrières artificielles, associé au manque de compétition racinaire, s'éloigne quelque peu du milieu agroforestier. Des structures d'ombrage artificiel en lattes permettraient de mieux imiter le type de compétition pour la lumière par intermittence créée par une canopée arborée sur des plantes herbacées.

Bien sûr, le fait d'isoler la compétition pour la lumière à l'aide de structures artificielles exclut toute autre forme d'interaction. Les espèces les plus aptes à tirer parti d'un effet brise-vent, d'une pédofaune plus riche et plus diversifiée et d'une stabilisation des conditions édaphiques pourraient être ignorées au profit d'espèces simplement compétitives en milieu ombragé. Il est important de se rappeler qu'un système agroforestier à efficacité maximale cherche à utiliser des espèces complémentaires dans leur utilisation des ressources plutôt qu'une association d'espèces fortement compétitives dans leur milieu optimal respectif. Le but ultime d'un système agroforestier est d'utiliser des ressources qui ne seraient autrement pas utilisées par la culture herbacée seule (Cannel et al. 1996). Malgré les limitations de l'environnement contrôlé, de telles expériences isolant la compétition lumineuse sont un excellent point de départ pour un tri initial des fourrages les plus appropriés. Tel que montré dans le tableau 2, la sélection de variétés fourragères peut faire une différence énorme. Cette différence peut aller de grandes pertes à l'ombre à des situations où la productivité y est accrue.

Dans une situation idéale, chaque espèce herbacée d'importance économique majeure devrait être répertoriée pour sa performance en système de culture intercalaire au Québec. Ceci représente bien sûr un volume colossal d'essais nécessaires. L'étude qui suit propose un essai qui, sans déterminer avec précision la performance d'espèces en particulier, montre le potentiel de performance du point de vue de la productivité et de la qualité de fourrages en milieu agroforestier au Québec.

## Chapitre 2 : Effets des arbres sur le rendement et la qualité des cultures fourragères dans un système de culture intercalaire intégrant des feuillus nobles et des peupliers hybrides

### Résumé

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'impact de peupliers hybrides (*Populus deltoides* x *nigra*, clones DN3570 et DN3333) et de feuillus nobles (*Quercus rubra* et *Prunus serotina*), en situation de fortes densités agroforestières (347 arbres par ha), huit et neuf ans après leur plantation, sur le rendement (2011 et 2012) et la qualité (2012) d'une culture fourragère à différentes positions par rapport aux rangées d'arbres et dans des parcelles témoins. Le fourrage étudié était un mélange de trèfle (*Trifolium repens*) et de fléole des prés (*Phleum pratense*) implanté en 2009. La qualité du fourrage produit a été évaluée par la mesure de la concentration en protéines brutes (PB), en fibres au détergent acide (ADF) et en fibres au détergent neutre (NDF). La qualité a été évaluée selon deux modalités : 1) toutes espèces confondues, et 2) en isolant la fléole des prés. Les résultats ont montré une diminution de productivité de 72 et 27 % à 3,5 et 6 m respectivement des rangées de peupliers en 2011 et de 20 % à 3,5 m des rangées de peupliers en 2012. La productivité à 6 m de la rangée de peupliers en 2012 était égale à celle du témoin sans arbres. Toutes espèces herbacées confondues, une augmentation de la concentration en PB de 33 % et de 14 % a été obtenue à 3,5 et 6 m de la rangée d'arbres, respectivement. Les analyses de la fléole isolée montrent une augmentation de la concentration en PB de 22% et de 26% pour les mêmes distances. Les arbres n'ont eu aucun effet significatif sur la quantité de PB par m<sup>2</sup> ainsi que sur la concentration en fibres ADF et NDF. Les résultats suggèrent que les effets positifs des arbres agroforestiers sur la qualité fourragère peuvent, du moins en partie, compenser leurs effets négatifs sur le rendement fourrager.



## Introduction

L'impact des arbres agroforestiers sur les rendements des cultures est souvent perçu négativement par les producteurs agricoles des zones tempérées (Graves et al. 2009). Plusieurs expérimentations tendent à appuyer ces perceptions, en particulier en situation de forte densité d'arbre et lorsque les arbres se rapprochent de leur maturité. Ding et Su (2010), par exemple, ont observé une diminution de 22 à 27% de rendements de maïs en culture intercalaire avec des peupliers de 10 ans (100 arbres/ha). Ces pertes potentielles de rendements viennent s'ajouter à la perte d'espace cultivé attribuable aux rangées d'arbres. Ainsi, l'un des plus grands défis de la recherche en agroforesterie consiste à développer des systèmes optimisant la valeur économique des produits agroforestiers, en particulier les cultures agricoles.

La productivité peut être définie comme la biomasse récoltable mécaniquement. Beaucoup de travaux ont montré un effet négatif des peuplements agroforestiers sur la productivité fourragère. Benavides et al. (2009) ont mis en évidence des réductions de productivité fourragère de 36% en moyenne par rapport à un témoin sans arbres dans une compilation de dix études ayant mesuré la productivité fourragère en systèmes sylvopastoraux. Kallenbach et al. (2006) ont mesuré une réduction de la production fourragère de l'ordre de 20% au sein d'un système sylvopastoral avec pins et noyers. La cause de la baisse de rendement observée dépend du facteur limitant de la productivité végétale au niveau de la strate herbacée dans le système, ainsi que de l'habileté compétitrice des arbres face aux cultures pour ce facteur limitant. Généralement, la productivité varie selon la distance de la culture par rapport aux rangées d'arbres. McGraw et al. (2008) ont ainsi observé une perte de productivité de la luzerne près des rangées de noyers espacées aux 24 m. Les auteurs n'ont mesuré aucune différence significative entre la productivité au centre des allées cultivées et dans un champ témoin sans arbres.

D'autres travaux ont toutefois montré que les arbres agroforestiers matures, à faibles densités, peuvent avoir des effets neutres, voire positifs, sur les rendements de prairies fourragères (Rivest et al. 2013). Ces effets peuvent être dus à la réduction de certains stress environnementaux subis par les plantes herbacées tels que de forts vents et une intensité lumineuse excessive, ou à des apports au système par les arbres tels que la matière organique ou de l'eau en période de stress par ascension hydraulique. L'hétérogénéité générée par les systèmes agroforestiers fait en sorte

que la direction et la magnitude des interactions arbre-culture varient dans l'espace et dans le temps à l'échelle du système (Scholes et Archer 1997).

Buergler et al. (2005) ont observé que le milieu hétérogène créé par le système agroforestier peut faire évoluer la composition spécifique de la prairie associée aux arbres vers le développement d'une communauté de plantes plus tolérantes à l'ombre, au détriment des espèces héliophiles. Les auteurs soulignent toutefois que le peuplement fourrager peut évoluer différemment en fonction de l'espèce d'arbre et de la densité de plantation. Cette évolution du peuplement fourrager serait davantage bénéfique en système extensif qu'en système intensif, où la prairie est renouvelée fréquemment.

La qualité fourragère peut aussi être modifiée suite à la réponse des plantes fourragères à la présence des arbres, notamment en raison de la diminution de la disponibilité de la lumière et de la température de l'air (Belesky et al. 2006), bien que la modification d'autres variables environnementales puisse avoir un effet non négligeable. La réponse physiologique des plantes cultivées à ces changements environnementaux, qui diffère d'une espèce à l'autre, peut ainsi modifier la qualité des fourrages récoltés. La variable la plus importante qui semble être modifiée par la présence des arbres est la vitesse de maturation des fourrages. Or, cette variable est primordiale en production fourragère puisqu'elle influence la qualité et la productivité fourragère. McGraw et al. (2008) ont observé une diminution du stade de maturité moyen de luzerne en système agroforestier. Cette diminution du stade de maturité peut expliquer les différences de qualité des fourrages obtenus en systèmes agroforestiers pour un même moment dans la saison de croissance. Les plantes fourragères, en particulier les graminées, montrent des analyses plus faibles en protéines brutes (PB) et en digestibilité, conjointement à des concentrations plus élevées de fibres au détergent acide (ADF) et au détergent neutre (NDF) alors que le stade de maturité moyen au champ au moment de la fauche augmente. La teneur de la matière sèche en ADF, NDF et PB constitue un nombre minimal de variables qui estiment bien la qualité d'un fourrage. La fraction ADF comprend en majeure partie la cellulose et la lignine, de même qu'une certaine proportion de protéines. L'ADF est un indicateur de la digestibilité des fourrages. La fraction NDF représente le contenu total en fibres d'un fourrage et est étroitement liée à la prise alimentaire volontaire étant donné la place occupée dans le rumen par cette fraction des fourrages. Le contenu en protéines brutes est une mesure de la quantité d'azote totale contenue dans les fourrages. Un fourrage de maturité moins avancée contient généralement moins de fibres ADF et NDF et plus de PB par

unité de matière sèche. Ceci est souvent associé à une qualité fourragère accrue. La récolte des fourrages à un stade moins avancé est cependant associée à des rendements inférieurs, ce qui pousse à retarder la récolte malgré les pertes de qualité.

La baisse de qualité observée alors que la biomasse augmente provient de l'origine physiologique de chacune des composantes du fourrage. Alors que la fraction NDF et ADF provient des composantes structurelles des plantes, soit principalement les parois cellulaires, la fraction PB provient des composantes métaboliques des fourrages. Lorsque le fourrage gagne en biomasse, une plus grande proportion des ressources doit être investie dans les composantes structurelles (Bélangier et al. 2001). Cette relation limite quelque peu les efforts de sélection combinés de graminées fourragères pour la productivité et la qualité. Dans un essai de cultivars de fléole des prés effectué en Ontario, le rendement du plus productif ne dépassait que de 9% celui du témoin, une variété isolée en 1945 (Comité des plantes fourragères de l'Ontario 1998). La gestion de la date de récolte, en culture sans arbres, est donc le meilleur moyen de contrôle de la qualité de la fléole au champ.

Certaines études ayant mesuré une baisse de rendements des cultures fourragères en système agroforestier ont aussi observé une hausse globale de leur concentration en PB (Peri et al. 2007). Cette hausse de la concentration en PB associée à un retard dans la maturation des fourrages peut également être reliée à une hausse de la disponibilité de l'azote dans les sols aux alentours des arbres. La deuxième cause suppose que la fertilité azotée générale du champ est sous-optimale et que la disponibilité lumineuse est suffisante pour permettre aux plantes fourragères de répondre à une augmentation de la disponibilité de l'azote (East et Felker 1993).

Plusieurs expériences passées ont été orientées vers la productivité et la qualité des fourrages produits dans les systèmes agroforestiers, étant donné l'importance économique que revêt cet aspect de la recherche en agroforesterie. Néanmoins, considérant la grande variabilité spatio-temporelle entre systèmes agroforestiers et au sein d'un même système agroforestier, encore beaucoup de recherche reste à faire dans différents contextes afin de bien comprendre les facteurs déterminants de la production de fourrages en systèmes agroforestiers (McGraw et al. 2008). Certaines connaissances de base propres à la biologie des plantes fourragères offrent des indices pertinents sur leur comportement en système agroforestier.

De manière générale, la productivité et la qualité du foin dépendent étroitement du stade de maturité moyen de la prairie (Buxton et Marten 1989). Les graminées fourragères comme la fléole tendent à perdre en qualité à mesure qu'ils se rapprochent de leur maturité (Collins et Casler 1989). Pour chaque espèce fourragère, la vitesse et l'amplitude de la variation de la qualité diffèrent selon leur stade de maturité. On a aussi démontré que les systèmes de culture intercalaire peuvent diminuer la température de l'air au niveau des plantes cultivées (Peri et al. 2003), ce qui peut diminuer la vitesse de maturation des plantes fourragères et modifier la digestibilité de la matière sèche (Lin et al. 2001). En outre, un stress hydrique modéré permettrait de retarder la maturation des fourrages (Buxton 1996). L'obtention d'une période végétative plus longue chez les plantes fourragères permet d'obtenir de plus grandes quantités de fourrage de qualité. Ainsi, les systèmes de culture intercalaire tendent à produire un fourrage de plus grande qualité (Belesky et al. 2006, Fernandes Sousa et al. 2010). Considérant la grande influence des conditions climatiques sur le moment de récolte, il peut arriver que des périodes de pluies prolongées au moment optimal de la fauche réduisent la qualité globale du fourrage utilisé au cours de l'année. L'utilisation conjointe de champs en prairie agroforestière et de prairies sans arbres pourrait fractionner la période de récolte optimale et offrir une fenêtre temporelle plus large pour la récolte des fourrages à un stade optimal. La capacité de produire différentes qualités fourragères dans des champs autrement similaires peut également permettre de mieux composer les rations des animaux à différents stades de production à partir des aliments produits à la ferme.

L'objectif de la présente expérience était d'évaluer l'impact de peupliers hybrides et de feuillus nobles, huit et neuf ans après leur plantation, sur la variation spatiale du rendement et de la qualité d'une culture fourragère, dans un système de culture intercalaire implanté dans la région de la Mauricie. Nous avons vérifié l'hypothèse qu'une baisse de rendement des cultures fourragères due à la compétition des arbres agroforestiers peut être compensée par une augmentation de sa qualité. Cette augmentation devrait comprendre une augmentation de la concentration en PB ainsi qu'une réduction du ratio ADF/NDF, menant à une valeur alimentaire relative (VAR) plus élevée. Nous émettons l'hypothèse que l'augmentation de la qualité des cultures fourragères à proximité des peupliers à croissance rapide sera plus prononcée que celle à proximité des chênes rouges de vitesse de croissance plus modérée.

## Matériel et méthodes

### Site de l'étude

Le site expérimental est situé à St-Paulin (46° 27' 6" N, 72 ° 59' 26" O) dans la municipalité régionale de comté de Maskinongé, dans la région administrative de la Mauricie, au Québec. Les températures moyennes sont de 19,6 °C en juillet et de -13,2 °C en janvier. La moyenne annuelle de précipitations est de 1087 mm par année (Meteorological Service of Canada 2006). Le sol de la région varie entre un loam limoneux de Pontiac et un loam argileux de Chapeau. Une analyse granulométrique a été réalisée suivant la méthode de Boyoucos (1962) sur des échantillons de sols pris sur le site en 2012. Le sol est un loam sableux (69 % sable, 13 % limon et 19 % argile) et le pH est de 5,5.

Un système de culture intercalaire a été implanté en 2004. La structure de plantation des arbres dans le système est une alternance de rangées monospécifiques de feuillus nobles et de peupliers hybrides à 12 m d'espacement. L'utilisation d'un tel assemblage d'espèces d'arbres vise à mettre à profit les avantages spécifiques à chaque type d'arbres. La croissance rapide des peupliers hybrides permet une production de bois en moins de 20 ans et la formation d'un microclimat favorable à la croissance des feuillus nobles. La répartition temporelle de la récolte des rangées d'arbres vise à minimiser les fenêtres au cours desquelles les arbres apportent une compétition trop intense aux cultures et répartit les revenus sur la durée de la rotation (Rivest et al. 2010).

Les feuillus nobles sont des chênes rouges et des cerisiers tardifs (*Prunus serotina*). Les peupliers hybrides sont des *Populus deltoïdes x nigra* (DN3333 et DN3570). La distance entre les arbres sur le rang est de 2 m pour les peupliers hybrides, de 3 m pour les cerisiers tardifs et de 3 à 4 m pour les chênes rouges. Les rangées d'arbres ont été protégées de la compétition herbacée par des bandes de paillis de plastique de 90 cm de large installées avant la plantation. En 2012, la hauteur des feuillus nobles était de 4,2 m et celle des peupliers de 10,6 m. Une culture fourragère constituée d'un mélange de mil et de trèfle rouge a été implantée en 2009 dans les allées. La prairie sert principalement à fournir du foin de fauche pour la nutrition de chevaux de plaisance. Depuis

l'implantation du site et avant l'implantation de la prairie, diverses cultures annuelles en régie biologique se sont succédées, dont l'avoine, le sarrasin et le canola.

#### Dispositif expérimental et échantillonnage

Le dispositif expérimental est constitué de 4 blocs comprenant une parcelle agroforestière composée de deux rangées de feuillus nobles séparées par une rangée de peupliers (48 à 64 m de longueur x 24 m de large) et une parcelle témoin (48 x 24 m, même régie de culture que dans la parcelle agroforestière). Dans les parcelles agroforestières, le rendement fourrager et un indice de recouvrement des espèces composant la strate herbacée (Braun-Blanquet 1952) ont été mesurés à deux distances de la rangée de peupliers et de celles des feuillus nobles, à 3,5 m et 6 m, ainsi que dans chacune des parcelles témoin. Le fourrage a été récolté avant la première fauche de l'année (15 juillet 2011, 28 juin 2012) par récolte manuelle à 5 cm du sol dans des quadras de 0,25 m<sup>2</sup>. Le fourrage récolté dans chaque quadra a été isolé dans un sac de papier puis séché à 38 °C pendant 14 jours. Le contenu des sacs a ensuite été pesé pour déterminer le rendement en masse sèche.

La concentration en PB, en ADF et en NDF du fourrage a été mesurée à 3,5 m et 6 m des peupliers et dans le témoin. Chacun des échantillons a été divisé en deux parties égales. Une moitié a été broyée puis tamisée (2 mm de maille). La fléole a été séparée de l'autre moitié par tri manuel puis broyée et tamisée. L'analyse des fibres ADF et NDF a été faite en sac ANKOM (ANKOM technology, NY, USA). La concentration en azote total du fourrage a été déterminée par la méthode de Kjeldahl. La concentration en PB a été obtenue par l'utilisation d'un facteur de conversion de 6,25 (AOAC 1995).

La quantité de PB par m<sup>2</sup> a été obtenue en multipliant la concentration en PB par la quantité de fourrage récolté par m<sup>2</sup>. La VAR a été calculée selon la formule suivante (Linn et Martin 1989), qui a été développée pour des ruminants:

$$VAR = \left( (88,9 - 0,779ADF) * \left( \frac{120}{NDF} \right) \right) / 1.29$$

## Analyses statistiques

Les effets de l'environnement (3,5 m, 6 m et témoin) sur le rendement et les différentes variables de qualité fourragère (fibres ADF, fibres NDF, PB et VAR) ont été déterminés par des analyses de variance (ANOVA) distinctes pour chaque type d'arbres, en respectant la structure d'un modèle en blocs complets aléatoires. Un seuil de significativité  $\alpha=0,05$  a été utilisé. Les moyennes ont été comparées entre elles par un test de Tukey. Les analyses statistiques ont été faites avec le logiciel SAS (SAS institute Inc., Cary, NC, USA).

## Résultats et discussion

### Rendement

Les figures 1 et 2 montrent la variation du rendement entre le témoin et le système agroforestier, selon le groupe d'espèces d'arbres. La différence de rendements est plus élevée en 2011. En 2011, les rendements fourragers sont diminués de 72% à 3,5 m de la rangée de peupliers et de 27% à 6 m ( $P<0.001$ ). En 2012, les rendements sont diminués de 20% à 3,5 m de la rangée de peupliers ( $P=0.0043$ ). Le rendement à 6 m ne différait toutefois pas de celui dans le témoin. Les feuillus nobles n'ont eu aucun effet significatif sur les rendements, autant en 2011 ( $P=0,0961$ ) qu'en 2012 ( $P=0.0812$ ). Les mois de juin 2011 et 2012 ont montré une pluviométrie comparable.

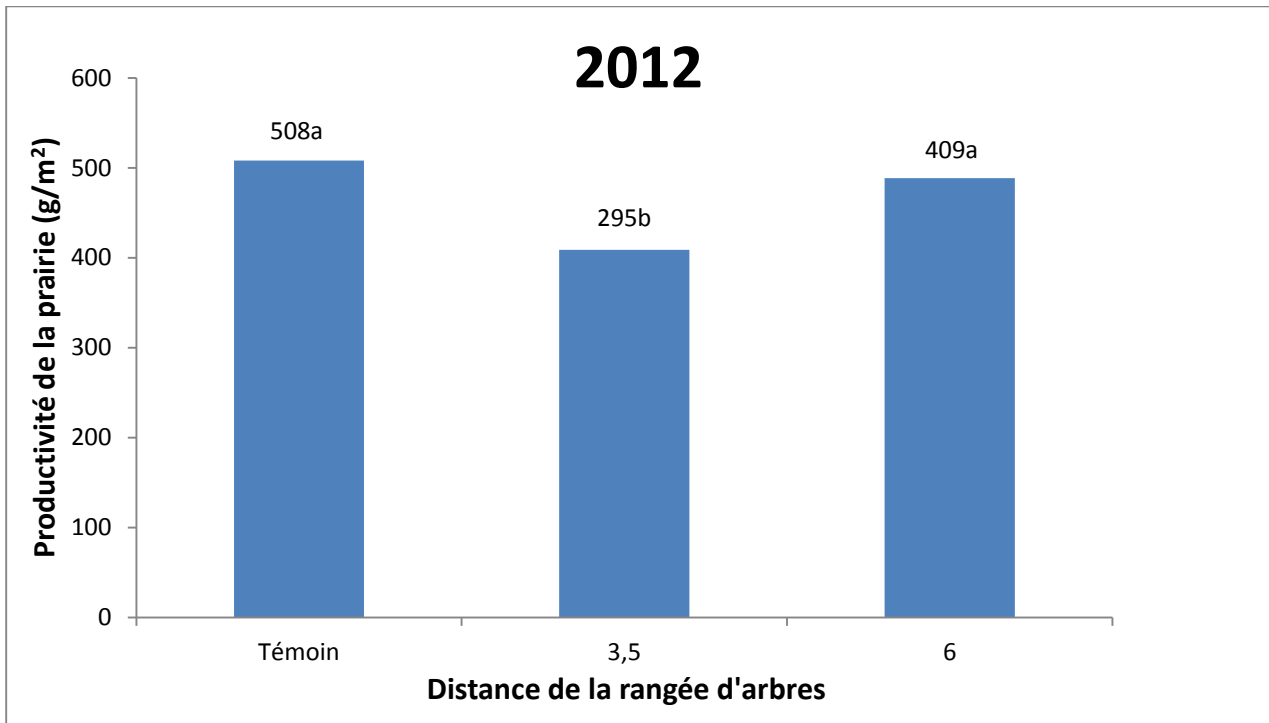
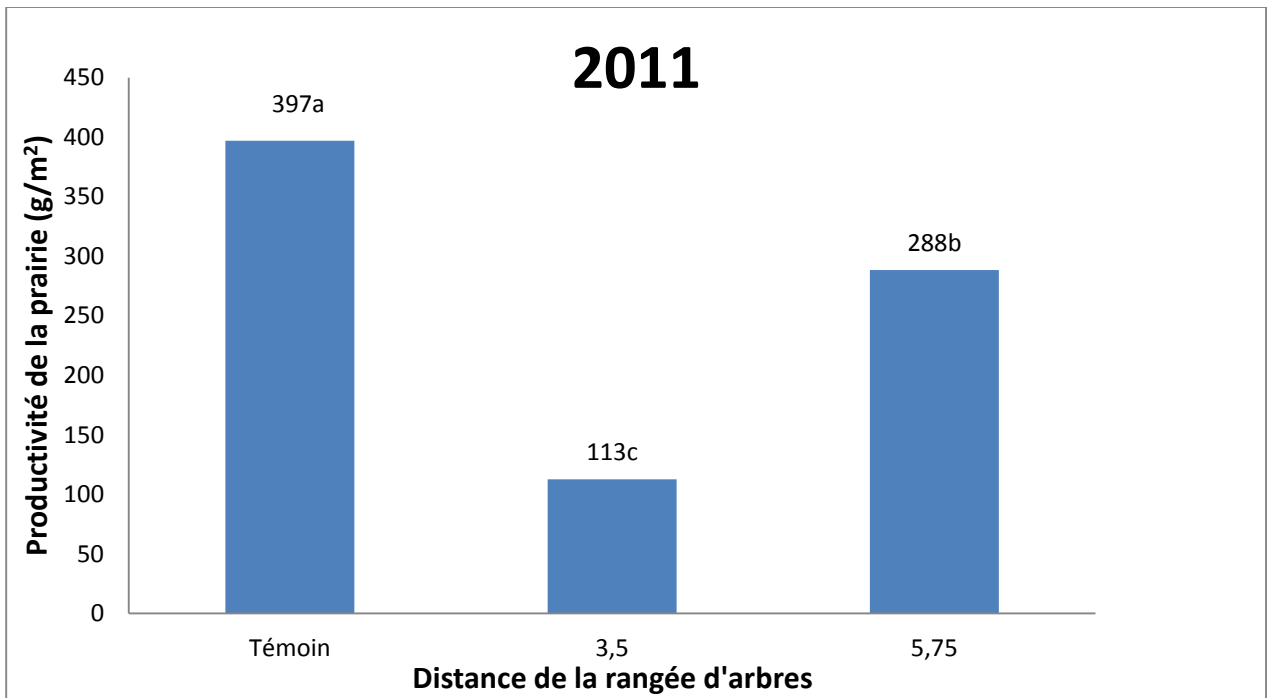


Figure 1: Rendements du fourrage produit dans le système agroforestier de St-Paulin en fonction de la distance de la rangée de peupliers à la première fauche de l'été 2011 et 2012. Les valeurs suivies des mêmes lettres sont égales ( $P \leq 0,05$ ).



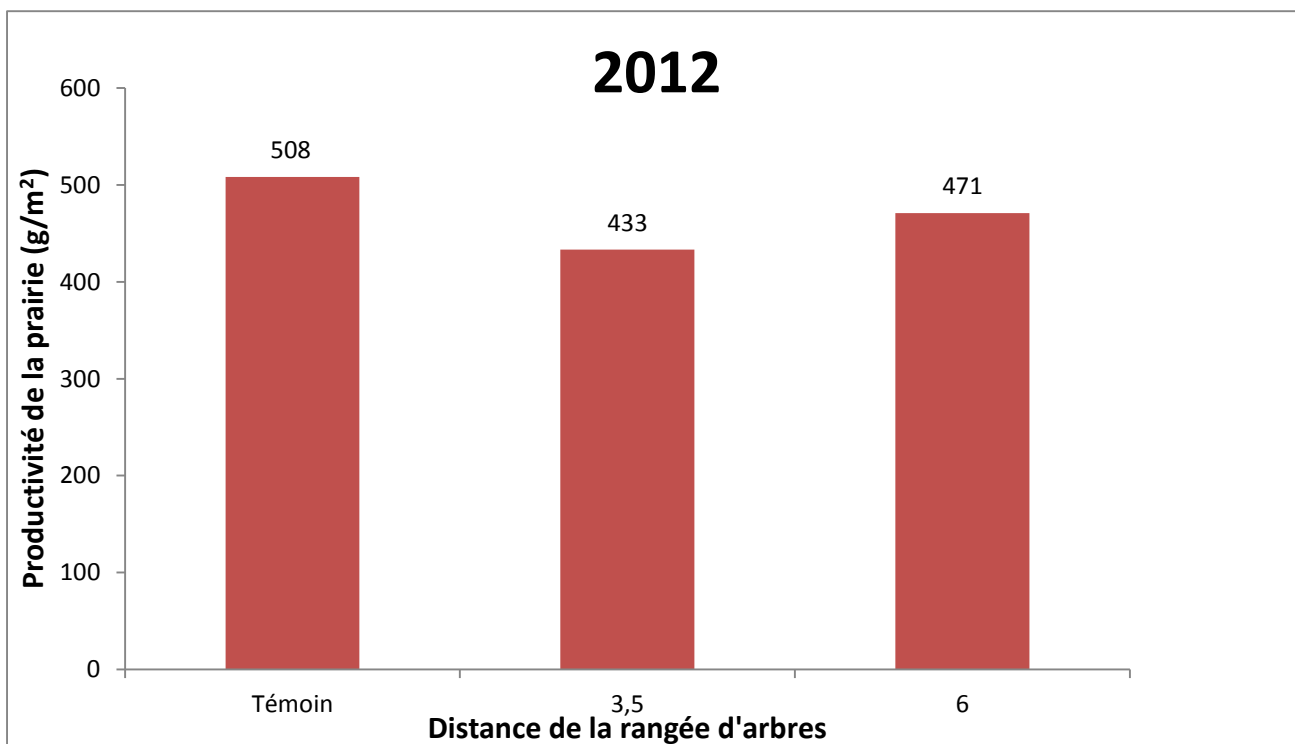
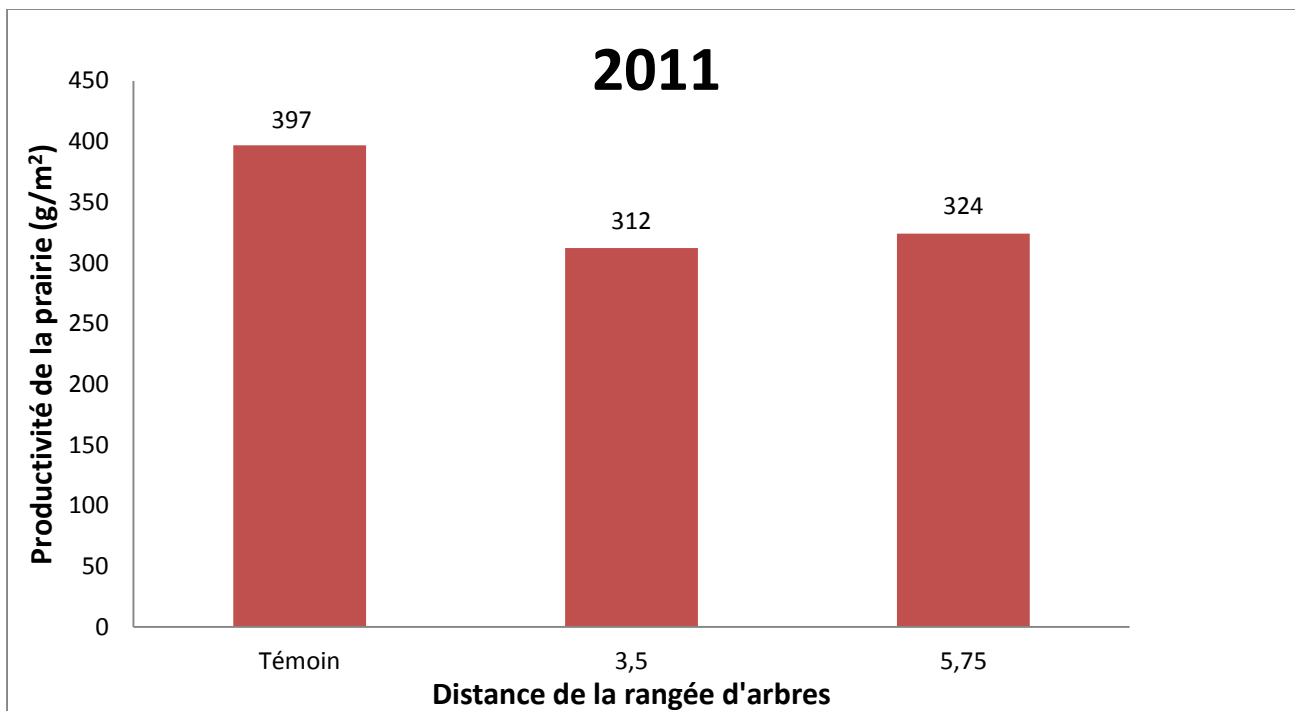


Figure 2: Rendements du fourrage produit dans le système agroforestier de St-Paulin en fonction de la distance de la rangée de feuillus nobles à la première fauche de l'été 2011 et 2012. Aucune différence n'est significative ( $P \leq 0,05$ ).

Il aurait été intéressant de répertorier la biomasse récoltée à la deuxième fauche pour ces années, de façon à explorer les effets de la sécheresse observée au milieu de l'été 2012. Il est important de considérer la variabilité dans la production d'année en année. Celle-ci est d'une importance particulière en élevage. Il pourrait s'avérer une manœuvre intéressante pour l'agriculteur d'augmenter ses superficies cultivées pour compenser la perte de rendements associée aux arbres si ces derniers permettent de stabiliser la récolte d'année en année.

Les résultats ne suggèrent pas une stabilisation dans la variabilité entre les deux années étudiées en système agroforestier, avec une variation moyenne de productivité de 61 % entre 2012 et 2011 près des peupliers pour seulement 22 % dans le témoin. Pour les échantillons pris à proximité des feuillus nobles, la variation de productivité entre les deux années est similaire à celle du témoin. Il est important de considérer que ceci ne représente que la première fauche de l'année sur deux ans, alors l'interprétation des résultats invite à la prudence. Ces derniers sont insuffisants pour tirer une conclusion complète. Par ailleurs, l'influence du stade de maturation dans les rendements de la fléole est telle qu'il est possible que la différence de rendements entre les années ne s'explique que par le stade de maturation moyen. L'envahissement du peuplement fourrager par le chiendent est également un facteur pouvant augmenter les rendements en matière sèche, tout en diminuant largement la qualité fourragère. La stabilisation de la productivité doit être vue sur le long terme et tenir compte des différences météorologiques d'une année à l'autre. Le manque de données suite à l'épisode de sécheresse de 2012 montre l'importance de répertorier de façon régulière la productivité du système agroforestier de St-Paulin dans le but de déterminer l'ampleur de son potentiel de mitigation des aléas climatiques.

Bouttier et al. (2014), dans une étude portant principalement sur les interactions racinaires entre arbres et plantes fourragères réalisée sur le même site la même année, ont estimé que la réduction des rendements observée près des arbres proviendrait principalement de la compétition lumineuse plutôt que de la compétition racinaire. Tel que mentionné précédemment, les différences de rendements causées par une différence dans le stade de maturité moyen peuvent être considérables, selon la transition de stade en cours. Cet élément d'importance capitale au niveau de la productivité et de la qualité fourragère manque à la présente étude de même qu'à l'étude de Bouttier et al (2014). Dans l'intervalle de 8 jours entre le stade épiaison et floraison, Gervais et St-Pierre (1979) ont observé une différence de rendements de 15%. Cette augmentation de rendements est cependant toujours accompagnée d'une perte de digestibilité (augmentation de

l'ADF), d'ingestion volontaire (augmentation de l'NDF) et de teneur en PB. La mesure des rendements seuls n'est pas d'un grand intérêt en production fourragère puisque la qualité optimale et les rendements optimaux ne sont généralement pas atteints aux mêmes stades et sont, par le fait même, mutuellement exclusifs. Une exception notable à ce mécanisme serait le trèfle ladino. Ce dernier ne variant que très peu dans son ratio feuilles/tiges au cours de changements de stade de maturité. Il constituerait l'une des seules plantes fourragères dont l'étude des rendements dans l'abstraction du critère qualité pourrait être pertinente. Une telle plante permettrait donc, dans l'esprit de l'étude de Bouttier et al. (2014), d'identifier une variation de lumière en termes de densité de flux de photons photosynthétiques transmise à la culture, donc de photosynthèse potentielle, comme le facteur limitant la productivité. Ceci diffère d'une variation de lumière limitant simplement l'accumulation de degré-jours au niveau de la plante fourragère, modifiant ainsi la productivité par la limitation de l'avancement du stade de maturité, préservant la qualité au champ. Cette nuance est d'autant plus importante dans un contexte de changements climatiques au sein duquel les températures ambiantes moyennes risquent de changer, sans changement attendu de la densité de flux de photons photosynthétiques.

Dans cette situation, une mesure de la quantité de protéines récoltée par unité de surface (figure 4) est plus révélatrice de la valeur de la production fourragère du champ puisqu'elle prend en compte à la fois la quantité et la qualité du fourrage récolté. La figure 3 illustre bien ce propos. Alors que le taux de PB diminue au cours de l'avancement en stade de maturité de la fléole, la quantité de PB par unité de superficie augmente, puisque la quantité de MS augmente plus rapidement que le déclin en taux de PB et ce, jusqu'au stade optimal de récolte. En visant ce stade optimal, entre l'épiaison et le début floraison, on cherche réellement à obtenir une quantité maximale de PB par unité de surface dans un fourrage de digestibilité acceptable.

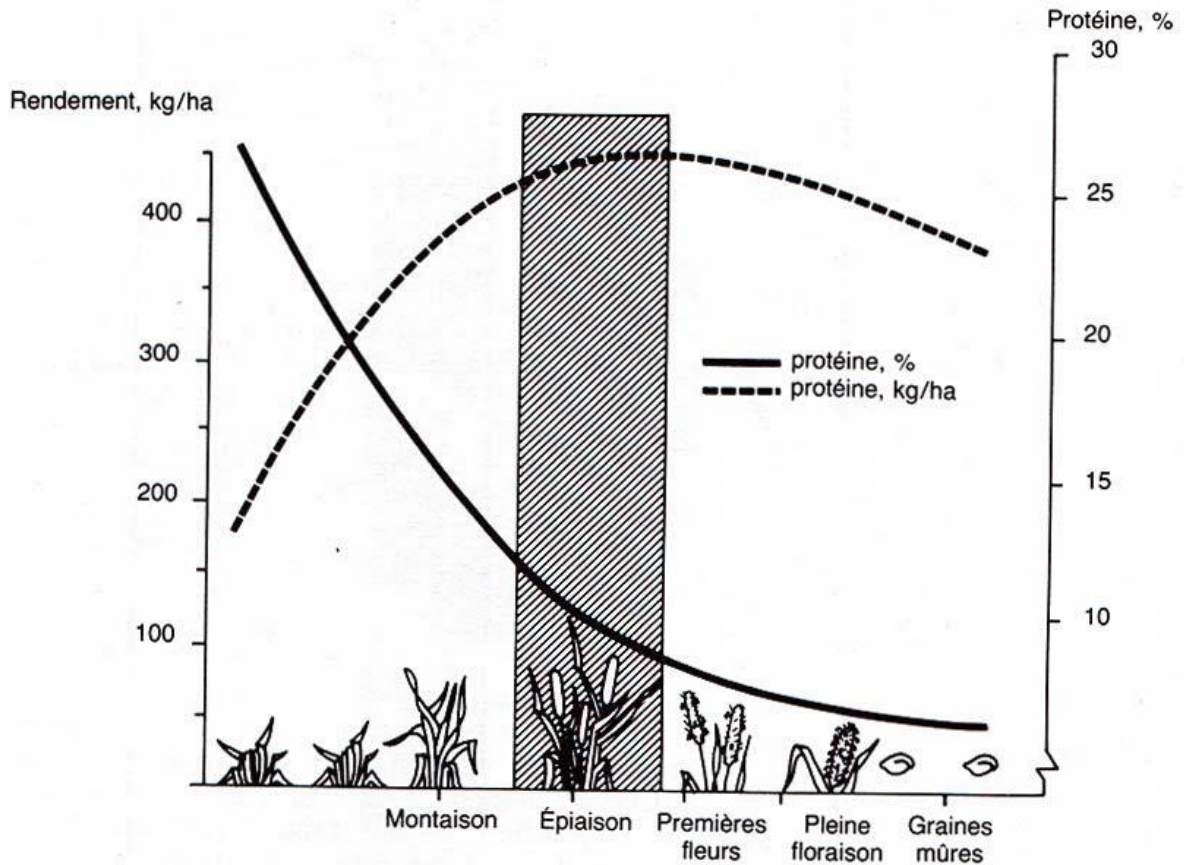


Figure 3 : Influence du stade de maturation de la fléole sur le taux de protéines du fourrage et sur le rendement en protéines par unité de superficie (adapté de CPVQ 1989).

#### Qualité

La figure 4 montre que la teneur en PB du fourrage est plus élevée de 33% à 3,5m des arbres et de 14% à 6m, comparativement à celle dans le témoin ( $P=0,0076$ ). Pour la fléole, cette augmentation de concentration en PB est de 22% à 3,5m et de 26% à 6m ( $P=0.0019$ ). Le fait que la concentration en PB de la fléole soit inférieure à celle du foin (toutes espèces confondues) pourrait être attribuable à une fertilisation limitée de même qu'à une récolte tardive. Plusieurs études montrent que plus la récolte du foin de fléole est tardive, plus la quantité de protéines diminue au profit des fibres (Lingren et Lindberg 1988, Sanderson et Wedin 1989, Nordheim-Viken et al. 2009). Étant donné que ce foin est destiné à la nutrition de chevaux, il est normal que le foin soit récolté plus tardivement puisque la concentration en PB est moins importante.

Christensen et al. (2003) ont montré que la concentration en PB d'un foin de fléole diminue de 11,1 à 7,9% dans l'intervalle de temps couvrant une semaine avant et une semaine après le moment de la récolte commerciale. Ceci fait partie de la réallocation rapide des ressources au moment de la montaison des graminées. La diminution de la température, de la lumière incidente et le stress hydrique modéré possible en système agroforestier sont tous des facteurs pouvant diminuer la vitesse de maturation des fourrages, augmentant leur concentration en protéines par rapport à un fourrage plus avancé dans sa maturation.

Il est probable, considérant les résultats, que la présence des arbres retardant la maturité puisse agrandir la mince fenêtre temporelle où la prairie est au point optimal entre productivité et qualité. Bien que la récolte au moment optimal soit moins importante pour la nutrition équine, les agriculteurs ayant besoin de grandes quantités de foin de bonne qualité tel que les éleveurs de bovins laitiers y sont plus sensibles.

En relation avec le témoin, le fourrage du système agroforestier montrait une teneur en ADF égale ( $P=0,45$ ) et une teneur en NDF égale ( $P=0,1140$ ). La VAR du fourrage produit à 3,5 et 6 m de la rangée de peupliers ne différait pas significativement de celle dans le témoin agricole ( $P=0,57$ ). Selon Lin et al. (2001), la teneur en fibres ADF et NDF augmenterait légèrement ou demeurerait inchangée en système agroforestier. Cette augmentation devrait mener à une diminution de la VAR. Le résultat obtenu, soit une VAR inchangée, combiné à l'augmentation de la teneur en PB en fait un fourrage, en contexte agroforestier, de meilleure qualité pour la nutrition de bovins laitiers. Néanmoins, ce fourrage aurait été récolté plus tôt s'il avait été destiné à la nutrition de bovins laitiers. En assumant que la différence en concentration de PB soit causée par le retard dans la maturité du fourrage en système agroforestier, il est raisonnable d'émettre l'hypothèse que la différence en qualité aurait été encore plus grande si le fourrage avait été récolté quelques jours auparavant. En effet, Waldie et al. (1983) ont montré que plus le foin avance en maturité, plus le taux de variation de la diminution en PB est faible.

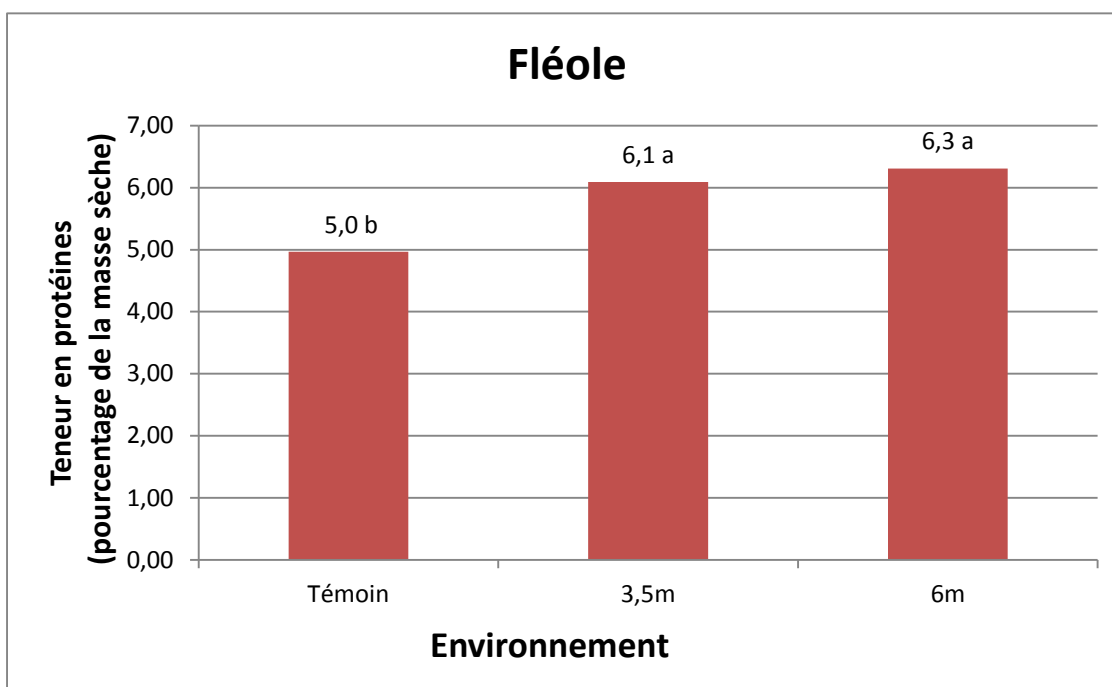
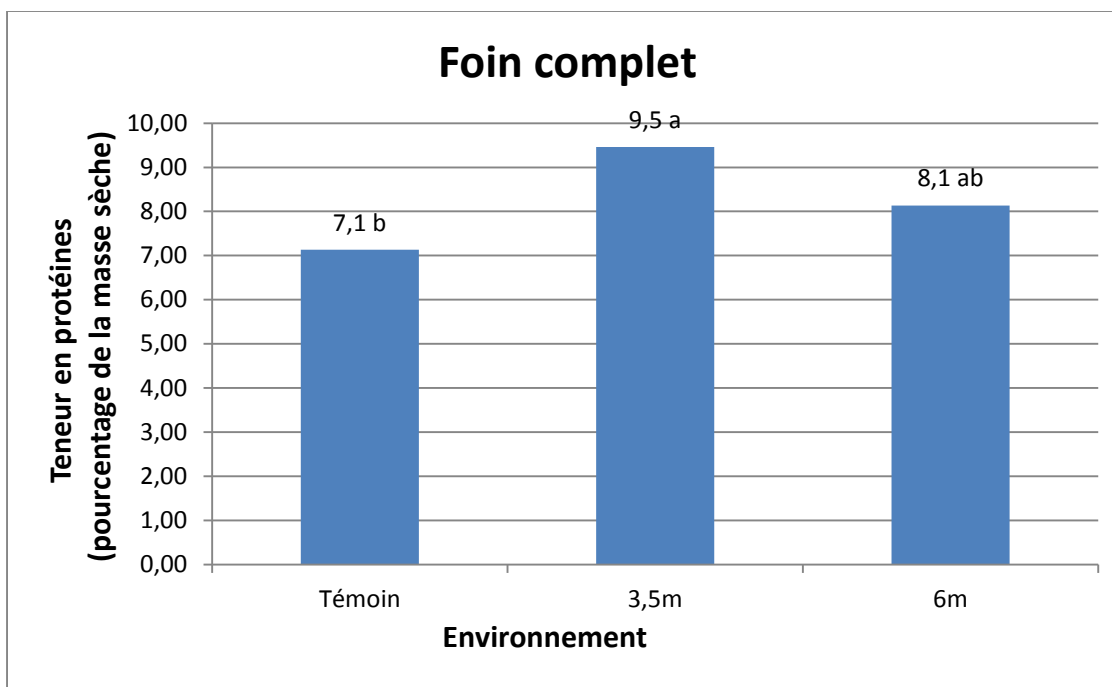


Figure 4 : Teneur en protéine du mélange fourrager et de la fléole isolée produite dans le système agroforestier de St-Paulin en fonction de la distance de la rangée de peupliers à la première fauche de l'été 2012. Les valeurs suivies de la même lettre sont identiques ( $P \leq 0.05$ ).

La figure 3 montre que la quantité de PB par m<sup>2</sup> du fourrage ne diffère pas significativement selon les différents environnements étudiés (P=0.4871). La détermination réelle de la productivité fourragère devient une question d'adaptation aux besoins du producteur. La mesure de productivité la plus importante, protéines ou masse sèche par unité de surface, dépend des besoins du producteur. Ces résultats sont certainement intéressants pour des producteurs laitiers qui accordent une grande importance à la concentration en protéines dans leurs fourrages. Bien que la qualité fourragère soit effectivement meilleure au sein du système agroforestier, elle ne compense pas pour les rendements perdus puisque la VAR et la quantité de PB par m<sup>2</sup> sont les mêmes.

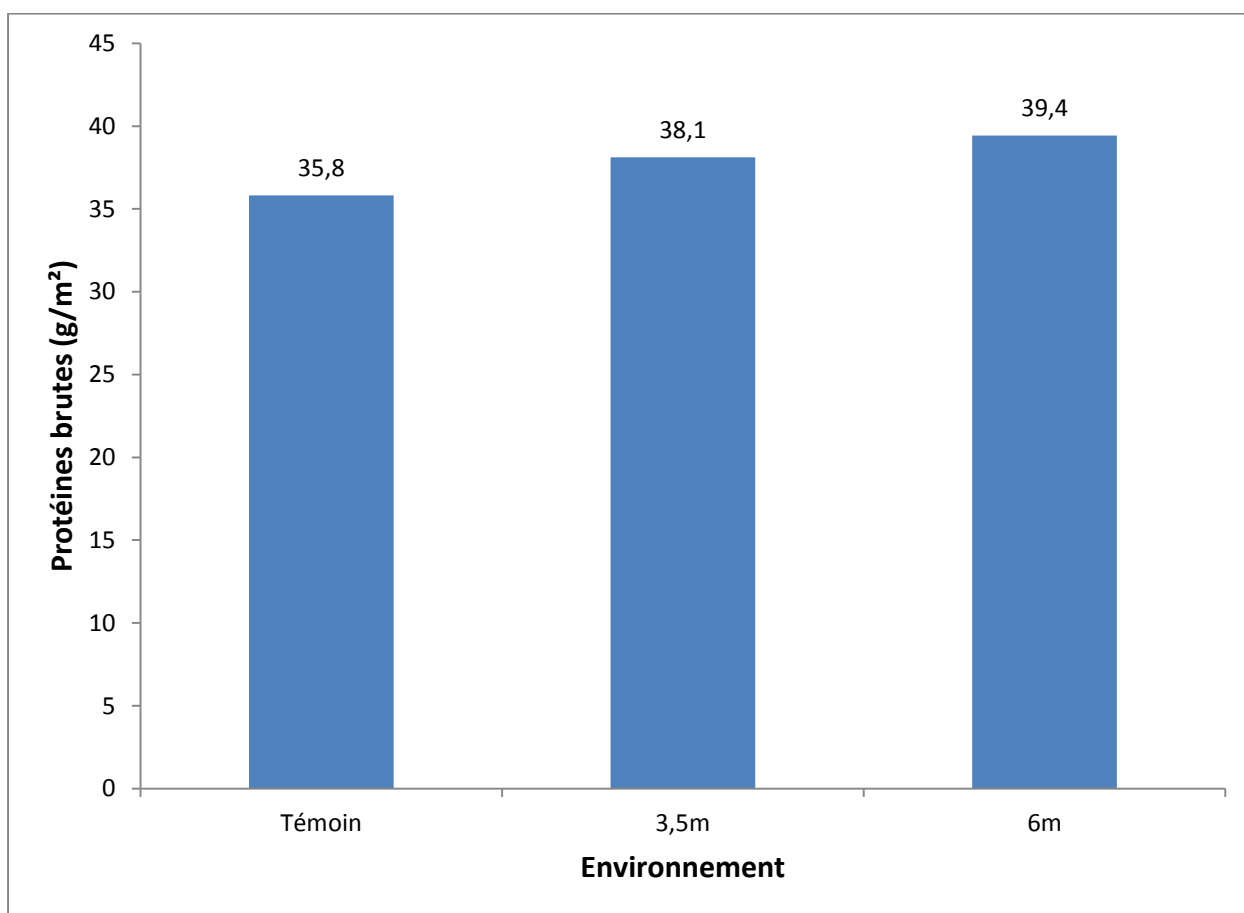


Figure 5 : Moyenne de la quantité de protéines brutes par m<sup>2</sup> du fourrage produit dans le système agroforestier de St-Paulin en fonction de la distance de la rangée de peupliers à la première fauche de l'été 2012.

Un aspect intéressant des résultats de rendement et de qualité fourragère présentés jusqu'à maintenant est que le plein potentiel de la culture intercalaire ne semble pas être atteint. En effet, la figure 1 montre une augmentation significative de la productivité à mesure que l'on s'éloigne de la rangée d'arbres et la figure 2 montre une tendance d'augmentation de la concentration en PB également. Les rangées ne sont pas assez espacées pour que l'on observe un plafond dans la productivité et la qualité.

Le système de culture intercalaire étudié en est un à haute densité d'arbres. Par conséquent, les objectifs de production actuels sont plus axés sur la production de bois. Le contexte du propriétaire gérant ces terres ne lui demande pas de produire de grandes quantités de fourrage de qualité. Un agriculteur priorisant la production herbacée par opposition à celle de bois utilisera un système avec des espacements plus larges entre les arbres, qui pourrait lui permettre d'obtenir les gains de qualité fourragère tout en maintenant une bonne productivité.

Néanmoins, le système de St-Paulin étant dynamique et évoluant dans le temps, les peupliers seront retirés progressivement au cours des prochaines années, une première éclaircie ayant déjà eu lieu en 2012. Une fois les peupliers retirés, le système deviendra une alternance entre des rangées de chênes rouges et de cerisiers tardifs à 24 m d'espacement. Il est probable qu'à ce moment la culture intercalaire sera plus productive et qu'il sera possible de vérifier si l'augmentation de qualité peut compenser pour les pertes de productivité dans un tel système plus ouvert.

Un autre aspect intéressant est la dynamique des populations au sein de la communauté fourragère. La figure 4 montre que le chiendent (*Elytrigia repens*) couvrait de 50 à 75 % de la surface fourragère du témoin en 2012, alors qu'à 3,5 m de la rangée de peupliers, cette proportion était réduite à 25 à 50 %, et ce, sans réduction du recouvrement de fléole. Cette réduction du chiendent semblait plutôt se faire au profit du trèfle blanc. Ceci pourrait en partie expliquer pourquoi la distance de 3,5 m correspond également au point où la qualité fourragère est la plus élevée parmi les distances échantillonnées.



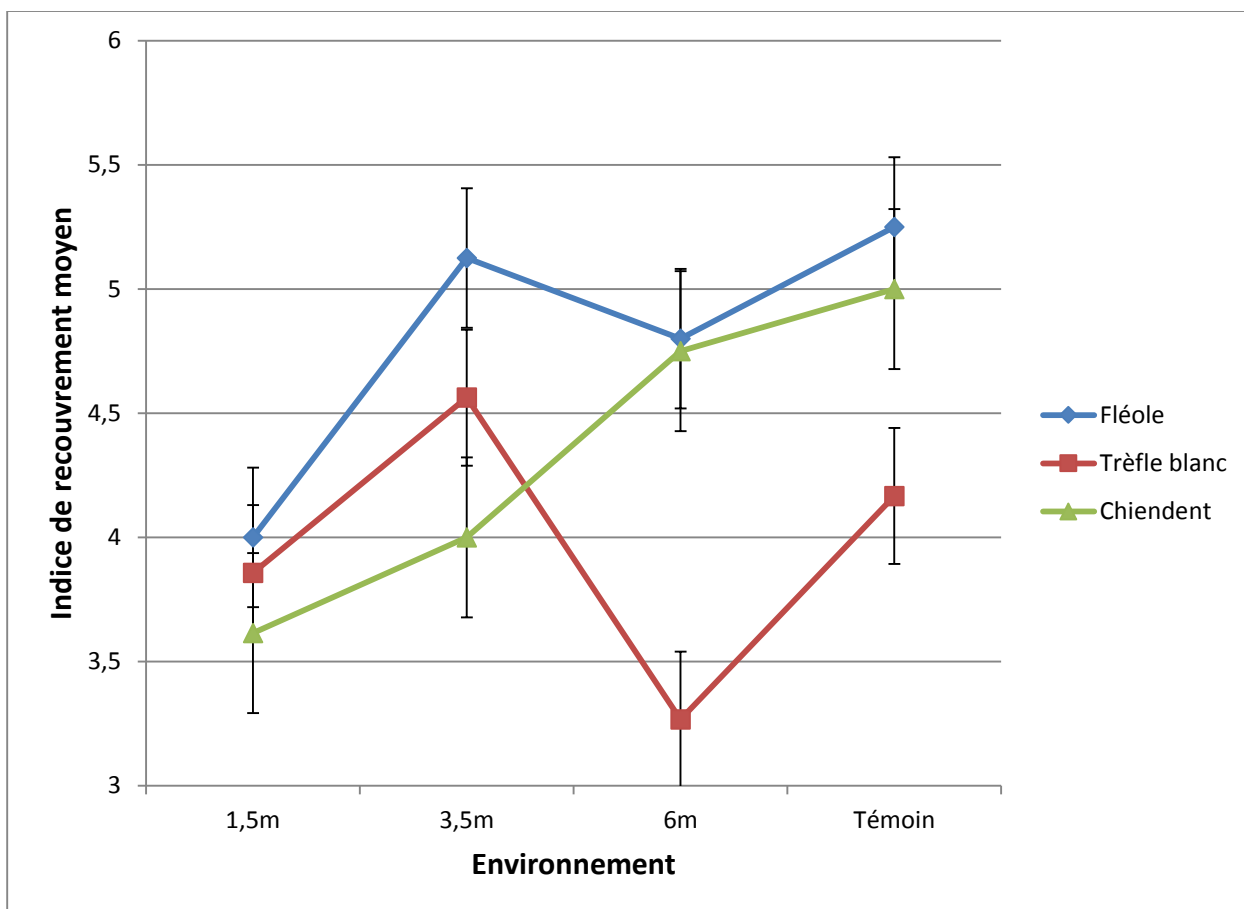


Figure 6 : Indice de recouvrement moyen Braun-Blanquet des deux espèces fourragères majeures et de l'espèce de mauvaises herbes dominante dans la prairie de 2012 en fonction de l'environnement. Les barres représentent l'erreur type. L'environnement est une fonction de la distance en mètres de la rangée de peupliers.

Les fourrages ont montré un potentiel d'augmentation dans leur qualité en système agroforestier avec une augmentation de la concentration en PB, sans toutefois que la VAR diffère significativement, aussi bien pour la fléole ( $P=0,2434$ ) que pour le foin complet ( $P=0,5721$ ). Il est malheureusement impossible de se prononcer sur la productivité de cette dernière espèce puisque, bien qu'elle en soit l'espèce dominante, la proportion de fléole dans le foin dépasse rarement 75%. En effet, bien que la figure 4 ne présente que les indices de recouvrement de trois espèces, soit les deux espèces d'intérêt fourrager et l'espèce de mauvaise herbe dominante, l'analyse du peuplement fourrager révèle la présence fréquente de 13 espèces. Au sein d'un tel peuplement,

l'analyse du rendement fourrager de la fléole, en particulier dans sa compétition avec les espèces arborées, est largement faussée par la compétition imposée par les mauvaises herbes.

Ainsi, la présente étude montre que l'environnement agroforestier est favorable à la qualité fourragère et que l'augmentation de la qualité peut dans une certaine mesure compenser pour les pertes de rendements associées à ce système. Les effets observés peuvent être expliqués par le différentiel de vitesse de maturation du peuplement fourrager entre le système agroforestier et le témoin agricole. Il serait approprié dans de futurs travaux de mesurer le stade phénologique moyen de la fléole afin d'isoler l'effet du retard de maturation des autres paramètres pouvant influencer le rendement et la qualité du fourrage en système agroforestier.

## Conclusion générale

L'analyse de la littérature suggère, tout comme l'expérience réalisée dans le système de culture intercalaire de St-Paulin, qu'il est impossible de prédire avec précision les interactions qui prendront place tout au long du développement d'un système agroforestier de culture intercalaire ou sylvopastoral. L'environnement apporté par les arbres agroforestiers montre un potentiel d'augmentation de la qualité des cultures fourragères. Il semble que le frein principal à la performance de ces systèmes au niveau technique soit le manque de variétés adaptées à ces pratiques, autant chez les arbres que chez les cultures herbacées. L'expérience réalisée montre néanmoins le potentiel de la fléole dans un tel contexte, étant donné sa sensibilité au stade de maturité à la récolte. Il serait intéressant dans les prochaines années de comparer plusieurs variétés de fléole dans l'éventualité où la prairie devrait être renouvelée. Un essai au sein d'une prairie de trèfle blanc ladino serait également intéressant puisque cette espèce est identifiée comme moins sensible au stade de maturité à la récolte. Un tel essai permettrait donc de retirer les effets du stade de maturité pour se concentrer sur les effets des variations de la lumière incidente et des interactions souterraines.

Il serait également intéressant dans les prochaines années de poursuivre l'étude réalisée à St-Paulin dans le but de répertorier les changements dans la concentration en protéines et en rendements en fonction des variations climatiques. L'évaluation du stade végétatif moyen de la fléole aux lieux d'échantillonnage serait un facteur à considérer dans la continuité de l'expérience. Cette intégration de la maturité de la fléole dans les analyses permettrait de déterminer dans quelle mesure les variations de qualité et de rendements sont attribuables à l'effet seul du retard de maturité des plantes fourragères. Par ailleurs, il serait pertinent dans le cadre de recherches futures, de prendre des mesures à la deuxième fauche de l'année, ce qui permettrait notamment d'éliminer l'effet confondant potentiel de la recharge annuelle en eau due aux précipitations hivernales. Enfin, il serait intéressant de mesurer les effets de l'éclaircie des peupliers et de leur coupe finale sur la performance des futures cultures.

## Bibliographie

Abouzenia H.F., Hafez O.M., El-Metwally I.M., Sharma S.D. et M. Singh (2008) Comparison of weed suppression and mandarin fruit yield and quality obtained with organic mulches, synthetic mulches, cultivation, and glyphosate. *HortScience* (43): 795-799

Addlestone B.J., Mueller J.P. et J-M. Luginbuhl (1999) The establishment and early growth of three leguminous tree species for use in silvopastoral systems of the southeastern USA. *Agroforestry Systems* (44): 253-265

Albaugh T.J., Allen H.L., Zutter B.R et H.E. Quicke (2003) vegetation control and fertilization in midrotation *Pinus taeda* stands in the southeastern United States. *Annals of Forestry Science* (60): 619-624

Alston D., Murray M. et M. Reding (2010) Codling moth (*Cydia pomonella*). Utah pests fact sheet, Utah State University Cooperative Extension.

Anel B. (2009) De la multifonctionnalité de l'agriculture à l'agroforesterie : le projet de mise en valeur de l'espace rural de la MRC du Rocher-Percé (février 2005 – août 2009). Réalisations et réflexions. CLD du Rocher-Percé.

Association of Official Analytical Chemists International (1995) Official methods of analysis of AOAC International. AOAC International, ArlingtonBairoch P. (1989) Les trois révolutions du monde agricole développé: rendements et productivité de 1800 à 1985. *Économies, Sociétés, Civilisations*. 44e année no.2: 317-353

Bakker M.M., Govers G., Jones R.A. et Mark D.A.R. (2007) The effect of soil erosion on Europe's crop yields. *Ecosystems* (10): 1209-1219

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

Barkaoui A. et S.M. Heshmatol Vaezin (2007) Estimation de la valeur du bois sur pied par la méthode des prix hédonistes : Application aux ventes d'automne de l'ONF en Lorraine. LEF document no. 2007-02

- Beaudette C., Bradley R.L., Whalen J.K., McVetty P.B.E, Vessey K. et D.L. Smith (2010) Tree-based intercropping does not compromise canola (*Brassica napus* L.) seed oil yield and reduces soil nitrous oxide emissions. *Agriculture, Ecosystems and Environment* (139): 33-39
- Bélanger G., Michaud R., Jefferson P.G., Tremblay G.F. et A. Brégard (2001) Improving the nutritive value of timothy through management and breeding. *Canadian Journal of Plant Science* (81): 577-585
- Belesky D.P. (2005) Growth of *Dactylis glomerata* along a light gradient in the central Appalachian region of the eastern USA: Mechanisms of leaf dry matter production. *Agroforestry Systems* (65): 91-98
- Belesky D.P., Burner D.M. et J.M. Ruckle (2011) Tiller production in cocksfoot (*Dactylis glomerata*) and tall fescue (*Festuca arundinacea*) growing along a light gradient. *Grass and Forage Science* (66): 370-380
- Belesky D.P., Chatterton N.J. et J.P.S. Neel (2006) *Dactylis glomerata* growing along a light gradient in the central Appalachian region of the eastern USA: III. Nonstructural carbohydrates and nutritive value. *Agroforestry Systems* (67): 51-61
- Benavides R., Douglas G.B. et K. Osoro (2009) Silvopastoralism in New Zealand: review of effects of evergreen and deciduous trees on pasture dynamics. *Agroforestry Systems* (76): 327-350
- Benfeldt E.S., Feldhake C.M. et J.A. Burger (2001) Establishing trees in an appalachian silvopasture: response to shelters, grass control, mulch and fertilization. *Agroforestry Systems* (53): 291-295
- Bergeron M., Lacombe S., Bradley R.L., Whalen J., Cogliastro A., Jutras M-F. et P. Arp (2011) Reduced soil nutrient leaching following the establishment of tree-based intercropping systems in eastern Canada. *Agroforestry Systems* (83): 321-330
- Bertomeu M. (2012) Growth and yield of maize and timber trees in smallholder agroforestry systems in claveria, northern Mindanao, Philippines. *Agroforestry Systems* (84): 73-87
- Binkley D., Burnham H. et H. Lee Allen (1999) Water quality impacts of forest fertilisation with nitrogen and phosphorus. *Forest Ecology and Management* (121): 191-213

Bird P.R., Kellas J.D., Jackson T.T. et G.A. Kearney (2010) *Pinus radiata* and sheep production at Cargham, Victoria, Australia. *Agroforestry Systems* (78): 203-216

Bouyoucos G. J. (1962) Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal* (54): 464-465

Bragança M., DeSousa O. Et J.C. Zanuncio (1998) Environmental heterogeneity as a strategy for pest management in *Eucalyptus* plantations. *Forest Ecology and Management* (102): 9-12

Braun-Blanquet J. Roussine N. et R. Nègre (1952) *Les groupements végétaux de la France méditerranéenne*. Édition centre national de la recherche scientifique. Paris, 297p.

Braziotis D.C. et V.P. Papanastasis (1995) Seasonal changes of understorey herbage yield in relation to light intensity and soil moisture content in a *Pinus pinaster* plantation. *Agroforestry Systems* (29): 91-101

Briner T., Nentwig W. et J-P. Airoidi (2005) Habitat quality of wildflower strips for common voles (*Microtus arvalis*) and its relevance for agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment* (105): 173-179

Buergler A.L., Fike J.H., Burger A., Feldhake C.R., McKenna J.A. et C.D. Teutsch (2005) Botanical composition and forage production in an emulated silvopasture. *Agronomy Journal* (97): 1141-1147

Burner D.M. et C.P. West (2010) Improving tall fescue shade tolerance: identifying candidate genotypes. *Agroforestry Systems* (79): 39-45

Buxton D.R et G.C. Marten (1989) Crop quality and utilization: Forage quality of plant parts of perennial grasses and relationship to phenology. *Crop Science* (29): 429-435

Buxton, D.R. (1996) Quality-related characteristics of forages as influenced by plant environment and agronomic factors. *Animal Feed Science and Technology* (59): 37-49

Callaway R.M., Kikodze D., Chiboshvili M. et L. Khetsuriani (2005) Unpalatable plants protect neighbors from grazing and increase plant community diversity. *Ecology* (86): 1856-1862

Campeau S., Prévost L. et T. Rousseau Beaumier (2010) Suivi de 50 cours d'eau à l'aide de l'indice IDEC dans le cadre des Projets collectifs agricoles (PCA). Rapport déposé au ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs dans le cadre des Projets collectifs agricoles (PCA). Université du Québec à Trois-Rivières, Mars 2010, 16p.

Cannell M.G.R., Van Noordwijk M. et C.K. Ong (1996) The central agroforestry hypothesis: the trees must acquire resources that the crop would not otherwise acquire. *Agroforestry Systems* (34): 27-31

Cole F.R., Batzli GO (1979) Nutrition and population dynamics of the prairie vole, *Microtus ochrogaster* in central Illinois. *Journal of Animal Ecology* 48: 455-470

Collins M. et M.D. Casler (1990) Forage quality of five cool-season grasses. II. Species effects. *Animal Feed Science and Technology* (27): 209-218

Commission canadienne des grains (2014) Official grain grading guide. Services à l'Industrie, Canada 542 p.

Comité des plantes fourragères de l'Ontario (2014) Plantes fourragères comportement des cultivars. 4 p.

Conseil québécois des plantes fourragères (2013) Étude stratégique sur le développement du commerce de produits fourragers pour les marchés domestiques et d'exportation. MAPAQ, Québec, Canada 80 p.

CPVQ (1989) Plantes fourragères. 2e édition. Conseil des productions végétales du Québec. AGDEX 120, 249 p.

Cubbage F., Balmelli G., Bussoni A., Noellemeyer E., Pachas A.N., Fassola H., Colcombet L., Rossner B., Frey G., Dube F., Lopes de Silva M., Stevenson H., Hamilton J. et W. Hubbard (2012) Comparing silvopastoral systems and prospects in eight regions of the world. *Agroforestry Systems* (86): 303-314

Daniel T.C., Sharpley A.N. et J.L. Lemunyon (1998) Agricultural phosphorus and eutrophication: a symposium overview. *Journal of Environmental Quality* (27): 251-257

DeBell D.S., Singleton R., Harrington C.A. et Gartner B.L. (2002) Wood density and fiber length in young *Populus* stems: relation to clone, age, growth rate, and pruning. *Wood and Fiber Science* (34): 530-539

DeBruyne S.A., Feldhake C.M., Burger J.A. et J.H. Fike (2011) Tree effects on forage growth and soil water in an Appalachian silvopasture. *Agroforestry Systems* (83): 189-200

Ding S. et P. Su (2010) Effects of tree shading on maize crop within poplar-maize compound system in Hexi Corridor oasis, northwestern China. *Agroforestry Systems* (80): 117-129

- Douglas G. B., Walcroft A.S., Hurst S.E., Potter J.F., Foote A.G., Fung L.E., Edwards W.R.N. et C. Van Den Dijssel (2006) Interactions between widely spaced young poplars (*Populus* spp.) and introduced pasture mixtures. *Agroforestry Systems* (66): 165-178
- Dupraz C. (1999) Adequate desing of control treatments in long term agroforestry experiments with multiple objectives. *Agroforestry Systems* (43): 35-48
- Eason W.R., Gill E.K. et J.E. Roberts (1996) Evaluation of anti-sheep tree-stem-protection products in silvopastoral agroforestry. *Agroforestry Systems* (34): 259-264
- East R. M. et P. Felker (1993) Forage production and quality of 4 perennial grasses grown under and outside canopies of mature *Prosopis glandulosa* Torr. var. *glandulosa* (mesquite) *Agroforestry Systems* (22): 91-110
- 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. et C. Dupraz (2006) Silvoarable systems in Europe – past, present and future prospects. *Agroforestry Systems* (67): 29-50
- Feldhake C.M. et D.P. Belesky (2009) Photosynthetically active radiation use efficiency of *Dactylis glomerata* and *Schedonorus phoenix* along a hardwood tree-induced light gradient. *Agroforestry Systems* (75): 189-196
- Fernandez-Sousa L., Martins M. R., Moreira G. R., Goncalves L.C., Borges I. et L. G. R. Pereira (2010) Nutrition evaluation of “Braquiaraó” grass in association with “Aroeira” trees in a silvopastoral system. *Agroforestry Systems* (79): 189-199
- Financière agricole du Québec (2012) Rendements de reference 2012 en assurance récolte. Direction de la recherche et du développement, La Financière agricole du Québec. Avril 2012. 40p.
- Gaafar A.M., Salih A.A., Luukkanen O., El Fadl M.A. et V. Kaarakka (2006) Improving the traditional *Acacia Senegal*-crop system in Sudan: the effect of tree density on water use, gum production and crop yields. *Agroforestry Systems* (66): 1-11
- Garrett H. E., Kerley M. S., Ladyman K. P., Walter W. D., Godsey L. D., Van Sambeek J. W. et D.K. Brauer (2004) Hardwood silvopasture management in North America. *Agroforestry Systems* (61): 21-33



- Genet A., Auty D., Achim A., Bernier M., Pothier D., et A. Cogliastro (2013) Consequences of faster growth for wood density in northern red oak (*Quercus rubra* Liebl.). *Forestry* (86): 99-110
- Gill R.M.A. (1992) A review of damage by mammals in North temperate forests: 1. Deer. *Forestry* (65): 2
- Goh (2001) Greater mitigation of climate change by organic than conventional agriculture: a review. *Biological Agriculture and Horticulture* (27): 205-230
- Granatstein D. et K. Mullinix (2008) Mulching options for northwest organic and conventional orchards. *HortScience* (43): 45-50
- Graves, A.R., Burgess P.J., F. Liagre, A. Pisanelli, P. Paris, G. Moreno, M. Bellido, M. Mayus, M. Postma, B. Schindler, K. Mantzanas, V.P. papanastasis et C. Dupraz (2009) Farmers perceptions of silvoarable systems in seven European countries. *Advances in Agroforestry* (6): 67-86
- 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. et J.P van den Briel (2007) Development and application of bio-economic modelling to compare silvoarable, arable, and forestry systems in three European countries. *Ecological Engineering* (29): 434-449
- Graves A.R., Burgess P.J., Palma J., Keesman K.J., van der Werf W., Dupraz C., van Keulen H., Herzog F., Mayus M. (2010) Implementation and calibration of the parameter-sparse Yield-SAFE model to predict production and land equivalent ratio in mixed tree and crop systems under two contrasting production situations in Europe. *Ecological Modelling* (221): 1744-1756
- Guevara-Escobar A., Edwards W.R.N., Morton R.H., Kemp P.D. et A.D. MacKay (2000) Tree water use and rainfall partitioning in a mature poplar-pasture system. *Tree Physiology* (20): 97-106
- Guevara-Escobar A., Kemp P.D., MacKay A.D. et J. Hodgson (2007) Pasture production and composition under poplar in a hill environment in New Zealand. *Agroforestry Systems* (69): 199-213
- Gurr G.M., Wratten S.D et J.M Luna (2003) Multi-function agricultural biodiversity: pest management and other benefits. *Basic and Applied Ecology* (4): 107-116

Hahn G.L. (1997) Dynamic responses of cattle to thermal heat loads. *Journal of Animal Science* (77): 10-20

Herzog F. (1998) Streuobst: A traditional agroforestry system as a model for agroforestry development in temperate Europe. *Agroforestry Systems*. (42): 61-80.

Hirota I., Sakuratani T., Sato T., Higuchi H. et E. Nawata (2004) A split-root apparatus for examining the effects of hydraulic lift by trees on the water status of neighbouring crops. *Agroforestry Systems* (60): 181-187

Huot M. et F. Lebel (2012). Plan de gestion du cerf de virginie au Québec 2010-2017, ministère des Ressources naturelles et de la Faune – Secteur Faune Québec, Direction générale de l'expertise sur la faune et ses habitats, 578 p.

Institut de la statistique du Québec (2013) Profil sectoriel de l'industrie Bioalimentaire au Québec. Bibliothèque et Archives Canada. 134 p.

Jacob J. (2003) Short-term effects of farming practices on populations of common voles. *Agriculture, Ecosystems and Environment* (95): 321-325

Jacobs D.F., Salifu K.F. et J.R. Seifert (2005) Growth and nutritional response of hardwood seedlings to controlled-release fertilization at outplanting. *Forest Ecology and Management* (214): 28-39

Jactel H., Goulard M., Menassieu P. et G. Goujon (2002) Habitat diversity in forest plantations reduces infestations of the pine stem borer *Dioryctria sylvestrella*. *Journal of Applied Ecology* (39): 618-628

Johnson J.M.F., Franzluebbers A.J., Lachnicht Weyers S. et D.C. Reicosky (2007) Agricultural opportunities to mitigate greenhouse gas emissions. *Environmental Pollution* (150): 107-124

Johnson J.W., Fike J.H., Fike W.B., Burger J.A., McKenna J.R. Munsell J.F. et S.C. Hodges (2013) Millwood honey locust trees: seedpod nutritive value and yield characteristics. *Agroforestry Systems*, Mars 2013

Jose S., Gillespie A.R. et S.G. Pallardy (2004) Interspecific interactions in temperate agroforestry. *Agroforestry Systems* (61): 237-255

- Jozsa L.A et H. Brix (1989) The effects of fertilisation and thinning on wood quality of a 24-year-old Douglas-fir stand. *Canadian Journal of Forest Research* (19): 1137-1145
- Kallenbach R.L., Kerley M.S. et G.J. Bishop-Hurley (2006) Cumulative forage production, forage quality and livestock performance from an annual ryegrass and cereal rye mixture in a pine-walnut silvopasture. *Agroforestry Systems* (66): 43-53
- Keesman K.J., van der Werf W. et H. van Keulen (2007) Production ecology of agroforestry systems: A minimal mechanistic model and analytical derivation of the land equivalent ratio. *Mathematical Bioscience* (209): 608-623
- Klopfenstein N.B. et J.G. Kerl (1995) The potential of biotechnology in temperate agroforestry practices. *Agroforestry Systems* (32): 29-44
- Koukoura Z. et A. Kyriazopoulos (2007) Adaptation of herbaceous plant species in the understory of *Pinus brutia*. *Agroforestry Systems* (70): 11-16
- Koukoura Z. et A.S. Nastis (1994) Tannin content of selected fodder trees and shrubs and their effects on in-vitro digestibility. *Cahier Options Méditerranéennes* (4): 117-127
- Kuiters A.T. et P.A. Slim (2003) Tree colonisation of abandoned arable land after 27 years of horse grazing: the role of bramble as a facilitator of oak wood regeneration. *Forest Ecology and Management* (181): 239-251
- Larcher F. et J. Baudry (2013) Landscape grammar: a method to analyse and design hedgerows and networks. *Agroforestry Systems* (87): 181-192
- Latendresse C., Jobin B., Maisonneuve C., Sebbane Aissa et M. Grenier (2008) Changements de l'occupation du sol dans le Québec méridional entre 1993 et 2001. *Le Naturaliste Canadien* (134): 14-23
- Lehmkuhler JW, Felton EED, Schmidt DA, Bader KJ, Garrett HE et Kerley MS (2003) Tree protection methods during the silvopastoral-system establishment in Midwestern USA: Cattle performance and tree damage. *Agroforestry Systems* (59): 35-42
- Lei H., Gartner B.L. et M.R. Milota (1997) Effect of growth rate on the anatomy, specific gravity, and bending properties of wood from 7-year-old red alder (*Alnus rubra*). *Canadian Journal of Forest Research* (27): 80-85

- Lewis C.E., Burton G.W., Monson W.G. et W.C McCormick (1983) Integration of pines, pastures, and cattle in south Georgia, USA. *Agroforestry Systems* (1): 277-297
- Lin C. H., McGraw R. L., George M. F., Garrett H. E. (1999) Shade effects on forage crops with potential in temperate agroforestry practices. *Agroforestry Systems* (44): 109-119
- Lin C.H., McGraw R.L., George M.F. et H.E. Garrett (2001) Nutritive quality and morphological development under partial shade of some forage species with agroforestry potential. *Agroforestry Systems* (53): 269-281
- Lindgren, E. et J.E. Lindberg (1988) Influence of cutting time and fertilisation on the nutritive value of timothy, 1: Crude protein content, metabolizable energy and energy value determined in vivo vs. In vitro. *Swedish Journal of Agricultural Research* (18): 77-83
- Linn, J. G. et N. P. Martin (1989). Forage quality tests and interpretation. Univ. of Minnesota Ext. Ser. Publ. AG-FO-2637. University of Minnesota, St. Paul
- Love B.E., Bork E.W. et D. Spaner (2009) Tree seedling establishment in living fences: a low cost agroforestry management practice. *Agroforestry Systems* (77): 1-8
- Liotzow M. et H. Pellet (1983) Influence of mulch materials on growth of green ash. *Journal of Arboriculture* (9): 7-11
- Ludwig F., Dawson T.E., Prins H.H.T., Berendse F. et H. de Kroon (2004) Below-ground competition between trees and grasses may overwhelm the facilitative effects of hydraulic lift. *Ecology Letters* (7): 623-631
- 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. *Agroforestry Systems* (43): 243-256.
- Matthews S., Pease S.M., Gordon A.M. et P.A. Williams (1993) Landowner perceptions and the adoption of agroforestry practices in southern Ontario, Canada. *Agroforestry Systems* (21): 159-168
- McAdam J.H. (1991) An evaluation of tree protection methods against Scottish Blackface sheep in an upland agroforestry system. *Forest Ecology and Management* (45): 119-125
- McGraw R. L., Terrell Stamps W., Houx J. H. et M.J. Linit (2008) Yield, maturation and forage quality of alfalfa in a black walnut alley-cropping practice. *Agroforestry Systems* (74): 155-161

Mead R. et R.W. Willey (1980) The concept of a land equivalent ratio and advantages in yields from intercropping. *Experimental Agriculture* (16): 217-228

Merwin I.A. et J.A. Ray (1999) Orchard groundcover management systems affect meadow vole populations and damage to apple trees. *Hortscience* (34): 271-274

Merwin I.A., Rosenberger D.A., Engle C.A., Rist D.L. et M. Fargione (1995) Comparing mulches, herbicides and cultivation as orchard groundcover management systems. *HortTechnology* (5): 2

Moisan, C., L. Bouttier, M.-È. Payeur, S. Daigle et A. Cogliastro (2009) Plantations mélangées pour accompagner le feuillu noble. Présenté au ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec. Programme de mise en valeur des ressources du milieu forestier – Volet II. Projet 16-2008-07. Institut de Recherche en Biologie Végétale. 98 p.

G. Moreno et F.J. Pulido (2009) The Functioning, Management and Persistence of Dehesas. *Agroforestry in Europe: Current Status and Future Prospects*. Springer. 455p.

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 and Soil* (281): 71-85

Munoz F. et J. Beer (2001) Fine root dynamics of shaded cacao plantations in Costa-Rica. *Agroforestry Systems* (51): 119-130

Nissen T.M et D.J. Midmore (2002) Stand basal area as an index of tree competitiveness in timber intercropping. *Agroforestry Systems* (54): 51-60

Nordenstahl M., Gundel P. E., Clavijo M. P. et E.G. Jobbagy (2011) Forage production in natural and afforested grasslands of the pampas: ecological complementarity and management opportunities. *Agroforestry Systems* (83): 201-211

Nordheim-Viken, H., Volden, H. et M. Jorgensen (2009) Effects of maturity stage, temperature and photoperiod on growth and nutritive value of timothy (*Phleum pratense* L.) *Animal Feed Science and Technology* (152): 204-218

Omernik J.M. (1977) Nonpoint source-stream nutrient level relationships: a nationwide study. US Environmental Protection Agency Report EPA-600/3-77-1056. Corvallis, OR.

Painchaud J. (1997) *La qualité de l'eau des rivières du Québec : état et tendances*, ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction des écosystèmes aquatiques, Québec, 58 p.

- Pandey C. B., Verma S. K., Dagar J. C. et R.C. Srivastava (2011) Forage production and nitrogen nutrition in three grasses under coconut tree shades in the humid tropics. *Agroforestry Systems* (83): 1-12
- Peichl M., Thevathasan N.V., Gordon A.M., Huss J. et R.A. Abohassan (2006) Carbon sequestration potentials in temperate tree-based intercropping systems, southern Ontario, Canada. *Agroforestry Systems* (66): 243-257
- Peri P.L., Lucas R.J. et D.J. Moot (2007) Dry matter production, morphology and nutritive value of *Dactylis glomerata* growing under different light regimes. *Agroforestry Systems* (70) 63-79
- Peri P.L., Moot D.J. et D.L. McNeil (2003) An integrated model for predicting maximum net photosynthetic rate of cocksfoot (*Dactylis glomerata*) leaves in silvopastoral systems. *Agroforestry Systems* (58): 173-183
- Perry D.A. (1994) *Forest ecosystems*. Johns Hopkins University Press, Baltimore, MD/London
- Pollock K. M., Mead D. J. et B. A. McKenzie (2009) Soil moisture and water use by pastures and silvopastures in a sub-humid temperate climate in New Zealand. *Agroforestry Systems* (75): 223-238
- 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.
- 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. *Ecological Engineering* (29): 362-371
- Rivest D. et A. Olivier (2007) Cultures intercalaires avec arbres feuillus: quel potentiel pour le Québec? *The Forestry Chronicle* (83): 526-538
- Rivest D., Cogliastro A., Bradley R. L. et Olivier A. (2010) Intercropping hybrid poplar with soybean increases soil microbial biomass, mineral N supply and tree growth. *Agroforestry Systems* (80): 33-40
- Rivest D., Paquette A., Moreno G. et C. Messier (2013) A meta-analysis reveals mostly neutral influence of scattered trees on pasture yield along with some contrasted effects depending on functional groups and rainfall conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment* (165): 74-79

- Robertson G.P., Paul E.A., Harwood R.R. (2000) Greenhouse gas in intensive agriculture: Contributions of individual gasses to the radiative forcing of the atmosphere. *Science* (289): 1922-1925
- Rose R. et L. Rosner (2005) Eight-year response of Douglas-fir seedlings to area of weed control and herbaceous versus woody weed control. *Annals of Forest Science* (62): 481-492
- Rowe E.C., Hairiah K., Giller K.E., Van Noordwijk M. et G. Cadisch (1999) Testing the safety-net role of hedgerow tree roots by <sup>15</sup>N placement at different soil depths. *Agroforestry Systems* (43): 81-93
- Sanderson M.A. et W.F. Wedin (1989) Phenological stage and herbage quality relationships in temperate grasses and legumes. *Agronomy Journal* (81): 864-869
- Scholes R.J. et S.R. Archer (1997) Tree-grass interactions in savannas. *Annual Review of Ecology and Systematics* (28): 517-544
- Scroth G. (1995) Tree root characteristics as criteria for species selection and systems design in agroforestry. *Agroforestry Systems* (30): 125-143
- Sharrow S.H. (2001) Effects of shelter tubes on hardwood tree establishment in western Oregon silvopastures. *Agroforestry Systems* (53): 283-290
- Smith D.M., Jackson N.A., Roberts J.M. et C.K. Ong (1999) Root distribution in a *Grevillea robusta*-maize agroforestry system in semi-arid Kenya. *Plant and Soil* (211): 191-205
- Smith P., Martino D., Cai Z., Gwary D., Janzen H., Kumar P., McCarl B., Ogle S., O'Mara F., Rice C., Scholes B., Sirotenko O., Howden M., McAllister T., Pan G., Romanenkov V., Schneider U., Towprayoon S., Wattenbach M. et J. Smith (2008) Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, Vol. 363, Sustainable Agriculture (2): 789-813
- Smith R.J. (1953) *Tree crops: a permanent agriculture*. Devin-Adair company, New-York, 408p
- Stigter C.J., Dawei Z., Onyewotu L.O.Z. et M. Xurong (2005) Using traditional methods and indigenous technologies for coping with climate variability. *Climatic Change* (70): 255-271
- Sullivan T.P. et D.S. Sullivan (2010) Forecasting vole population outbreaks in forest plantations: the rise and fall of a major mammalian pest. *Forest Ecology and Management* (260): 983-993

- Thevathasan N.V. et A.M. Gordon (2004) Ecology of tree intercropping systems in the North temperate region: Experiences from southern Ontario, Canada. *Agroforestry Systems* (61): 257-268
- Tsonkova P., Bohm C., Quinkenstein A., Freese D. (2012) Ecological benefits provided by alley-cropping systems for production of woody biomass in the temperate region: a review. *Agroforestry Systems* (85): 133-152
- Tully K.L., Lawrence D. et T.M.Scanlon (2012) More trees less loss: Nitrogen leaching losses decrease with increasing biomass in coffee agroforests. *Agriculture, Ecosystems and Environment* (161): 137-144
- Van Noordwijk M. et B. Lusiana (1999) WaNuLCAS, a model of water, nutrient and light capture in agroforestry systems. *Agroforestry Systems* (43): 217-242
- Vanlawe B., Akinnifesi F.K., Tossah B.K., Lyasse O., Sanginga N. et R. Merckx (2002) Root distribution of *Senna siamea* grown on a series of derived-savanna-zone soils in Togo, West Africa. *Agroforestry Systems* (54): 1-12
- Varella A.C., Moot D.J., Pollock K.M., Peri P.L. et R.J. Lucas (2011) Do light and alfalfa responses to cloth and slatted shade represent those measured under an agroforestry system? *Agroforestry System* (81): 157-173
- Vincent C., Rancourt B. et O. Carisse (2004) Apple leaf shredding as a non-chemical tool to manage apple scab and spotted tentiform leafminer. *Agriculture, Ecosystems and Environment* (104): 595-604
- Vincente A.M. et R.F. Alés (2006) Long term persistence of dehesas. Evidences from history. *Agroforestry Systems* (67): 19-28
- Waldie G., Wright S.B.M. et R.D.H. Cohen (1983) The effects of advancing maturity on crude protein and digestibility of meadow foxtail (*Alopecurus pratensis*) and timothy (*Phleum pratense*). *Canadian Journal of Plant Science* (63): 1083-1085
- Wang Y., Zhang B., Lin L. et H. Zep (2011) Agroforestry system reduces subsurface lateral flow and nitrate loss in Jiangxi Province, China. *Agriculture, Ecosystems and Environment* (140): 441-453



Wan C., Xu W., Sosebee R.E., Machado S. et T. Archer (2000) Hydraulic lift in drought tolerant and -susceptible maize hybrids. *Plant and Soil* (219): 117-126

Wollenweber B., Porter J.R. et J. Schellberg (2003) Lack of interaction between extreme high temperature events at vegetative and reproductive growth stages in wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science* (189): 142-150

World Agroforestry Center (2007) China-Agroforestry program. Strategic framework and medium term plan 2008-2012. Beijing. 44p.

Williams P.A. et A.M. Gordon (1992) The potential of intercropping as an alternative land use system in temperate North America. *Agroforestry Systems* (19): 253-263

Zhang S.Y. (1995) Effect of growth rate on wood specific gravity and selected mechanical properties in individual species from distinct wood categories. *Wood Science and Technology* (29): 451-465