

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN OUTAOUAIS

INTERACTIONS ÉCOLOGIQUES EN SYSTÈMES
AGROFORESTIERS INTERCALAIRES

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAITRISE EN BIOLOGIE
EXTENSIONNÉE DE
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

PAR
MAXIME CARRIER

MAI 2018

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.07-2011). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Le développement de mon mémoire est présenté sous la forme d'article scientifique rédigé en français. Il présente des résultats issus de mesures sur le terrain en 2016 et 2017 dans différents systèmes agroforestiers intercalaires (SAI) implantés par mon directeur et co-directeur de recherche, David Rivest et Alain Cogliastro. Je tiens à les remercier de m'avoir donné accès à ces nombreux sites et pour leur soutien tout au long de mon projet de maîtrise.

Le chapitre I présente les résultats de l'impact de ces SAI sur l'environnement lumineux, les propriétés chimiques des sols et le rendement des cultures. Afin d'obtenir ces résultats, lors des deux dernières années, j'ai moi-même effectué la revue de la littérature, les mesures sur le terrain, le traitement des échantillons en laboratoire, le montage des bases de données et les analyses statistiques. Le travail de terrain et de laboratoire a été réalisé grâce à la coopération de nombreux collaborateurs. Je tiens ainsi à remercier chaleureusement Yves-Régis Pouliot, Srdjan Ostojic, Hélène Lalande, Antoine Magnoux, Anne Vanasse, les différentes stagiaires et tous les producteurs agricoles et propriétaires chez qui nous sommes allés échantillonner et prendre des mesures.

Je tiens aussi à remercier plusieurs autres personnes pour leur support tout au long de ma maîtrise. Je commence par mes amies Justine Fontaine-Topaloff et Anna Mazalayrat qui m'ont supporté au quotidien. Ensuite, mes amis à l'extérieur du domaine qui m'ont supporté, moi et mon caractère irascible, du début à la fin, principalement Étienne Dumont. Pour finir, je veux remercier tout le personnel de la communauté ISFORTienne qui, de loin ou de proche, dans les corridors ou dans les

bureaux, m'a aidé et poussé à continuer et à persévérer. Je tiens aussi à remercier les bailleurs de fonds de ce projet de maîtrise, le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ) et de Fond de Recherche du Québec – Nature et Technologie (FRQNT).

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTES DES FIGURES	vi
LISTES DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES	ix
RÉSUMÉ	x
INTRODUCTION	1
1. Problématique	1
2. État des connaissances	4
2.1 Effet des arbres agroforestiers sur la qualité du sol	5
2.2 Effet des systèmes agroforestiers sur les conditions microenvironnementales et la production agricole.....	6
3. Objectifs et hypothèses de travail	9
CHAPITRE I	
IMPACT DES SYSTÈMES AGROFORESTIERS INTERCALAIRES DE DEUXIÈME GÉNÉRATION SUR LA LUMIÈRE DISPONIBLE, LES PROPRIÉTÉS CHIMIQUES DU SOL ET LA PRODUCTION AGRICOLE	11
Auteurs	11
1.1 Introduction.....	12
1.2 Matériels et méthodes	14
1.3 Résultats	20
1.4 Discussion	25
1.5 Conclusion	29

Remerciements.....	30
Matériels supplémentaires.....	43
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	50
LISTE DES RÉFÉRENCES	52

LISTES DES FIGURES

Figure		Page
1	Localisation des sites expérimentaux.....	33
2	Plan d'échantillonnage des cultures, des sols, de la lumière et des mauvaises herbes dans un bloc expérimental.....	34
3	Proportion de lumière totale transmise (PLTT) selon la position de la culture dans sept systèmes agroforestiers intercalaires implantés au Québec, Canada.....	35
4	Humidité du sol selon la position de la culture après (A) une période de précipitation normale (entre 57,0 et 79,7 mm sur 14 jours selon le site) et (B) une période de très faible précipitation (entre 3,5 et 7,6 mm sur 14 jours selon le site) dans quatre systèmes agroforestiers intercalaires implantés au Québec, Canada (Hudson, Pointe-Fortune, St-Télesphore et Ste-Brigide).....	36
5	Humidité des grains à la récolte (A), nombre de tiges par m ² (B) et rendement (poids total sec) du soya (grains) (C) selon la position de la culture sur le site de Ste-Brigide, Québec, Canada.....	37
6	Nombre de gousses par tige (A) et rendement (poids total sec) du haricot noir (grains) (B) selon la position de la culture sur le site de St-André, Québec, Canada.	38
7	Rendement intégré (poids total sec) du haricot noir selon le système agricole (SAI vs témoin sans arbre) sur le site de St-André, Québec, Canada.	39

8	Nombre d'épis par tige (A), nombre de tiges par m ² (B) et rendement (poids total sec) du maïs (grains) (C) en fonction de la position de la culture sur le site de St-Télesphore, Québec, Canada.	40
9	Rendement de la culture fourragère selon la position de la culture sur le site de Hudson (Québec, Canada) lors de trois dates de récolte.....	41
10	Taux d'envahissement des cultures annuelles par les mauvaises herbes selon la position de la culture à Ste-Brigide, Baie-du-Febvre, St-André et St-Télesphore, Québec, Canada.	42

LISTES DES TABLEAUX

Tableau		Page
1	Résumé des caractéristiques biophysiques des sites expérimentaux...	31
2	Modèles linéaires mixtes pour chacune des variables analysées.....	32
S3	Moyennes et écarts-types des variables microenvironnementales, édaphiques et de production agricole pour chaque position de la culture et pour la moyenne générale du site.	43
S4	Moyennes et écart-types des rendements totaux secs intégrées (g/m^2) des systèmes agroforestiers (A) en comparaison avec le système témoin (T) en place pour les années 2016 et 2017.....	47
S5	Corrélations entre les variables de production agricole (variables dépendantes) et les variables environnementales (variables indépendantes).	48

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AIC	Critère d'information d'Akaike (« Akaike Information Criterion »)
C	Centre des allées cultivées
CEC	Capacité d'échange cationique
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FRQNT	Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies
GES	Gaz à effet de serre
H	Hauteur moyenne des arbres
MAPAQ	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
PLTT	Proportion de lumière totale transmise
RPA	Rayonnement photosynthétique actif
SAI	Systèmes agroforestiers intercalaires

RÉSUMÉ

Dans le contexte de l'agriculture intensive, les systèmes agroforestiers intercalaires (SAI) peuvent répondre à plusieurs enjeux environnementaux majeurs. Cependant, davantage de connaissances sur le fonctionnement des SAI sont nécessaires pour optimiser leur productivité et améliorer leur adoption par les producteurs agricoles. L'objectif principal de cette étude était de déterminer l'impact de différents SAI sur la disponibilité de la lumière, les propriétés chimiques des sols, le taux d'envahissement des cultures par des mauvaises herbes et la production agricole. Ces variables ont été mesurées dans des parcelles agricoles témoins (sans arbre) et dans les allées cultivées en SAI, à quatre distances de la rangée d'arbres. L'étude a été réalisée en 2016 et 2017 sur sept sites expérimentaux implantés depuis trois à vingt-et-un ans chez différents propriétaires et producteurs agricoles. Le réseau de sites, répartis de la Montérégie jusqu'au Bas-St-Laurent, constitue une infrastructure de recherche majeure en agroforesterie qui est unique au monde. Les sites intégraient différentes cultures annuelles (maïs, soya, haricot noir et cultures fourragères) et des écartements entre les rangs d'arbres variant entre 25 et 90 m. La variation spatiale du rendement des cultures dans les allées en SAI était spécifique aux sites expérimentaux. Sur trois sites, des réductions de rendement du haricot noir, du soya et du maïs ont été observées à la distance la plus proche de la rangée d'arbres ($\frac{1}{2}H$, où H = hauteur des arbres). Ces réductions de rendement étaient associées à une diminution de la disponibilité de la lumière ou à une augmentation du taux d'envahissement de la culture par des mauvaises herbes. Aucune relation significative entre les rendements des cultures et l'humidité et les propriétés chimiques du sol n'a été mesurée, ce qui suggère une absence de concurrence entre les arbres et les cultures pour les ressources souterraines. Une réduction du rendement intégré des cultures dans les allées cultivées (toutes les distances combinées) du SAI n'a été mesurée que sur le site cultivé en haricot noir. Les résultats indiquent que les cultures fourragères sont moins sensibles que les cultures annuelles face aux changements des conditions biotiques et abiotiques apportées par les SAI. Nous concluons que les jeunes SAI intégrant de larges écartements d'arbres ont généralement des effets neutres sur la production agricole. Davantage de recherche est nécessaire pour vérifier dans quelle mesure la production agricole peut être modulée par le stade évolutif des arbres en SAI et la variation des conditions climatiques.

Mots clés : agroforesterie tempérée, fertilité du sol, interactions arbre-culture, mauvaises herbes, composantes de rendement

INTRODUCTION

1. Problématique

Les techniques agricoles modernes issues de la révolution verte (*e.g.* irrigation, utilisation accrue d'intrants de synthèse, amélioration génétique, mécanisation) ont permis d'augmenter significativement la productivité agricole afin de répondre à une demande croissante en nourriture, qui pourrait quadrupler d'ici 2050 (Pingali, 2012 ; Tilman *et al.*, 2011). Toutefois, on observe aujourd'hui une certaine stagnation de la productivité agricole (Tilman *et al.*, 2002). Ceci serait dû à une diminution de la disponibilité de l'eau dans certaines parties du globe, la perte de fertilité des sols, l'augmentation de l'occurrence des maladies et des insectes nuisibles résultant d'une faible biodiversité dans les agroécosystèmes (De Beenhouwer *et al.*, 2013 ; Tilman *et al.*, 2002 ; Torralba *et al.*, 2016) et une progression des superficies agricoles sur des terres moins propices au maintien des cultures intensives.

L'agriculture moderne a entraîné plusieurs conséquences négatives sur la santé des agroécosystèmes à travers le monde. Par exemple, une dégradation des sols, de l'air et de l'eau par l'utilisation de pratiques agricoles intensives a été observée dans différentes régions du monde (FAO, 2015). L'érosion des sols aux États-Unis serait de 10 à 71 fois plus élevée que celle avant l'arrivée des Européens (Wilkinson et McElroy, 2007). Au Canada, un changement dans les techniques de culture sans labour a permis de diminuer depuis 1981 l'érosion des sols (Lobb *et al.*, 2016) et la libération de gaz à effet de serre (GES) (Worth *et al.*, 2016). Cependant, selon le plus récent rapport national d'inventaire des sources et puits de GES au Canada réalisé par Environnement Canada, le secteur de l'agriculture au Canada émet 59 Mt de CO₂ équivalent par an, ce

qui représente 8% des émissions canadiennes de GES (Environnement Canada, 2015). De plus, l'ajout massif d'intrants, en augmentation constante depuis des décennies, entraîne souvent des problèmes de contamination des sources d'eau et d'eutrophisation des lacs et rivières (FAO, 2015; Gagnon *et al.*, 2016). L'agriculture intensive contribue aussi à la diminution de la qualité esthétique des paysages ruraux par la disparition des arbres (Lovell et Sullivan, 2006 ; Sullivan, 1994).

L'agroforesterie est l'une des solutions mises de l'avant par plusieurs institutions, notamment l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), pour atténuer ces problèmes en milieu agricole. Au Québec, Anel *et al.*, (2017) ont regroupé les systèmes agroforestiers sous deux grandes catégories : les haies agroforestières et les systèmes agroforestiers intraparcellaires. Les systèmes agroforestiers intercalaires (SAI), de type intraparcellaires, consistent en la plantation de rangées d'arbres largement espacées les unes des autres, de façon à pouvoir allouer l'espace intercalaire (ou allées) à des plantes cultivées comme le maïs, le soya, les céréales et les cultures fourragères. Cet espace doit être suffisant pour permettre le passage de la machinerie agricole, y compris de rampes d'épandage de grande dimension. En couvrant de façon homogène l'ensemble d'une parcelle agricole, les SAI diffèrent des haies agroforestières qui sont installées en bordure des champs.

Au Québec, les systèmes agroforestiers les plus répandus sont les haies agroforestières. Elles couvriraient près de 10 000 km au Québec (Thevathasan *et al.*, 2012). Le déploiement des systèmes agroforestiers demeure toutefois relativement limité au Québec (De Baests *et al.*, 2007 ; Thevathasan *et al.*, 2012). Par exemple, entre 2002-2014, uniquement 3 m de haies agroforestières par hectare de terre cultivée ont été plantés au Québec grâce au support du programme Prime-Vert du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) (Anel *et al.*, 2017). Par ailleurs, seulement 183 hectares de systèmes agroforestiers intraparcellaires ont été dénombrés. La reconnaissance institutionnelle, la formation de la relève

agricole et de professionnels qualifiés, le développement de programmes de soutien financier adaptés et le développement de connaissances pratiques constituent des défis importants à relever pour augmenter l'adoption des SAI par les producteurs agricoles (Anel *et al.*, 2017 ; Masse *et al.*, 2015 ; Tartera *et al.*, 2012 ; Thevathasan *et al.*, 2012).

Les recherches antérieures menées dans l'est du Canada, aux États-Unis et en Europe ont permis de démontrer que les SAI présentent un vaste potentiel en ce qui concerne la production de plusieurs services écosystémiques qui ont de la valeur pour les producteurs et la société dont : la séquestration du carbone et l'atténuation des émissions de GES par les sols (Bambrick *et al.*, 2010 ; Beaudette *et al.*, 2010 ; Udawatta et Jose, 2011 ; Winans *et al.*, 2016 ; Wotherspoon *et al.*, 2014) ; la régulation de la qualité de l'eau (Allen *et al.*, 2004 ; Bergeron *et al.*, 2011 ; Dougherty *et al.*, 2009) et des sols (Bainard *et al.*, 2011 ; Doblac-Miranda *et al.*, 2014 ; Lacombe *et al.*, 2009 ; Rivest *et al.*, 2013 ; Thevathasan *et al.*, 2012) ; l'amélioration de la biodiversité (Peng *et al.*, 1993 ; Stamps *et al.*, 2008 ; Thevathasan *et al.*, 2012) et la régulation du climat (Nasielski *et al.*, 2015 ; Rivest *et al.*, 2013).

Plusieurs simulations à l'échelle européenne ont montré que des SAI bien conçus peuvent s'avérer plus productifs et rentables (en considérant seulement leurs bénéfices privés) que les monocultures agricoles et les plantations forestières conventionnelles (Graves *et al.*, 2009 ; Palma *et al.*, 2007). La reconnaissance de la valeur des services écosystémiques générés par les arbres agroforestiers pourrait accroître cette rentabilité (Winans *et al.*, 2016). Par exemple, il a été estimé que la somme de tous les bénéfices économiques (privés et publics) d'un SAI, dont les caractéristiques ont été modélisées dans le contexte du Québec, était de 2,4 fois plus élevée que celle d'un système agricole conventionnel de production de grandes cultures (Alam *et al.*, 2014).

Les SAI permettent une exploitation accrue des ressources du milieu grâce à la complémentarité des arbres et des cultures pour l'utilisation de l'eau, des éléments minéraux du sol et de l'énergie lumineuse, ainsi qu'à leur impact bénéfique sur la qualité

du sol (Jose *et al.*, 2004). Les travaux antérieurs dans la zone tempérée du monde ont toutefois été réalisés sur un nombre limité de SAI dits de « première génération », en testant généralement de très faibles écartements entre les rangées d'arbres (8 à 15 m) (Burgess *et al.*, 2004 ; Dupraz *et al.*, 1999 ; Jose *et al.*, 2000 ; Rivest *et al.*, 2009 ; Thevathasan et Gordon, 2004). Au cours des dernières années, plusieurs sites expérimentaux d'envergure testant des SAI dits de « deuxième génération » ont été implantés chez différents producteurs agricoles du Québec (Montérégie, Capitale-Nationale, Centre-du-Québec, Bas-St-Laurent). De plus larges écartements (25-40 m) entre les rangées d'arbres y sont adoptés pour optimiser l'utilisation des ressources et les rendements des cultures. Ces sites, conjugués avec quelques sites pionniers plus matures, offrent une excellente opportunité de quantifier avec précision l'effet de SAI modernes, adaptés aux réalités des grandes cultures, sur les rendements de diverses cultures agricoles et les propriétés des sols, un besoin exprimé par les conseillers et producteurs agricoles (Masse *et al.*, 2015 ; Tartera *et al.*, 2012).

2. État des connaissances

Dans les SAI, on distingue essentiellement deux grands types d'interactions écologiques entre arbres et cultures : les interactions aériennes, qui sont liées à la modification du microclimat de l'association (*e.g.* proportion de lumière transmise aux cultures, température et humidité de l'air, vitesse du vent), et les interactions souterraines, qui sont généralement abordées en termes de modification des ressources du sol. Les interactions aériennes et souterraines peuvent impliquer à la fois des processus de compétition et de facilitation qui sont générés simultanément dans toute association. C'est le bilan net de ces processus qui détermine la productivité agricole (Jose *et al.*, 2004).

2.1 Effet des arbres agroforestiers sur la qualité du sol

Les bénéfices des SAI sur la qualité du sol, qui est à la base de la productivité végétale, sont indéniables. De façon générale, les arbres des SAI peuvent puiser, dans les couches profondes du sol, y compris dans la zone d'altération de la roche-mère, des éléments minéraux qui ne sont pas accessibles aux cultures ou qui proviennent de la lixiviation (Schroth, 1999 ; Wanvestraut *et al.*, 2004). Ces éléments minéraux sont ensuite restitués à la couche arable du sol sous forme de matière organique, par le biais de la litière des arbres et à la décomposition de leurs racines fines sans cesse renouvelées (Ayres *et al.*, 2009 ; Montagnini et Nair, 2004). Différentes recherches menées au Canada et aux États-Unis ont démontré une augmentation significative du taux de carbone organique et de la disponibilité de l'azote et du phosphore dans les sols à proximité des arbres plantés en SAI et dans des haies agroforestières comparativement aux sols de systèmes agricoles conventionnels (Baah-Acheamfour *et al.*, 2014 ; Mungai *et al.*, 2006 ; Rivest *et al.*, 2013 ; Thevathasan et Gordon, 1997). Une étude en serre a démontré un effet positif de l'augmentation de la fertilité des sols agroforestiers sur le rendement du blé et sa tolérance à des stress hydriques (Rivest *et al.*, 2013). Les arbres agroforestiers peuvent augmenter la stabilité des agrégats (Udawatta *et al.*, 2008) pouvant amener une meilleure circulation de l'eau et de l'air dans le sol, ce qui augmenterait l'activité microbienne (Carter, 2004). Par ailleurs, plusieurs études dans l'est du Canada ont aussi montré que les arbres agroforestiers contribuent à accroître l'abondance et la diversité des organismes du sol (*e.g.* bactéries, champignons, microarthropodes, vers de terre) ayant un rôle potentiellement positif sur la santé des sols et la production agricole (Chiffot *et al.*, 2009 ; Doblas-Miranda *et al.*, 2014 ; Lacombe *et al.*, 2009 ; Price et Gordon, 1999 ; Rivest *et al.*, 2013). Par contre, l'augmentation de la minéralisation de l'azote et du prélèvement supplémentaire de cations échangeables par les arbres dans les SAI peuvent contribuer à augmenter

l'acidité des sols (Rivest *et al.*, 2013). En général, l'effet des arbres sur les propriétés des sols des SAI est plus important dans la zone d'influence immédiate des arbres (*i.e.* $< 1H$, où H =hauteur des arbres) et augmente avec leur taille et leur âge (Mungai *et al.*, 2006 ; Oelbermann *et al.*, 2004 ; Thevathasan et Gordon, 2004).

2.2 Effet des systèmes agroforestiers sur les conditions microenvironnementales et la production agricole

La majorité des observations concernant l'influence des systèmes agroforestiers tempérés sur la production agricole a été obtenue dans des travaux portant sur les haies agroforestières. Un nombre important d'études a démontré que ces haies, en diminuant la vitesse du vent dans la large zone de protection des cultures et des sols (*e.g.* $1-15H$), réduisent les fluctuations de la température de l'air et du sol, augmentent l'humidité de l'air, diminuent l'évaporation de l'eau du sol, diminuent les dommages mécaniques causés aux plantes par l'action abrasive des particules de sol, réduisent l'érosion éolienne, favorisent la rétention de la neige et augmentent l'activité des insectes pollinisateurs (Böhm *et al.*, 2014 ; Brandle *et al.*, 2004 ; Kort, 1988 ; Lin, 2007 ; Nuberg, 1998). Ces mécanismes se traduisent généralement par une augmentation du rendement des cultures (Kort, 1988 ; Nuberg, 1998). Cependant, les haies agroforestières sont souvent associées à une zone de concurrence arbre-culture située à leur proximité ($0-1H$). Bien que cette zone occupe une très faible surface à l'échelle de la parcelle agricole, cela fait en sorte que la haie agroforestière est souvent mal perçue par les producteurs agricoles (Valdivia *et al.*, 2012). Généralement, les effets des arbres agroforestiers sur les conditions microclimatiques et les rendements des cultures varient largement selon le contexte climatique, les types de sols et de cultures et les types d'aménagement des haies (Rivest et Vézina, 2015).

Selon des études menées dans l'est du Canada, l'ombrage induit par les arbres dans les SAI, plus important à leur proximité, serait le principal déterminant de la productivité des cultures fourragères et grandes cultures comme le maïs et le soya (Bouttier *et al.*, 2014 ; Reynolds *et al.*, 2007 ; Rivest *et al.*, 2009). On y a montré que le taux d'ombrage porté par les arbres varie selon les traits des espèces d'arbres (*e.g.* taux de croissance, largeur et porosité de la cime).

Les arbres en SAI pourraient contribuer à une meilleure recharge automnale en eau des sols (Anderson *et al.*, 2009). Cela s'expliquerait notamment par une plus grande capacité de stockage en eau due à une macroporosité accrue du sol sous l'effet des arbres (Seobi *et al.*, 2005 ; Udawatta *et al.*, 2008). Par contre, pendant la saison active de production agricole, les arbres en SAI peuvent aussi réduire le taux d'humidité dans la couche arable du sol en raison de leur prélèvement racinaire en eau (Campi *et al.*, 2009 ; Link *et al.*, 2015 ; Nuberg et Bennell, 2009 ; Peng *et al.*, 2015 ; Rivest *et al.*, 2009). Certains auteurs ont ainsi démontré que la concurrence souterraine à proximité des arbres en SAI peut devenir un facteur limitant la production agricole sous climat tempéré (Jose *et al.*, 2000 ; Miller et Pallardy, 2001). Néanmoins, dans l'est du Canada, dans des conditions climatiques normales (*e.g.* précipitations abondantes et fréquentes), la concurrence pour l'eau ne serait généralement pas à craindre dans les SAI (Reynolds *et al.*, 2007 ; Rivest *et al.*, 2009).

Les conséquences des interactions aériennes et souterraines sur les rendements agricoles dans les SAI demeurent relativement peu documentées, seuls quelques SAI matures ayant été observés jusqu'à présent en zone tempérée. Selon Dupraz et Liagre (2008), pour des densités de 20 à 50 grands arbres par hectare, les plantes agricoles intercalaires devraient conserver des rendements comparables à celles des systèmes agricoles conventionnels pendant au moins la moitié de la vie des arbres. Les résultats antérieurs de recherches menées au Canada, aux États-Unis et en Europe dans des SAI de fortes densités (> 120 arbres par hectare, écartements de 8 à 20 m) ont démontré que

des diminutions de rendement des cultures peuvent survenir assez rapidement à proximité des arbres (*i.e.* entre 0,25 et 0,5H), une fois que ceux-ci sont bien implantés (Burgess *et al.*, 2005 ; Jose *et al.*, 2004 ; Reynolds *et al.*, 2007 ; Rivest *et al.*, 2009 ; Udawatta *et al.*, 2014). Un suivi expérimental rigoureux du rendement des cultures sur des SAI à faible densité de plantation, comme ceux de la présente étude, est fondamental, car l'extrapolation de la plupart des résultats issus des SAI à plus forte densité de plantation demeure hasardeuse en raison des différentes conditions biotiques et abiotiques qui y sont générées. On peut s'attendre à ce que la tolérance des plantes agricoles à la concurrence des arbres, à l'interface arbre-culture, varie selon l'ordre suivant : cultures fourragères > soya et céréales > maïs (Kort, 1988). En fait, l'effet de l'ombrage des arbres sur les rendements agricoles dépend beaucoup du type de métabolisme des plantes (*i.e.* C₃ vs. C₄). En effet, alors que le taux de photosynthèse nette des plantes en C₃ (*e.g.* blé, soya) sature à 50% du rayonnement solaire incident maximal, celui des plantes en C₄ (*e.g.* maïs) sature uniquement à l'approche de ce maximum, soit environ 1700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-2}$ (Gillespie *et al.*, 2000 ; Reynolds *et al.*, 2007). Une diminution de la lumière en deçà de ces pourcentages inhibera les processus biologiques de photosynthèse et de croissance de la plante. À noter qu'uniquement un cas de surexposition, où la plante peut stopper sa photosynthèse pour préserver l'eau dans ses tissus, engendrerait le même résultat.

L'importance et la direction des effets des SAI sur les rendements agricoles dépendent beaucoup de la phénophasse (phase observable durant le cycle annuel de la plante). Par exemple, chez le soya, une forte concurrence pour la lumière au début de la période reproductive (*e.g.* pendant la floraison) peut entraîner une diminution significative du nombre de gousses par plant, qui peut cependant être compensée par une augmentation du poids des grains (Rivest *et al.*, 2009). L'étude des composantes de rendements est donc utile pour déterminer les périodes pendant la saison de croissance où les plantes agricoles peuvent être sensibles aux effets des SAI sur les ressources aériennes et souterraines.

Le rendement des cultures peut aussi être affecté par la compétition exercée par les mauvaises herbes. Les pratiques agricoles au champ (*e.g.* travail du sol, fertilisation) créent des conditions favorables au développement d'espèces opportunistes et nuisibles qui peuvent coloniser rapidement les bandes non cultivées (Mahn, 1988 ; Marrs, 1993 ; Marshall, 1987). Elles deviennent ainsi rapidement des réservoirs de mauvaises herbes qui sont appelées à retourner dans les champs cultivés adjacents (Bond, 1987 ; Boutin *et al.*, 2001 ; Boutin et Jobin, 1998). Par ailleurs, des enquêtes menées auprès de producteurs agricoles ont montré que l'augmentation de la complexité des opérations mécaniques (*e.g.* lors de l'épandage de pesticides) constitue un défi important de l'adoption des SAI (Graves *et al.*, 2009 ; Valdivia *et al.*, 2012). Les producteurs interrogés ont révélé craindre d'endommager les arbres dans les SAI lors des opérations mécaniques. Il est ainsi possible que l'épandage des herbicides en SAI soit moins uniforme que dans un champ dépourvu d'arbre, rendant l'effet des pesticides sur l'élimination des mauvaises herbes plus hétérogène. Cela dit, à notre connaissance, aucune étude n'a documenté les effets des SAI sur le taux d'envahissement des cultures par les mauvaises herbes sous climat tempéré.

3. Objectifs et hypothèses de travail

L'objectif de la présente étude était de comparer la variation des propriétés chimiques des sols (*i.e.* humidité du sol, pH, N total, C total, P extractible, capacité d'échange cationique), de la disponibilité de la lumière, du taux d'envahissement des cultures annuelles par les mauvaises herbes et du rendement de différentes cultures agricoles dans des SAI de deuxième génération et dans des systèmes agricoles dépourvus d'arbre. Nous avons prédit que les SAI peuvent diminuer les rendements agricoles dans la zone la plus proche des rangées d'arbres. La première hypothèse était que l'ampleur de cette diminution varierait selon l'ordre suivant : maïs > cultures annuelles oléoprotéagineuses > cultures fourragères. Et ensuite que cette diminution de

rendement serait associée à une réduction de la disponibilité de la lumière et de l'humidité des sols et à une augmentation du taux d'envahissement des cultures par les mauvaises herbes.

CHAPITRE I

IMPACT DES SYSTÈMES AGROFORESTIERS INTERCALAIRES DE DEUXIÈME GÉNÉRATION SUR LA LUMIÈRE DISPONIBLE, LES PROPRIÉTÉS CHIMIQUES DU SOL ET LA PRODUCTION AGRICOLE

Auteurs

Maxime Carrier*¹, Alain Cogliastro² et David Rivest¹

¹ Institut des sciences de la forêt tempérée (ISFORT), Université du Québec en
Outaouais (UQO), 58 rue Principale, Ripon, QC, Canada, J0V 1V0

² Institut de recherche en biologie végétale (IRBV), 4101, Sherbrooke Est, Montréal,
QC, Canada, H1X 2B2

*Adresse de correspondance : maxime.carrier54@gmail.com

Autres adresses (par ordre d'apparition) :

alain.cogliastro@umontreal.ca

david.rivest@uqo.ca

1.1 Introduction

L'intérêt récent manifesté pour la recherche et le développement de systèmes agroforestiers intercalaires (SAI) en milieu tempéré reposerait sur leur capacité à répondre à différents enjeux de l'agriculture intensive, dont la santé des sols, la qualité de l'eau, la biodiversité et la lutte et l'adaptation aux changements climatiques (Schoeneberger *et al.*, 2012 ; Smith *et al.*, 2013 ; Thevathasan et Gordon, 2004). Plusieurs éléments freinent cependant le déploiement des systèmes agroforestiers. Dans l'est du Canada, le manque de connaissances sur le fonctionnement écologique et la productivité des systèmes agroforestiers est l'un des principaux freins à l'adoption des SAI par les producteurs agricoles (Anel *et al.*, 2017 ; De Baests *et al.*, 2007 ; Masse *et al.*, 2015 ; Tartera *et al.*, 2012 ; Thevathasan *et al.*, 2012).

Les connaissances actuelles concernant le fonctionnement et la productivité des SAI en milieu tempéré sont fréquemment issues d'une première génération de systèmes à forte densité d'arbres et à faible écartement. Ces SAI expérimentaux ont permis aux chercheurs de documenter rapidement les interactions arbre-culture. Les bénéfices de tels systèmes agroforestiers sur les rendements et les sols ont été détaillés dans plusieurs systèmes tempérés (Burgess *et al.*, 2004 ; Dupraz *et al.*, 1999 ; Jose *et al.*, 2000 ; Rivest *et al.*, 2009 ; Thevathasan et Gordon, 2004 ; Tsonkova *et al.*, 2012). Par exemple, différentes recherches menées au Canada et aux États-Unis ont démontré une amélioration de la fertilité des sols dans des SAI de première génération, notamment par le biais de la restitution des éléments minéraux issus de la décomposition des litières aériennes et souterraines (Mungai et Motavalli, 2006 ; Rivest *et al.*, 2013 ; Thevathasan et Gordon, 1997). Par contre, les faibles espacements entre les arbres dans ces SAI de première génération ont rapidement créé des conditions de croissance limitantes pour la production de grandes cultures agricoles. Par exemple, dans l'est du Canada, l'ombrage des arbres dans les SAI a été identifié comme un facteur limitant la

productivité (Bouttier *et al.*, 2014 ; Reynolds *et al.*, 2007 ; Rivest *et al.*, 2009). L'ampleur de cet effet dépendrait cependant du type de culture en place, selon l'ordre suivant : cultures fourragères < plantes en C₃ < plantes en C₄ (Burgess *et al.*, 2005 ; Jose *et al.*, 2004 ; Reynolds *et al.*, 2007 ; Rivest *et al.*, 2009 ; Udawatta *et al.*, 2014). Pour sa part, la concurrence souterraine à proximité des arbres en SAI a aussi été identifiée comme un co-facteur limitant la production agricole sous climat tempéré (Jose *et al.*, 2000 ; Miller et Pallardy, 2001 ; Wanvestraut *et al.*, 2004). Par contre, dans les conditions climatiques normales de l'est du Canada (*e.g.* précipitations abondantes et fréquentes), la concurrence pour l'eau ne serait généralement pas à craindre dans les SAI (Reynolds *et al.*, 2007 ; Rivest *et al.*, 2009). D'autres mécanismes de réduction des rendements des cultures en SAI sont possibles. Par exemple, une forte abondance de mauvaises herbes sous les rangées d'arbres peut favoriser leur envahissement dans les champs adjacents en cultures annuelles (Boutin et Jobin, 1998 ; Marshall, 2004). Cela dit, les effets positifs ou négatifs des arbres sur les cultures et les sols sont souvent plus importants dans la zone d'influence immédiate des arbres (*i.e.* < 1H, où H=hauteur des arbres) et s'accroissent avec l'augmentation de leur taille (Mungai *et al.*, 2006 ; Oelbermann *et al.*, 2004 ; Thevathasan et Gordon, 2004).

De telles architectures des SAI de première génération sont toutefois moins enclines à être acceptées dans le contexte des grandes cultures intensives. En effet, les pronostics de rendements agricoles défavorables dans les SAI de première génération peuvent être perçus comme un frein à l'adoption par les producteurs agricoles (Valdivia *et al.*, 2012). Soulignons également que la plupart des études sur les SAI tempérés de première génération ont été réalisées sur un seul site, parfois sans témoin agricole (parcelle sans arbre), et abordaient un faible nombre de variables environnementales et de rendements, parfois dans des régions où le climat et les sols diffèrent de la zone agricole du Québec (Lovell *et al.*, 2017). L'étude de nouveaux SAI à plus faible densité d'arbres, établis avec la participation des producteurs agricoles et mieux adaptés aux grandes cultures, permettrait de préciser la dynamique temporelle et spatiale des effets

des arbres dans ces nouvelles conditions, plus acceptables pour les producteurs. On peut s'attendre à ce que les conditions dans les SAI de deuxième génération se rapprochent de celles dans les systèmes de haies agroforestières, où les effets de concurrence des arbres à leur interface sont généralement compensés par un faible effet de complémentarité qui s'étale dans la grande zone de protection des cultures (Kort, 1988 ; Rivest et Vézina, 2015).

Cette étude a misé sur un réseau unique de sites expérimentant plusieurs SAI conçus en étroite partenariat avec des producteurs agricoles. L'objectif de l'étude était de déterminer l'impact de SAI de seconde génération sur la disponibilité de la lumière, les propriétés chimiques des sols, le taux d'envahissement des cultures annuelles par les mauvaises herbes et différentes variables de la production agricole sur divers sites agroforestiers de différents niveaux de maturité et conçus pour être adaptés aux grandes cultures. Nous avons émis l'hypothèse que les SAI peuvent diminuer les rendements agricoles dans la zone la plus proche des rangées d'arbres. Nous avons prédit que l'ampleur de cette diminution varierait selon l'ordre suivant : maïs > cultures annuelles oléoprotéagineuses > cultures fourragères. Nous avons aussi prédit que cette diminution de rendement serait associée à une réduction de la disponibilité de la lumière et de l'humidité des sols et à une augmentation du taux d'envahissement des cultures par les mauvaises herbes. Il a enfin été prédit que les rendements intégrés à l'ensemble de la surface des allées cultivées seraient équivalents à ceux dans les témoins agricoles sans arbres.

1.2 Matériels et méthodes

1.2.1 Sites et dispositifs expérimentaux

L'étude a été réalisée sur sept sites situés de l'ouest de la Montérégie jusqu'au Bas-Saint-Laurent (figure 1). Les principales caractéristiques des sites et des SAI

expérimentaux sont présentées dans le tableau 1. La température moyenne annuelle (1980-2010) varie de 3,4 à 6,5 °C et la moyenne annuelle des précipitations de 924 à 1133 mm (Environnement Canada, 2017). Les SAI ont été mis en place entre 1996 et 2014 sur des exploitations agricoles de grandes cultures et de cultures fourragères. Le nombre de rangées d'arbres sur chaque site variait de 3 à 10 et les écartements entre celles-ci de 25 à 90 m. En général, chaque site a été planifié de façon à comparer les effets de différentes espèces d'arbres ayant des stratégies de croissance contrastées. Nous ne présentons ici que les espèces présentes dans les parcelles agroforestières qui ont été sélectionnées pour cette étude : frêne d'Amérique (*Fraxinus americana*), chêne rouge (*Quercus rubra*) et chêne à gros fruits (*Quercus macrocarpa*) en mélange sur le rang à Ste-Brigide; chêne rouge, érable à sucre (*Acer saccharum*), aulne glutineux (*Alnus glutinosa*) ou bouleau blanc (*Betula papyrifera*), plantés en alternance sur le rang avec le peuplier hybride (*Populus deltoides* × *P. nigra* (DN) ou *P. DN* × *P. maximowiczii* ou *P. maximowiczii* × *P. trichocarpa*) sur les autres sites. Cet arrangement spatial du peuplier hybride à croissance rapide avec d'autres feuillus à croissance plus modérée, sur six des sept sites, a été privilégié avec l'objectif de créer rapidement un microclimat favorable à la croissance des feuillus nobles et des cultures et de produire des revenus de récolte de bois répartis dans le temps (Rivest *et al.*, 2010). La largeur moyenne des bandes non-cultivées sous les rangées d'arbres était d'environ 1,5 m. Toutes les bandes non-cultivées étaient composées de végétation spontanée ou ensemencée qui n'a pas été fauchée. Cette végétation présentait des taux de recouvrement variables, modulés, selon les sites, par la présence ou non d'un paillis de plastique, le taux de recouvrement du paillis (individuel vs bande) et la régie de culture (biologique et sans herbicide vs conventionnel avec herbicide). Les cultures et la régie des cultures variaient selon les sites (tableau 1). Toutes les opérations culturales ont été réalisées par les producteurs agricoles propriétaires ou locataires des sites.

Sur cinq sites (St-Télésphore, Baie-du-Febvre, St-Ubalde, St-André et Pointe-Fortune), une parcelle agroforestière a été comparée à une parcelle agricole (témoin non arboré)

intégrant la même culture, la même régie agricole et disposant du même historique de culture. Ces deux types de systèmes étaient répétés dans trois (Pointe-Fortune) ou quatre (les autres sites) blocs expérimentaux par site. Le centre de chacun des blocs des parcelles agroforestières était constitué d'un segment de rangée de huit arbres et de deux allées cultivées qui lui étaient adjacentes (figure 2). Les parcelles témoins (> 0,25 ha) étaient distancées d'au moins 50 m du plus proche arbre. Les sites de St-Brigide et de Hudson n'avaient pas de témoins agricoles. Sur ces deux derniers sites, les parcelles en SAI étaient répétées quatre fois.

Sur chacun des sites, la hauteur moyenne des arbres (H) dans toutes les parcelles agroforestières a été mesurée en juin 2016 (tableau 1). L'échantillonnage des variables mesurées dans les parcelles agroforestières a été réalisé le long d'un transect perpendiculaire à la rangée d'arbres, en position centrale de la parcelle (figure 2). Des deux côtés de la rangée d'arbres, les variables ont été mesurées à quatre distances de la rangée d'arbres (sous-parcelle) : près des arbres ($\frac{1}{2}H$), à une distance équivalente à H, à mi-chemin entre H et le centre de l'allée cultivée ($\frac{1}{2}(H+C)$) et au centre de l'allée (C).

1.2.2 Variables mesurées

1.2.2.1 Proportion de lumière totale transmise (PLTT)

À la fin juillet 2016, à chaque site, dans chaque zone d'échantillonnage des sols (figure 2), des photos hémisphériques ont été prises à 1 m du sol à l'aide d'une caméra digitale (Nikon Coolpix 995, Tokyo, Japan) équipée d'une lentille hémisphérique (Nikkor fisheye converter FC-E8). À l'aide d'un logiciel de retouche d'image (GIMP2, GIMP Development Team), les photos ont été converties en images noir et blanc et le vrai nord géographique a été ajusté. La PLTT a été estimée à l'aide du logiciel Gap Light Analyser (Frazer *et al.*, 1999), pour la période du 15 juin au 30 septembre qui

correspond à la période de forte activité photosynthétique des cultures et à un stade où la surface foliaire des arbres était stabilisée. Nous avons utilisé une localisation unique ajustée à chaque site ainsi qu'une résolution temporelle de 2 min et une résolution spatiale de 36 azimuts par 9 zéniths.

1.2.2.2 Humidité du sol

L'humidité du sol (0-10 cm) a été estimée à deux reprises, au moins 48 h après la dernière pluie, pendant l'été de 2016 à l'aide d'un humidimètre (FieldScout TDR100, Spectrum Technologie, Inc., Aurora, IL, USA) sur les sites de Hudson, Pointe-Fortune, Ste-Brigide et St-Téléphore. Ces sites ont été priorisés puisqu'ils sont situés dans une même région (Montréal) et qu'ils couvraient différents types de cultures agricoles (fourragères, maïs et soya). Le premier échantillonnage a été réalisé après une période de précipitation normale (entre 57,0 et 79,7 mm sur 14 jours selon le site) et la seconde après une période de très faible précipitation (entre 3,5 et 7,6 mm sur 14 jours selon le site). Afin de tenir compte de la variabilité spatiale, l'humidité du sol a été mesurée à cinq points dans chaque zone d'échantillonnage des sols (figure 2) et la moyenne issue de ces cinq valeurs a été conservée pour les analyses statistiques.

1.2.2.3 Propriétés chimiques du sol

Sur tous les sites, dans chaque zone d'échantillonnage des sols (figure 2), cinq carottes (7 cm diam., 20 cm profondeur) ont été prélevées au mois d'août 2016. Les carottes ont été mélangées afin de produire un échantillon composite. Le pH de tous les échantillons composites a été mesuré selon la méthode d'Hendershot *et al.* (2008a). Les autres propriétés chimiques ont été déterminées sur les échantillons des sites de Ste-Brigide et Baie-du-Febvre. Le carbone total et l'azote total ont été évalués à l'aide d'un

analyseur TruMac CNS (LECO, St. Joseph, MI, USA). Les concentrations en phosphore extractible ont été déterminées par colorimétrie sur des extractions de sols au Mehlich III selon la méthode de Zidia et Sen Tran (2008) avec un analyseur automatique d'ion (QuickChem Method 10-115-01-1-A, Lachat Instruments, Milwaukee, WI, USA). Les concentrations en bases échangeables (Ca, Mg, K, Al, Fe et Mn) ont été mesurées sur des extractions de sols au BaCl₂ (0,1M) avec un spectrophotomètre d'absorption atomique à flamme (Varian 220 FS Agilent Technologies, Palo Alto, CA, USA) selon la méthode d'Hendershot *et al.*, (2008b). La capacité d'échange cationique (CEC) a été déterminée par la somme de la concentration de chaque base échangeable.

1.2.2.4 Production agricole

Dans chaque zone d'échantillonnage des cultures de chacun des sites composés de cultures annuelles, les plants de soya, de haricot noir et les épis de maïs ont été récoltés au stade de maturité sur deux rangs consécutifs longs de 1 m (soya et haricot noir) ou de 3 m (maïs) à chacune des distances de la haie (figure 2). À partir de ces échantillons, le rendement en grains et les composantes de rendement suivantes ont été déterminés: le nombre de plants par m², le nombre de gousses par plant, le poids de 100 grains. Le taux d'humidité des grains a été déterminé à partir du poids frais des grains mesuré in situ à la récolte et du poids après séchage à 60°C pendant 2 jours.

Sur chacun des sites composés de cultures fourragères, dans chaque zone d'échantillonnage des cultures, les plantes fourragères ont été récoltées à 1 cm au-dessus du sol dans un quadrat de 1 m² lors de trois (fin juin et fin août en 2016 et mi-juin en 2017 à Pointe-Fortune et mi-juin et mi-septembre en 2016 et mi-juillet en 2017 à Hudson) ou deux (mi-juin et mi-août en 2016 à St-Ubalde) récoltes successives. Le poids frais des échantillons a été mesuré au champ immédiatement après la récolte. Des

sous-échantillons frais d'environ 250 g, pesés au champ, ont été séchés à 60°C pendant 2 jours pour déterminer l'humidité des échantillons à la récolte. Le rendement en matière sèche des échantillons a été évalué en soustrayant leur contenu en eau estimé.

1.2.2.5 Taux d'envahissement par les mauvaises herbes

Sur chacun des sites composés de cultures annuelles (Ste-Brigide, St-Téléphore, Baie-du-Febvre et St-André), le taux d'envahissement des cultures par les mauvaises herbes a été estimé dans chaque zone d'échantillonnage des cultures au début du mois d'août par des mesures visuelles effectuées par un même observateur dans un quadrat de 1 m² (figure 2). Dans chaque quadrat, le taux d'envahissement par les mauvaises herbes a été estimé selon cinq classes: 0= 0%, 1= 1 à 20%, 2= 21 à 40%, 3= 41 à 60%, 4= 61 à 80%, 5= 81 à 100%.

1.2.3 Analyses statistiques

Les effets des SAI sur les variables mesurées ont été analysés par des modèles mixtes d'ANOVA avec mesures répétées pour le rendement des cultures fourragères et l'humidité du sol (Package *nlme* dans R ; Pinheiro *et al.*, 2017). Lorsque la condition de linéarisation n'était pas respectée, les analyses ont été effectuées à l'aide d'un modèle généralisé non-linéaire (Package *glmmADMB* dans R ; Fournier *et al.*, 2012) et ensuite un modèle mixte d'ANOVA avec mesures répétées était effectué (Package *car* dans R ; John et Weisberg, 2009). Les sites (lors d'analyses intersites), les blocs et l'orientation (E-O ou N-S) ont été considérés en facteurs aléatoires pour tenir compte du manque d'indépendance. La position de la culture ($\frac{1}{2}$ H, H, $\frac{1}{2}$ (H+C), C, témoin) a été considérée comme facteur fixe (tableau 2). La comparaison des moyennes des différentes positions de la culture a été déterminée à l'aide du test de Tukey (Package

lsmean dans R ; Lenth et Love, 2017). Lorsque le rendement était significativement affecté par la position de la culture, une analyse à l'aide de modèles mixtes a été effectuée pour comparer le rendement intégré dans les allées du SAI (*i.e.* toutes les distances combinées) à celui dans le témoin (*i.e.* effet du système) (Package *nlme* dans R ; Pinheiro *et al.*, 2017). Le rendement intégré se définit comme le rendement obtenu sur toute une parcelle agroforestière (en excluant les bandes non-cultivées sous les rangées d'arbres) en pondérant les moyennes de rendement obtenues de chaque position selon leur aire relative dans l'allée (Rivest et Vézina, 2015). Les relations entre les variables de la production agricole et les variables environnementales (PLTT, humidité du sol, propriétés chimiques du sol) et le taux d'envahissement des mauvaises herbes ont été analysées avec des modèles de régression linéaire mixtes (Package *nlme* dans R ; Pinheiro *et al.*, 2017) avec une sélection de modèles à l'aide du critère d'information d'Akaike. Le R^2_{aj} (comprenant l'explication par les variables à effet fixe) a été déterminé à l'aide du package *mumin* dans R (Barton, 2017).

1.3 Résultats

1.3.1 Proportion de lumière totale transmise (PLTT)

L'amplitude de la variation de la PLTT en fonction de la distance de la culture à l'arbre différait entre les sites (interaction site \times position ; $n=218$, $c^2(23)=642,96$, $P<0,001$) (figure 3). En général, la réduction de la PLTT se situait uniquement dans les zones proches des arbres ($\frac{1}{2}H$ et H). Les deux distances les plus éloignées ($\frac{1}{2}(H+C)$ et C) avaient des valeurs de PLTT proche de 100% et égalaient les valeurs des témoins. Sur le site de Ste-Brigide, la PLTT à $\frac{1}{2}H$ ne différait pas de celle à H, mais différait de celle des autres positions. Sur les sites de Baie-du-Febvre et de Pointe-Fortune, la PLTT était la plus faible à $\frac{1}{2}H$, alors que celle à H se situait entre les valeurs de ses positions voisines. Sur le site de St-André, la PLTT à $\frac{1}{2}H$ différait de celle à $\frac{1}{2}(H+C)$ et C. Sur

le site de St-Télesphore, la PLTT à $\frac{1}{2}H$ était significativement inférieure à celle à $\frac{1}{2}(H+C)$, à C et dans le témoin. Sur le site d'Hudson, la PLTT à $\frac{1}{2}H$ était significativement inférieure à celle des autres positions. Il n'y a eu qu'à Saint-Ubalde, où les arbres avaient la hauteur la plus faible, que la PLTT ne variait pas selon la position de la culture. La plus faible valeur de PLTT ($80,1 \pm 7,8\%$) a été mesurée sur le site de Pointe-Fortune.

1.3.2 Humidité du sol

L'humidité du sol variait significativement selon la position de la culture ($n=220$, $F_{(4,150)}=3,49$, $P=0,009$), de la même manière sur tous les sites échantillonnés (Hudson, Pointe-Fortune, Ste-Brigide et St-Télesphore) et aux deux dates de d'échantillonnage (figure 4). L'humidité du sol à H était significativement supérieure à celle à C, bien que cette différence soit faible en valeur absolue.

1.3.3 Propriétés chimiques du sol

Aucune des mesures des propriétés chimiques du sol n'a révélé de différences en fonction de la position de la culture (CEC ($n=53$, $F_{(4,32)}=1,42$, $P=0,251$), carbone total ($n=53$, $F_{(4,32)}=0,82$, $P=0,520$), azote total ($n=53$, $F_{(4,32)}=1,32$, $P=0,284$), phosphore extractible ($n=53$, $F_{(4,32)}=0,47$, $P=0,759$), saturation en phosphore ($n=53$, $c^2(4)=1,89$, $P<0,756$) et pH ($n=218$, $F_{(4,141)}=2,15$, $P=0,078$)). Voir le tableau S3 dans les matériels supplémentaires pour plus de détails.

1.3.4 Rendement et composantes de rendement des cultures annuelles

Sur le site de Ste-Brigide, cultivé en soya, la position de la culture a eu un effet sur l'humidité des grains à la récolte ($n=32$, $c^2_{(3)}=10,88$, $P=0,012$), le nombre de tiges par m^2 ($n=32$, $F_{(3,20)}=6,01$, $P=0,004$) et le rendement ($n=32$, $c^2_{(3)}=62,98$, $P<0,001$) (figure 5). L'humidité des grains à la récolte à $\frac{1}{2}H$ était supérieure à celle à $\frac{1}{2}(H+C)$ (figure 5a). Le nombre de tiges par m^2 près des arbres ($\frac{1}{2}H$) était significativement inférieur (i.e. diminution de 10,1 tiges par m^2) à celui de H et de C (figure 5b). Le rendement à $\frac{1}{2}H$ était inférieur (i.e. diminution de 83,3 g par m^2) à n'importe quelles autres positions (figure 5c). Aucun effet significatif de la position de la culture sur le poids de 100 grains du soya ($n=32$, $F_{(3,21)}=1,58$, $P=0,224$) et le nombre de gousses par tige ($n=32$, $F_{(3,21)}=2,87$, $P=0,061$) n'a été mesuré (tableau S3).

Sur le site de Baie-du-Febvre (tableau S3), lui aussi cultivé en soya, la position de la culture n'a induit aucun effet sur l'humidité des grains à la récolte ($n=36$, $F_{(4,20)}=0,94$, $P=0,461$), le nombre de tiges par m^2 ($n=36$, $F_{(4,20)}=1,31$, $P=0,301$), le nombre de gousses par tige ($n=36$, $F_{(4,20)}=1,06$, $P=0,404$), le poids de 100 grains ($n=36$, $F_{(4,20)}=1,30$, $P=0,305$) et le rendement ($n=36$, $F_{(4,20)}=1,07$, $P=0,396$).

Sur le site de St-André (tableau S3), la position des cultures a eu un effet sur le nombre de gousses par tige ($n=36$, $c^2_{(4)}=44,50$, $P<0,001$) et le rendement du haricot noir ($n=36$, $c^2_{(4)}=294,37$, $P<0,001$) (figure 6). À $\frac{1}{2}H$, il y avait 3,4 gousses par tige et 6,9 g de grains par m^2 de moins en moyenne comparativement aux autres positions. Le type de système (SAI vs témoin sans arbre) a eu un effet sur le rendement intégré dans les allées cultivées ($n=12$, $t_{(7)}=2,45$, $P=0,044$) (figure 7 et tableau S4). Le rendement dans le témoin était supérieur de 20% (55,0 g par m^2) à celui dans le SAI. La position de la culture n'a eu aucun effet sur l'humidité des grains à la récolte ($n=35$, $F_{(4,19)}=0,12$, $P=0,975$), le nombre de tiges par m^2 ($n=36$, $F_{(4,20)}=0,55$, $P=0,704$) et le poids de 100 grains ($n=36$, $F_{(4,20)}=0,33$, $P=0,853$).

Sur le site de St-Télesphore, le nombre d'épis par tige ($n=36$, $c^2_{(4)}=32,35$, $P<0,001$), le nombre de tiges par m^2 ($n=36$, $F_{(4,20)}=3,66$, $P=0,022$) et le rendement ($n=36$,

$F_{(4,20)}=8,44$, $P=0,004$) étaient affectés par la position de la culture (figure 8). Le nombre d'épis par tige à $\frac{1}{2}H$ était inférieur (i.e. diminution de 0,1 épis par plant) à celui à H, $\frac{1}{2}(H+C)$ et C (figure 8a). Le nombre de tiges par m^2 à H était inférieur (i.e. diminution de 1,2 tiges par m^2) à celui à C. Le rendement à $\frac{1}{2}H$ était inférieur (i.e. diminution de 530 g par m^2) à celui à $\frac{1}{2}(H+C)$ et C. Il n'y avait aucun effet de la position de la culture sur l'humidité des grains à la récolte ($n=36$, $F_{(4,20)}=1,59$, $P=0,216$) et le poids de 100 grains ($n=36$, $F_{(4,20)}=2,21$, $P=0,104$). Le type de système (SAI vs témoin sans arbre) n'affectait le rendement intégré du maïs ($n=12$, $t_{(7)}=1,59$, $P=0,156$).

1.3.5 Rendement des cultures fourragères

Sur le site de Pointe-Fortune, la position de la culture a eu un effet marginal sur le rendement en matière sèche de fourrage ($n=81$, $F_{(4,50)}=2,26$, $P=0,076$), peu importe la date de récolte ($n=81$, $F_{(8,42)}=0,62$, $P=0,755$). Les rendements à $\frac{1}{2}H$ tendaient à être supérieurs à ceux à $\frac{1}{2}(H+C)$. Aucun effet du type de système sur le rendement n'a été mesuré ($n=27$, $t_{(16)}=-0,22$, $P=0,826$).

Sur le site de Hudson, le rendement de la culture fourragère variait selon une interaction entre la position de la culture et la date de prélèvement ($n=96$, $F_{(6,63)}=4,31$, $P=0,001$) (figure 9). En effet, la position de la culture n'a eu aucune incidence sur les rendements lors de la 1^{ère} et 3^e récolte. Cependant, lors de la 2^e récolte, le rendement à $\frac{1}{2}H$ était inférieur de 61,5 g de matière sèche par m^2 à celui à C.

Sur le site de Saint-Ubalde, il n'y a pas eu d'effet significatif de la position de la culture sur le rendement de la culture fourragère ($n=70$, $F_{(4,42)}=1,87$, $P=0,133$), peu importe la date de récolte ($n=70$, $F_{(4,38)}=0,55$, $P=0,698$).

1.3.6 Taux d'envahissement des cultures annuelles par les mauvaises herbes

Sur le site de Ste-Brigide, le taux d'envahissement par les mauvaises herbes variait selon la position de la culture ($n=32$, $c^2(4)=1194,50$, $P<0,001$) (figure 10a). Le taux d'envahissement de mauvaises herbes à $\frac{1}{2}H$ (53,9%) était supérieur à celui aux autres positions (9,7%).

Sur le site de Baie-du-Febvre, le taux d'envahissement par les mauvaises herbes ne variait pas selon la position des cultures ($n=36$, $c^2(4)=2,71$, $P=0,607$) (figure 10b). À noter que malgré un fort taux de recouvrement de mauvaises herbes, il s'agissait principalement de *Taraxacum sp.* et qu'elle était seulement présente en sous-étage du soya et qu'elle était très fortement détériorée.

Sur le site de St-André, la quantité de mauvaises herbes était significativement affectée par la position de la culture ($n=32$, $c^2(4)=63,73$, $P<0,001$) (figure 10c). Le taux d'envahissement était le plus élevé à $\frac{1}{2}H$ (85%) et diminuait progressivement avec l'éloignement de la rangée d'arbres. Les plus faibles valeurs ont été mesurées à C et dans le témoin.

Sur le site de St-Télesphore, il y avait une absence totale de mauvaises herbes à toutes les positions de la culture (figure 10d).

1.3.7 Relations entre les variables mesurées

Sur le site de St-André, le nombre de gousses par tige était corrélé positivement avec la PLTT ($n=35$, $t(21)=2,22$, $P=0,037$) et corrélé négativement avec le taux d'envahissement des mauvaises herbes ($n=35$, $t(21)=-3,55$, $P=0,002$) avec un $R^2_{aj}=0,49$. Le rendement était lui aussi corrélé positivement avec la PLTT ($n=35$,

$t(21)=3,08$, $P=0,006$) et corrélé négativement avec le taux d'envahissement des mauvaises herbes ($n=35$, $t(21)=-4,24$, $P<0,001$) avec un $R^2_{aj}=-0,69$. Sur le site de St-Télesphore, la PLTT était corrélée positivement avec le nombre d'épis par tige ($n=36$, $t(23)=2,42$, $P=0,024$, $R^2_{aj}=0,17$), le poids de 100 grains ($n=36$, $t(23)=3,00$, $P=0,007$, $R^2_{aj}=0,33$) et le rendement ($n=36$, $t(23)=3,94$, $P<0,001$, $R^2_{aj}=0,35$). Sur le site de Ste-Brigide, le rendement était corrélé positivement, mais marginalement, avec la PLTT ($n=30$, $t(20)=1,88$, $P=0,075$) et corrélé négativement avec le taux d'envahissement des mauvaises herbes ($n=30$, $t(21)=-3,44$, $P=0,003$) avec un $R^2_{aj}=0,57$. Le nombre de plants par m^2 était négativement corrélé avec l'humidité du sol lors de la 1^{ère} date de prélèvement ($n=31$, $t(21)=-2,98$, $P=0,007$, $R^2_{aj}=0,35$). Voir le tableau S5 dans les matériels supplémentaires pour plus de détails.

1.4 Discussion

Selon les sites, les rendements et les composantes de rendement étaient corrélés positivement à la PLTT, négativement au taux d'envahissement par les mauvaises herbes ou une combinaison de ces deux facteurs. En revanche, en aucun cas, l'humidité du sol et les propriétés chimiques du sol n'étaient corrélées avec le rendement et ses composantes. Ce résultat suggère que la concurrence entre les arbres et la culture pour les ressources du sol était peu importante sur les sept sites expérimentaux pendant notre étude. Ceci supporte l'hypothèse que dans les SAI des régions tempérées froides de l'Amérique du Nord, la productivité des cultures est principalement limitée par la compétition aérienne (Peng *et al.*, 2015 ; Reynolds *et al.*, 2007 ; Rivest *et al.*, 2009). En revanche, dans les régions tempérées chaudes de l'Amérique du Nord, la productivité des cultures serait co-limitée par la disponibilité de la lumière et de l'eau ou limitée par la compétition pour l'eau (Gillespie *et al.*, 2000 ; Miller et Pallardy, 2001 ; Wanvestraut *et al.*, 2004).

Nos résultats tendent à supporter notre prédiction initiale que la réponse des cultures face à une réduction de la PLTT en SAI varie selon l'ordre suivant : maïs > culture annuelle en C₃ > culture fourragère. En effet, sur le site de Baie-du-Febvre, on a observé que le soya n'a pas été affecté par la diminution significative de la PLTT à ½H. En revanche, sur le site de St-Télesphore, ayant des caractéristiques similaires au site de Baie-du-Febvre (tableau 1), on a observé que le maïs a été affecté par la diminution significative de la PLTT à ½H ; toutes les autres variables explicatives du rendement n'ayant par ailleurs pas été affectées par la position de la culture sur les deux sites. Reynolds *et al.* (2007), dans un SAI de 10 ans en Ontario, ont eux aussi mesuré une plus faible tolérance du maïs, comparativement au soya, à une réduction de la disponibilité de la lumière à la proximité des rangées d'arbres. Miller et Pallardy (2001), dans un SAI de 8 ans au Missouri aux États-Unis, en isolant l'effet d'ombrage des arbres de l'effet de la compétition racinaire en cernant leurs racines, ont démontré que la réduction de la disponibilité de la lumière à proximité de la rangée d'arbres a limité le taux de photosynthèse nette, le potentiel hydrique et le rendement du maïs. D'autres travaux aux États-Unis ont pour leur part démontré la grande tolérance des cultures fourragères à l'ombrage des arbres agroforestiers (Burner, 2003 ; DBU, 2010 ; Gamble *et al.*, 2014 ; Jose *et al.*, 2004). Par ailleurs, dans des expériences sous ombrières artificielles, il a été démontré que plusieurs espèces de plantes agricoles fourragères cultivées à des taux d'ombrage de l'ordre de 50% (i.e. PLTT = 50%) offrent des rendements équivalents à celles cultivées en pleine lumière (Lin *et al.*, 1999).

L'effet de la position de la culture sur les rendements agricoles, lorsque significatif, a été limité à ½H sur les sites de St-Télesphore et de St-André. Comme les arbres étaient relativement petits sur ces sites (5,2 et 3,5 m, respectivement), la zone que couvrait ½H sur toute la surface de l'allée cultivée était inférieure à 15%. Ainsi, sur le site de St-Télesphore, où croissait du maïs, la baisse de rendement à ½H (diminution de 23% par rapport au témoin) ne s'est pas traduite par une diminution significative du rendement intégré dans les allées du SAI. Certains auteurs ont en effet avancé qu'on peut

s'attendre à ce que les rendements dans les SAI de deuxième génération soient égaux ou supérieurs à ceux des systèmes agricoles conventionnels, au moins jusqu'à la moitié de la vie des arbres (Dupraz et Liagre, 2008). En revanche, sur le site de St-André, l'importante baisse de rendement à $\frac{1}{2}H$ (diminution de 59% par rapport au témoin) s'est traduite par une diminution significative du rendement intégré dans les allées du SAI. Cette diminution du rendement intégré sur le site de St-André, cultivé en haricot noir, est assez inattendue et serait associée à un fort taux d'envahissement de la culture de haricot noir par les mauvaises herbes proches de la rangée d'arbres. Deux mécanismes peuvent expliquer ce fort envahissement. Premièrement, la bande non cultivée sous les arbres peut agir comme réservoir de mauvaises herbes (Boutin *et al.*, 2001 ; Marshall et Moonen, 2002) qui peuvent retourner dans les champs cultivés adjacents (Bond, 1987 ; Boutin *et al.*, 2001 ; Boutin et Jobin, 1998). Deuxièmement, il est possible que la complexification des déplacements des tracteurs en SAI résulte en des épandages d'herbicides moins uniformes, rendant leur effet sur l'élimination des mauvaises herbes plus hétérogène que dans des systèmes agricoles conventionnels (Graves *et al.*, 2009). Il est difficile d'établir l'importance relative de ces deux mécanismes sur le site de St-André. Cependant, sur le site de Ste-Brigide, en régie biologique, la maîtrise des mauvaises herbes s'est fait mécaniquement et de façon uniforme dans les allées. Les mauvaises herbes demeuraient importantes à $\frac{1}{2}H$ sur ce site, le premier mécanisme explique sans doute la plus grande abondance des mauvaises herbes à $\frac{1}{2}H$ comparativement aux autres positions de la culture par rapport à la rangée d'arbres.

Sur les sites de Ste-Brigide et de St-Télésphore, une réduction significative du nombre de tiges de soya et de maïs par m^2 a été mesurée à proximité de la rangée d'arbres. De plus, une réduction significative du nombre de gousses de soya (St-André) ou d'épis de maïs (St-Télésphore) par tige a été mesurée près des arbres. En revanche, aucun effet des SAI sur le poids de 100 grains n'a été observé sur ces trois sites. Ces résultats suggèrent une plus grande sensibilité du maïs et des cultures oléaprotéagineuses, sur

nos sites, à la variation des conditions environnementales en SAI pendant leurs stades de croissance végétatifs et leurs premiers stades reproductifs (floraison et formation des gousses et épis) plutôt que pendant les derniers stades reproductifs (remplissage des grains) (Rivest *et al.*, 2009).

Aucun effet significatif des SAI sur les propriétés chimiques des sols n'a été observé. Sur le site de Baie-du-Febvre, il est probable que cette absence d'effet soit attribuable à des apports limités des jeunes arbres (5 ans) en matière organique. Cette hypothèse est supportée par une étude de Pardon *et al.* (2017) réalisée en Belgique. Les auteurs n'ont pas mesuré d'effets significatifs de six jeunes SAI similaires à ceux de notre étude (4-5 ans, écartements entre les rangées d'arbres de 26 à 54 m) sur le C organique, le pH et le statut nutritif du sol (N, P, K, Ca, Mg et Na). Par contre, dans la zone à proximité de haies agroforestières (i.e. à moins de 20 m de la rangée d'arbres) plus âgées (15-47 ans, 17-33 m de hauteur), les auteurs ont mesuré une augmentation significative du C organique et de la concentration de certains éléments nutritifs du sol (N, P, K, Mg et Na). Cet effet s'estompait en s'éloignant de la rangée d'arbres. Sur le site de Ste-Brigide, où les arbres avaient 21 ans, l'absence d'effet de la position de la culture sur les propriétés chimiques des sols demeure donc surprenante, bien que cela n'indique pas nécessairement que le SAI n'a pas eu d'effet sur la fertilité du sol. En effet, avec l'absence de témoins agricoles répétés sur le site, nous sommes dans l'impossibilité de tirer une telle conclusion. Des analyses chimiques d'échantillons de sol prélevés dans une parcelle témoin (non répétée) adjacente au SAI ont par exemple montré que le phosphore extractible dans le SAI ($44,7 \pm 7,8$ mg/kg) était nettement supérieur à celui dans la parcelle témoin (27,5 mg/kg). La limitation de notre étude résultant de l'absence de témoins agricoles répétés sur certains sites ainsi que de certains facteurs confondants générés par les activités des producteurs agricoles (*e.g.* application hétérogène des intrants) confirme la grande complexité de l'expérimentation des SAI qui a été soulignée par d'autres auteurs (Dupraz, 1998 ;

Lovell *et al.*, 2017). Dans ce cas, il serait important que la planification de futurs SAI se fasse en collaboration très serrée avec les producteurs agricoles.

1.5 Conclusion

Des réductions de rendement du haricot noir, du soya et du maïs ont été observées dans la zone proche de l'interface entre les rangées d'arbres et la culture agricole en SAI. Ces réductions de rendement étaient associées à une diminution de la disponibilité de la lumière et/ou à une augmentation du taux d'envahissement de la culture par des mauvaises herbes. Aucune relation significative entre les rendements des cultures et l'humidité ou les propriétés chimiques du sol n'a été détectée, ce qui suggère une absence ou un faible effet de la concurrence entre les arbres et les cultures pour les ressources souterraines. Nos résultats indiquent que les cultures fourragères sont moins sensibles que les cultures annuelles face aux changements de lumière apportées par les SAI et à la compétition par les mauvaises herbes. Une réduction du rendement intégré des cultures dans les allées cultivées (toutes les distances combinées) du SAI n'a été mesurée que sur un seul site, soit celui cultivé en haricot noir, où un fort envahissement de la culture par les mauvaises herbes a été observé. Les résultats de cette étude, pris dans leur ensemble, indiquent que les jeunes SAI intégrant de larges écartements d'arbres sont susceptibles d'avoir des effets neutres sur la production agricole si les mauvaises herbes sont bien maîtrisées. Considérant ces rendements, les SAI de 2^e génération semblent plus prometteurs que les SAI de 1^{ère} génération. Ces nouvelles connaissances permettent d'envisager un déploiement à grande échelle de SAI mieux adapté à la réalité des producteurs de grandes cultures. Mais un manque à gagner dans les connaissances se doit d'être tout de même fait. Il serait intéressant que des recherches s'effectuent pour améliorer la résistance des cultures à la présence des arbres ou de tester l'effet individuel des mauvaises herbes et de la lumière sur les rendements agricoles.

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés grâce à une aide financière du Programme Innov'Action agroalimentaire, un programme issu de l'accord Cultivons l'avenir 2 conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, et Agriculture et Agroalimentaire Canada. Cette étude a aussi été financée par le Fond de Recherche du Québec – Nature et Technologies (FRQNT) qui a versé une bourse de maîtrise à Maxime Carrier. Nous tenons à remercier les producteurs agricoles et propriétaires qui ont participé à cette étude. Et le personnel de soutien, Yves-Régis Pouliot, Srdjan Ostojic, Hélène Lalande, Antoine Magnoux, Anne Vanasse, les différentes stagiaires et tous les producteurs agricoles et propriétaires chez qui nous sommes allés à répétition.

Tableau 1. Résumé des caractéristiques biophysiques des sites expérimentaux.

Nom des sites	Ste-Brigide	St-Téléphore	Baie-du-Febvre	St-Ubalde	St-André	Pointe-Fortune	Hudson
Latitude	45°22' N	45°17' N	46°08' N	46°45' N	47°37' N	45°33' N	45°28' N
Longitude	73°02' O	74°26' O	72°40' O	72°17' O	69°44' O	74°22' O	74°12' O
Température moyenne annuelle en 2016 (°C)	6,5	5,8	5,3	4,0	3,4	6,0	6,0
Moyenne annuelle de précipitation (mm)*	1103	1077	924	1133	998	999	999
Sol	% de sable	9	19	66	78	69	58
	% de limon	47	47	22	18	26	33
	% d'argile	45	33	11	4	5	9
	pH	6,8	6,3	6,4	6,1	6,4	6,9
Année d'implantation	1996	2014	2012	2013	2012	2011	2011
Écartement entre les rangées d'arbres (m)	90	38	39	33	30	25	25
Espacement des arbres sur la rangée (m)	4	5	5	5	5	6	6
Densité de plantation (nb arbres/ha)	28	53	51	61	67	67	67
Hauteur moyenne H (m)**	12,7 ± 1,3	5,2 ± 0,2	6,3 ± 0,4	3,6 ± 0,3	3,5 ± 0,4	6,0 ± 0,5	7,7 ± 0,3
Culture en 2016	soya	maïs	soya	luzerne	haricot noir	fourrages	fourrages
Régie agricole***	BIO	C	C	C	C	C	C
	TM	TM	SD	TM	TM	TM	TM
Fertilisation en azote de la culture (kg N/ha)	25	150	25	0	25	0	0
Système de drainage	oui	oui	oui	non	non	non	oui / non
Nombre de bloc	4	4	4	4	4	3	4

* Données météorologiques issues entre 1981-2010.

** L'écart-type de la hauteur moyenne est issu de la variabilité inter-blocs

*** BIO = Biologique, C= Conventionnelle, SD= Semi-direct, TM = Travail mécanique du sol en pré-semis

Tableau 2. Modèles linéaires mixtes pour chacune des variables analysées. Pour les variables aléatoires, tous les modèles avaient l'orientation nichée dans le bloc pour tenir compte de la corrélation. Les modèles des variables environnementales comprenaient le bloc niché dans le site et les sites ont été considérés comme des variables fixes pour vérifier si l'effet position différait entre les sites. PLTT = proportion de lumière totale transmise.

PLTT	$\ln(\text{PLTT}) \sim \text{position} * \text{site} + (1 \text{site}/\text{bloc}/\text{orientation})$
Propriétés chimiques du sol (sol)	$\ln(\text{sol}) \sim \text{position} * \text{site} + (1 \text{site}/\text{bloc}/\text{orientation})$
Humidité du sol (hum)	$\ln(\text{hum}) \sim \text{position} * \text{site} + \text{distance} * \text{date de prélèvement} + (1 \text{date de prélèvement}/\text{site}/\text{bloc}/\text{orientation})$
Mauvaises herbes (MH)	$\ln(\text{MH}) \sim \text{position} + (1 \text{bloc}/\text{orientation})$
Rendement culture annuelle (RCA)	$\ln(\text{RCA}) \sim \text{position} + (1 \text{bloc}/\text{orientation})$
Rendement culture fourragère (RCF)	$\ln(\text{RCF}) \sim \text{position} * \text{date de récolte} + (1 \text{récolte}/\text{bloc}/\text{orientation})$
Rendement intégré de la culture annuelle (RICA)	$\ln(\text{RICA}) \sim \text{type système} + (1 \text{bloc}/\text{orientation})$
Rendement intégré de la culture fourragère (RICF)	$\ln(\text{RICF}) \sim \text{type de système} + (1 \text{date de récolte}/\text{bloc}/\text{orientation})$

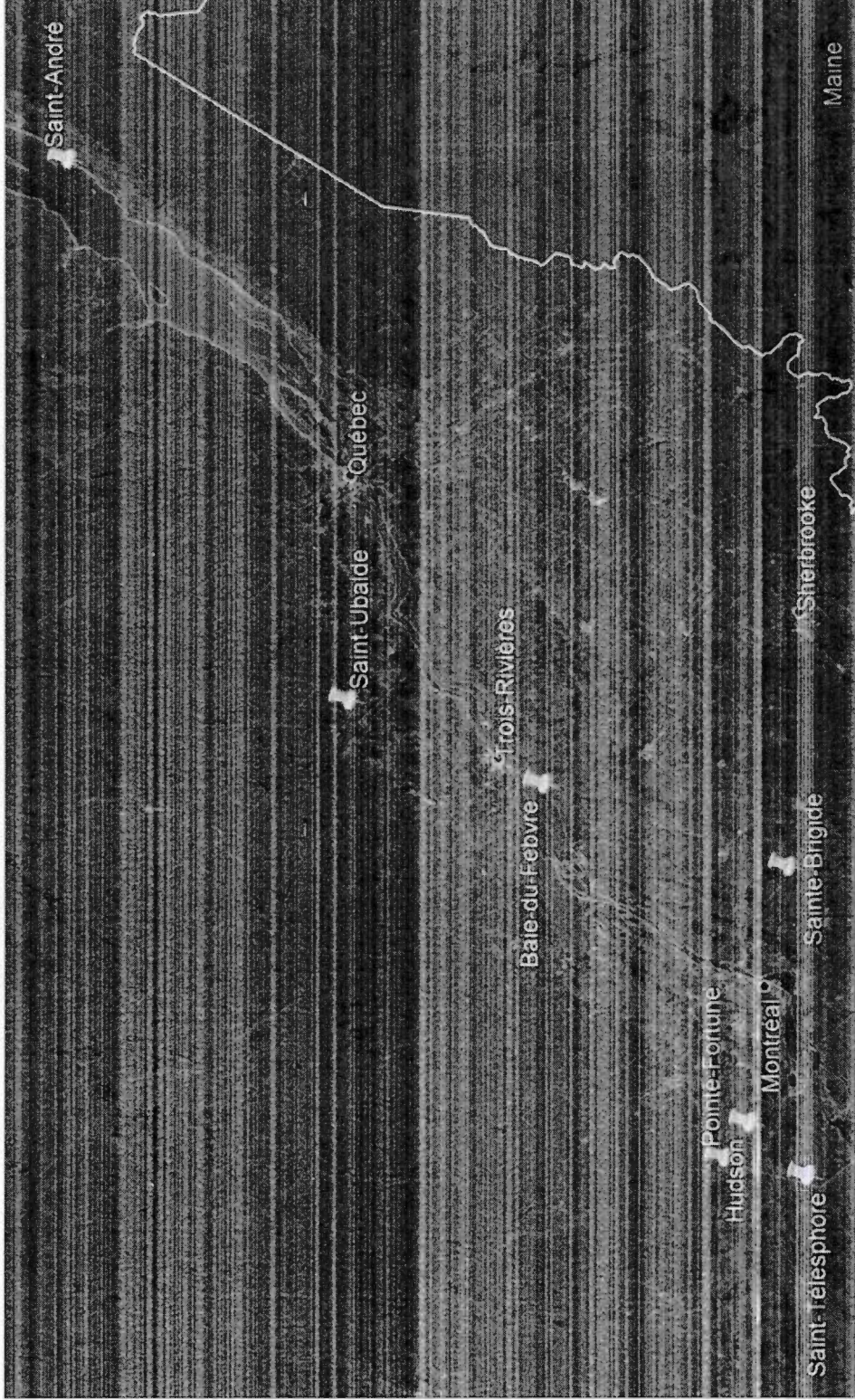


Figure 1. Localisation des sites expérimentaux. Les sites sont représentés avec les punaises.

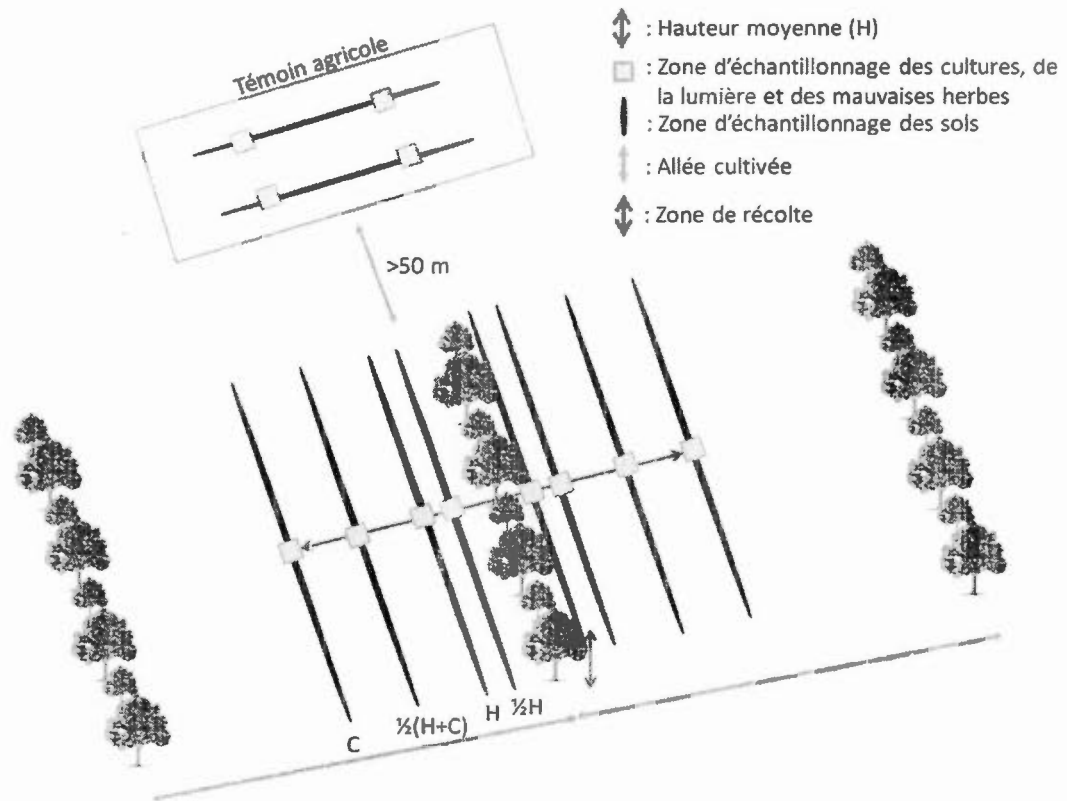


Figure 2. Plan d'échantillonnage des cultures, des sols, de la lumière et des mauvaises herbes dans un bloc expérimental. H= hauteur des arbres, C = centre des allées cultivées.

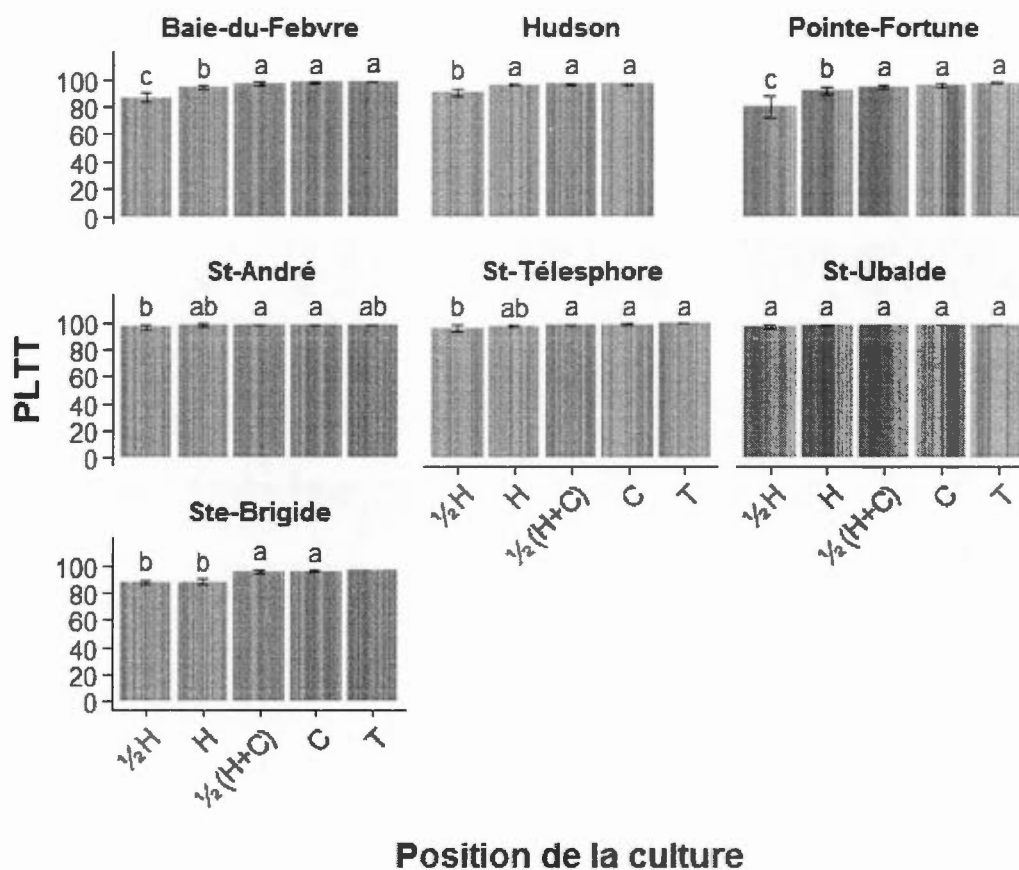


Figure 3. Proportion de lumière totale transmise (PLTT) selon la position de la culture dans sept systèmes agroforestiers intercalaires implantés au Québec, Canada. À noter que le témoin de Ste-Brigide était non répété dans les différents blocs et est présenté à titre indicatif uniquement. H= hauteur des arbres, C = centre des allées cultivées, T = témoin. Les barres verticales indiquent l'écart-type. Pour chaque site, les moyennes avec des lettres différentes sont significativement différentes à $P < 0,05$ (test de Tukey).

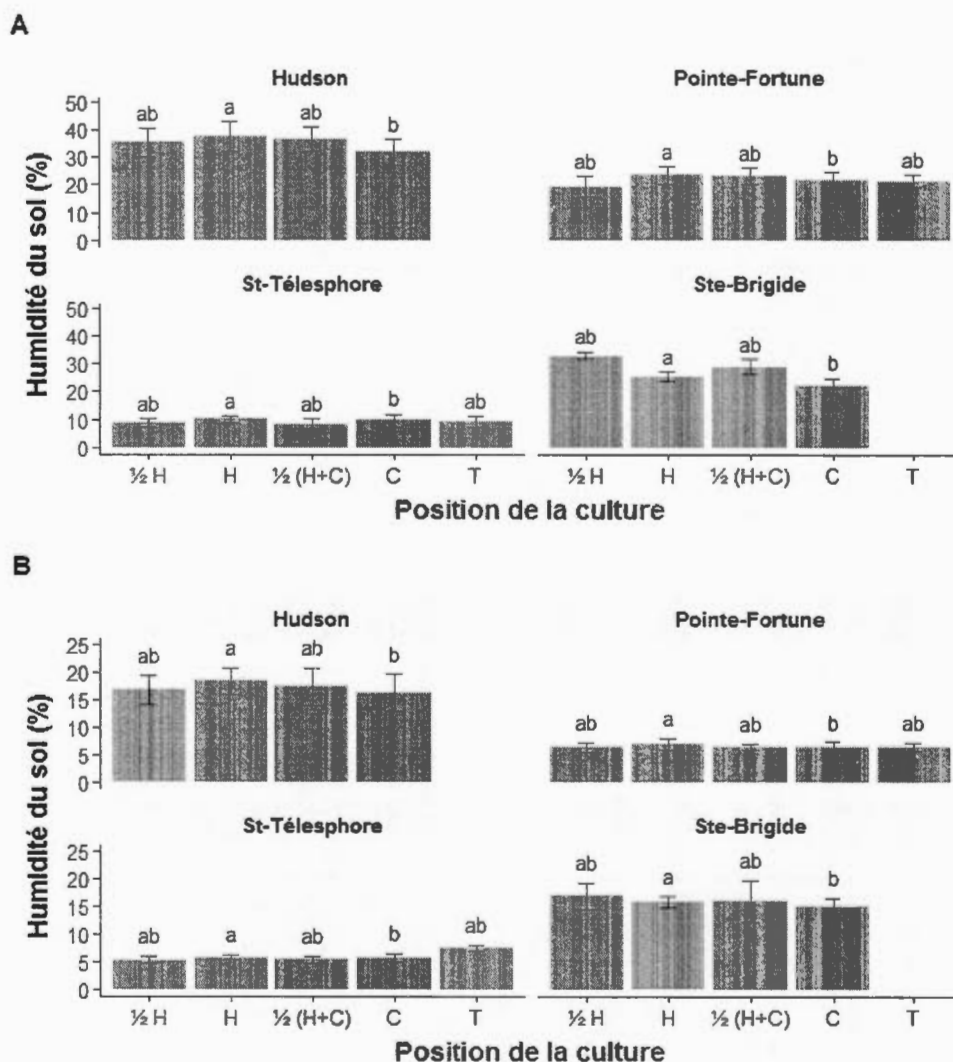


Figure 4. Humidité du sol selon la position de la culture après (A) une période de précipitation normale (entre 57,0 et 79,7 mm sur 14 jours selon le site) et (B) une période de très faible précipitation (entre 3,5 et 7,6 mm sur 14 jours selon le site) dans quatre systèmes agroforestiers intercalaires implantés au Québec, Canada (Hudson, Pointe-Fortune, St-Télesphore et Ste-Brigide). Les moyennes intègrent deux dates d'échantillonnage (juillet et août 2016). H= hauteur des arbres, C = centre des allées cultivées, T= témoin. Les barres verticales indiquent l'écart-type. Les moyennes avec des lettres différentes sont significativement différentes à $P < 0,05$ (test de Tukey).

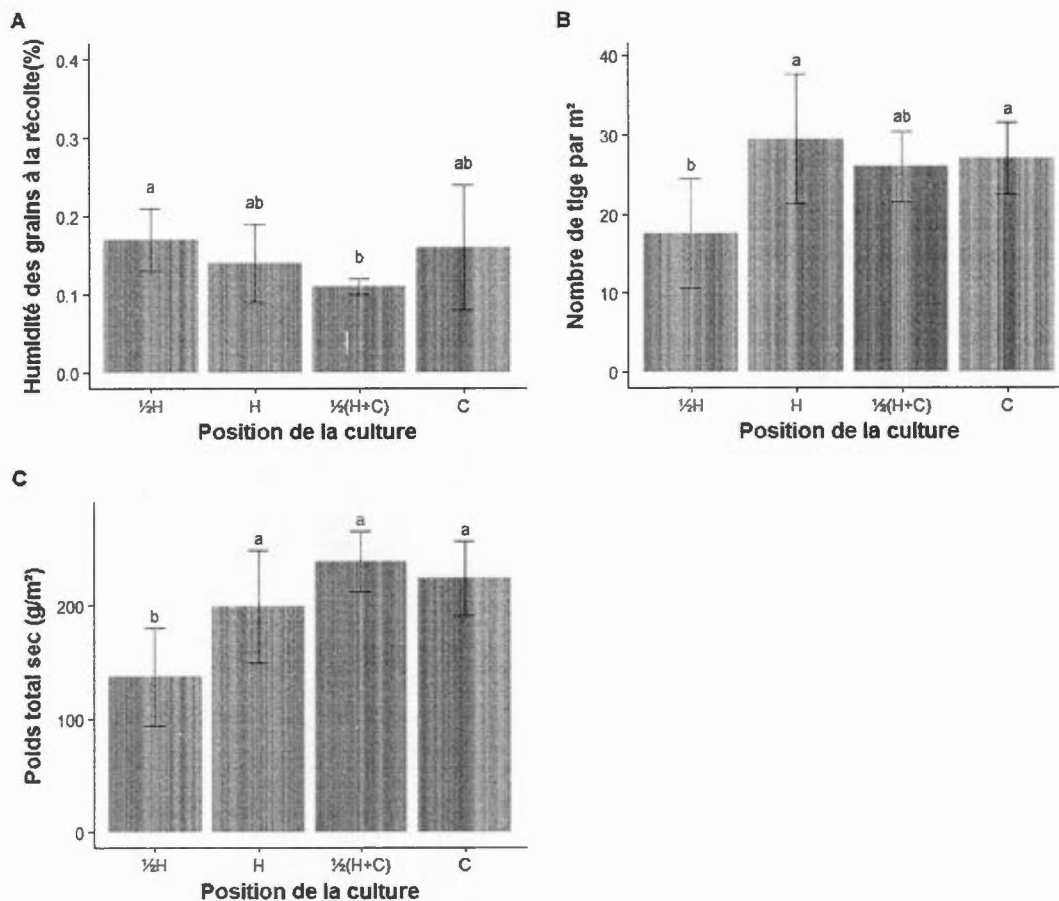


Figure 5. Humidité des grains à la récolte (A), nombre de tiges par m² (B) et rendement (poids total sec) du soya (grains) (C) selon la position de la culture sur le site de Ste-Brigide, Québec, Canada. À noter qu'il n'y avait pas de témoin valable répété pour ce site. H= hauteur des arbres, C = centre des allées cultivées. Les barres verticales indiquent l'écart-type. Pour chaque composante de rendement, les moyennes avec des lettres différentes sont significativement différentes à P<0,05 (test de Tukey).

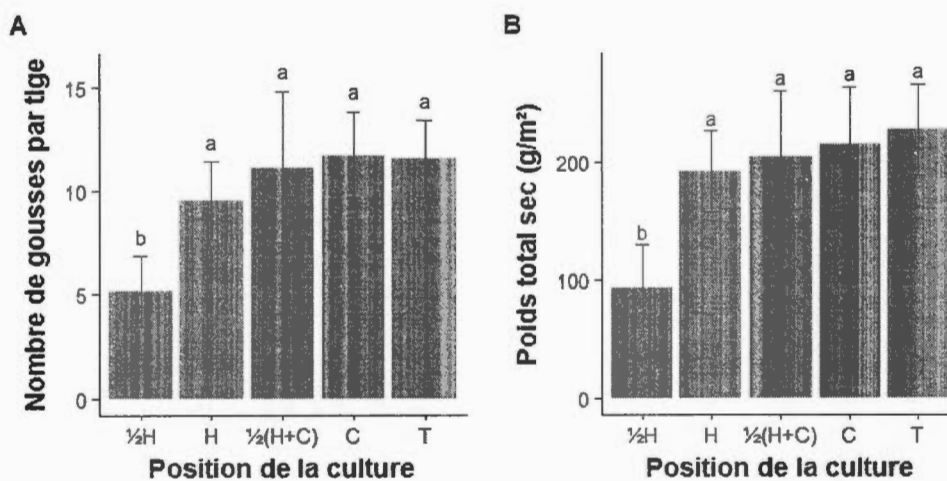


Figure 6. Nombre de gousses par tige (A) et rendement (poids total sec) du haricot noir (grains) (B) selon la position de la culture sur le site de St-André, Québec, Canada. H= hauteur des arbres, C = centre des allées cultivées, T = témoin. Les barres verticales indiquent l'écart-type. Pour chaque composante de rendement, les moyennes avec des lettres différentes sont significativement différentes à $P < 0,05$ (test de Tukey).

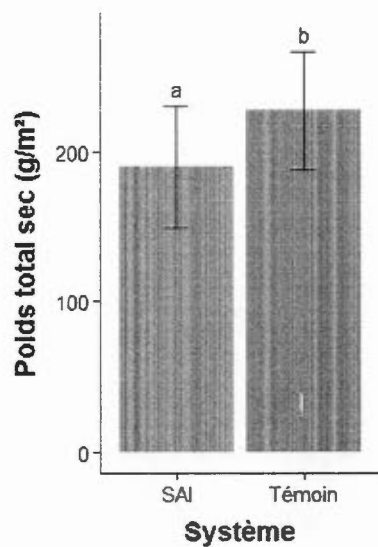


Figure 7. Rendement intégré (poids total sec) du haricot noir selon le système agricole (SAI vs témoin sans arbre) sur le site de St-André, Québec, Canada. Les barres verticales indiquent l'écart-type. Les moyennes avec des lettres différentes sont significativement différentes à $P < 0,05$ (test de Tukey).

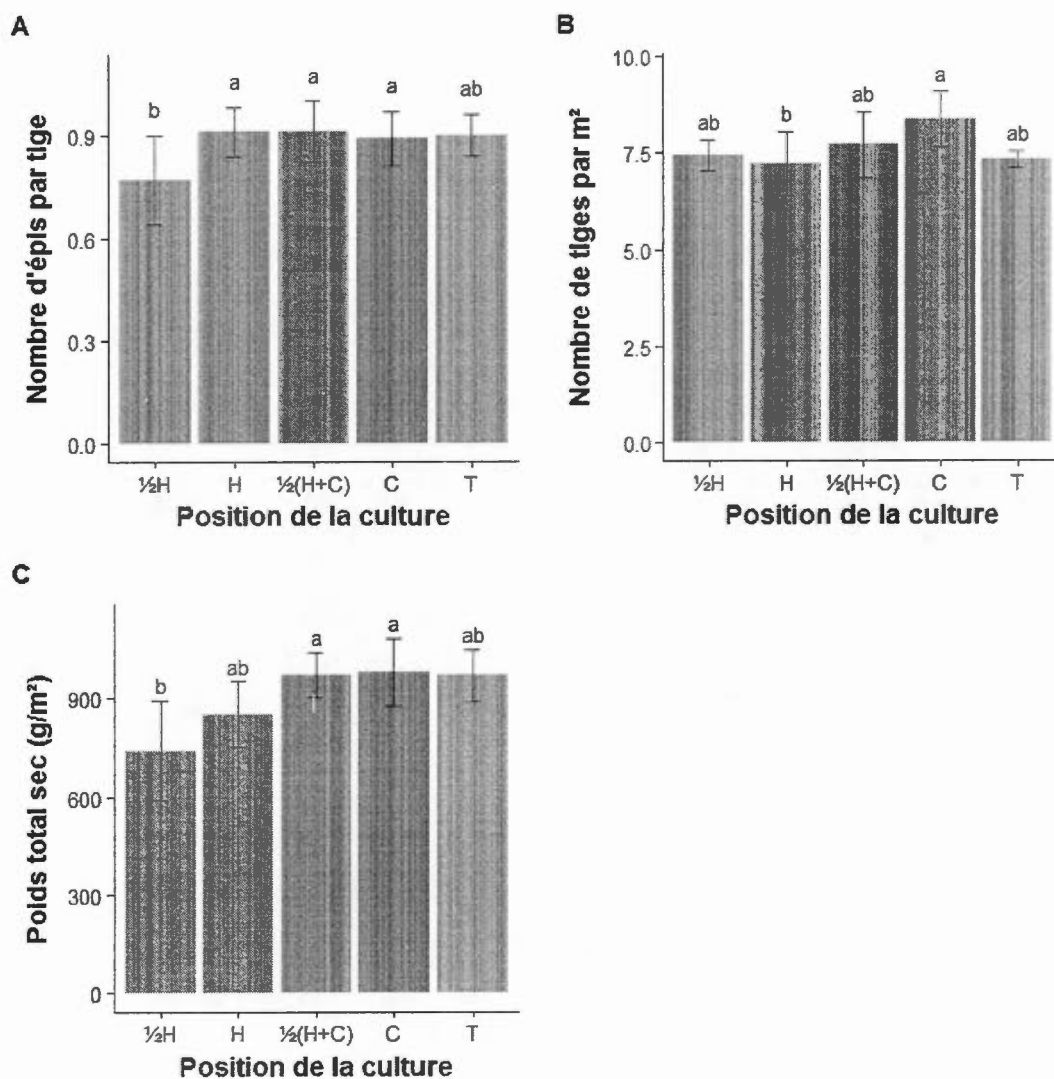


Figure 7. Nombre d'épis par tige (A), nombre de tiges par m² (B) et rendement (poids total sec) du maïs (grains) (C) en fonction de la position de la culture sur le site de St-Téléspore, Québec, Canada. H= hauteur des arbres, C = centre des allées cultivées, T = témoin. Les barres verticales indiquent l'écart-type. Pour chaque composante de rendement, les moyennes avec des lettres différentes sont significativement différentes à $P < 0,05$ (test de Tukey).

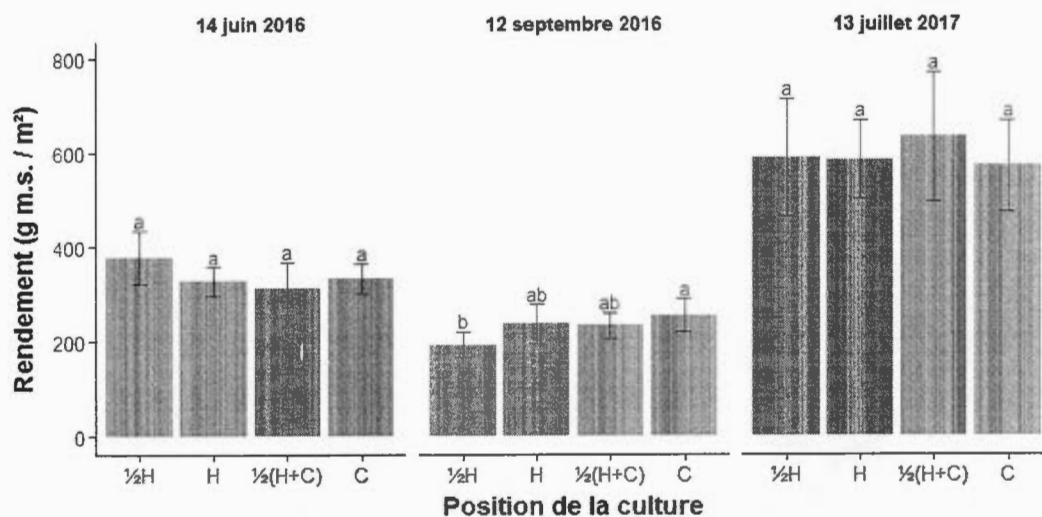


Figure 8. Rendement de la culture fourragère selon la position de la culture sur le site de Hudson (Québec, Canada) lors de trois dates de récolte. H= hauteur des arbres, C = centre des allées cultivées. Les barres verticales indiquent l'écart-type. À chaque date, les moyennes avec des lettres différentes sont significativement différentes à $P < 0,05$ (test de Tukey).

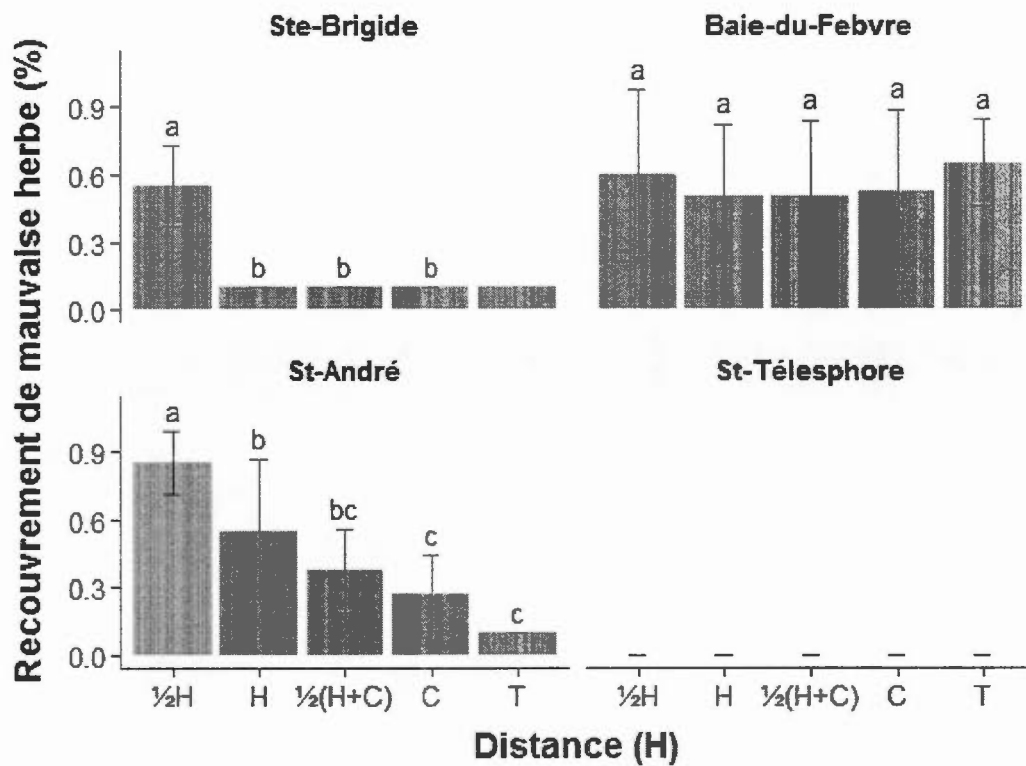


Figure 9. Taux d'envahissement des cultures annuelles par les mauvaises herbes selon la position de la culture à Ste-Brigide, Baie-du-Febvre, St-André et St-Télesphore, Québec, Canada. H= hauteur des arbres, C = centre des allées cultivées, T = témoin. Les barres verticales indiquent l'écart-type. Pour chaque site, les moyennes avec des lettres différentes sont significativement différentes à $P < 0,05$ (test de Tukey).

Tableau S3. Moyennes et écarts-types des variables microenvironnementales, édaphiques et de production agricole pour chaque position de la culture et pour la moyenne générale du site. H= hauteur des arbres, C = centre des allées cultivées, T = témoin.

Site	Position de la culture					Moyenne générale
	½ H	H	½ (H+C)	C	T	
Baie-du-Febvre (soya)						
Carbone total (%)	1,67 ± 0,46	1,74 ± 0,36	1,67 ± 0,34	1,7 ± 0,38	1,95 ± 0,18	1,72 ± 0,36
Azote total (%)	0,14 ± 0,03	0,14 ± 0,03	0,14 ± 0,03	0,14 ± 0,03	0,17 ± 0,04	0,14 ± 0,03
pH	6,47 ± 0,22	6,44 ± 0,22	6,36 ± 0,19	6,35 ± 0,13	6,3 ± 0,2	6,39 ± 0,19
CEC (cmol/kg)	8,75 ± 3,17	9,03 ± 3,62	7,81 ± 2,78	7,83 ± 2,59	9,43 ± 4,69	8,47 ± 3,13
Phosphore extractible (mg/kg)	51,43 ± 25,79	57,53 ± 34,09	60,65 ± 29,3	56,41 ± 30,84	68,15 ± 31,58	57,8 ± 28,93
Saturation du phosphore (%)	4,21 ± 2,04	4,7 ± 2,82	5,14 ± 2,58	4,75 ± 2,81	5,9 ± 1,44	4,83 ± 2,4
Poids total sec (g/m ²)	316,15 ± 72,6	306,86 ± 84,45	369,33 ± 79,45	343,85 ± 62,78	333,33 ± 41,31	333,9 ± 68,12
Poids de 100 grains (g)	17,06 ± 0,87	16,58 ± 1,55	16,2 ± 0,81	16,19 ± 1,79	16,43 ± 0,93	16,5 ± 1,26
Nombre de tige par m ²	27,89 ± 8,14	22,97 ± 2,72	25,1 ± 2,48	25,59 ± 2,43	26,9 ± 1,69	25,69 ± 3,49
Humidité des grains (%)	0,21 ± 0,06	0,24 ± 0,08	0,22 ± 0,07	0,24 ± 0,1	0,28 ± 0,13	0,23 ± 0,08
Nombre de gousses par tige	39,7 ± 9,94	44,05 ± 11,91	48,03 ± 5,65	43,9 ± 7,59	44,73 ± 7,37	44,01 ± 8,87
Humidité des sols (22-07-16) (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Humidité des sols (11-08-16) (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
PLTT (%)	87,24 ± 3,22	94,63 ± 0,91	97,28 ± 0,98	97,95 ± 0,23	98,28 ± 0,25	94,72 ± 4,54
St-André (haricot noir)						
Carbone total (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Azote total (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
pH	6,43 ± 0,18	6,3 ± 0,2	6,29 ± 0,2	6,37 ± 0,35	6,67 ± 0,26	6,38 ± 0,26
CEC (cmol/kg)	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Position de la culture

Site

	½ H	H	½ (H+C)	C	T	Moyenne générale
Phosphore extractible (mg/kg)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Saturation du phosphore (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Poids total sec (g/m ²)	92,7 ± 36,84	191,67 ± 34,76	204,98 ± 55,34	215,14 ± 48,48	227,01 ± 38,8	186,3 ± 42,84
Poids de 100 grains (g)	18,19 ± 1,16	17,81 ± 0,93	18,25 ± 0,89	18,28 ± 0,79	18,13 ± 0,55	18,13 ± 0,89
Nombre de tige par m ²	27,89 ± 4,15	26,99 ± 1,51	25,51 ± 3,22	26,5 ± 4,49	26,41 ± 2,36	26,66 ± 3,15
Humidité des grains (%)	0,13 ± 0,01	0,13 ± 0,01	0,13 ± 0,01	0,13 ± 0,01	0,13 ± 0,01	0,13 ± 0,01
Nombre de gousses par tige	5,13 ± 1,69	9,53 ± 1,92	11,14 ± 3,66	11,73 ± 2,08	11,55 ± 1,85	9,62 ± 3,42
Humidité des sols (22-07-16) (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Humidité des sols (11-08-16) (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
PLTT (%)	96,67 ± 1,89	97,93 ± 1,15	98,64 ± 0,24	98,73 ± 0,22	98,71 ± 0,12	98,08 ± 1,3
Ste-Brigide (soya)						
Carbone total (%)	1,51 ± 0,11	1,55 ± 0,27	1,61 ± 0,31	1,37 ± 0,17	NA	1,51 ± 0,22
Azote total (%)	0,13 ± 0	0,14 ± 0,01	0,14 ± 0,02	0,12 ± 0,01	NA	0,13 ± 0,01
pH	6,88 ± 0,06	6,72 ± 0,12	6,74 ± 0,14	6,85 ± 0,05	NA	6,8 ± 0,12
CEC (cmol/kg)	19,98 ± 0,43	19,35 ± 0,42	19,43 ± 0,62	19,88 ± 1,22	NA	19,66 ± 0,72
Phosphore extractible (mg/kg)	42,28 ± 1,29	43,25 ± 10,19	41,43 ± 3	51,98 ± 9,66	NA	44,73 ± 7,79
Saturation du phosphore (%)	4,33 ± 0,22	4,45 ± 0,77	4,25 ± 0,41	5,98 ± 0,78	NA	4,75 ± 0,91
Poids total sec (g/m ²)	137,38 ± 42,9	199,74 ± 49,59	239,42 ± 26,7	224,43 ± 32,83	NA	200,24 ± 38,01
Poids de 100 grains (g)	18,84 ± 1,59	18,19 ± 0,9	17,99 ± 0,69	17,79 ± 1	NA	18,2 ± 1,12
Nombre de tige par m ²	26,66 ± 3,15	17,47 ± 6,92	29,45 ± 8,06	25,96 ± 4,46	NA	26,99 ± 4,49
Humidité des grains (%)	0,17 ± 0,04	0,14 ± 0,05	0,11 ± 0,01	0,16 ± 0,08	NA	0,14 ± 0,05
Nombre de gousses par tige	26,89 ± 5,16	22,26 ± 3,16	23,08 ± 2,63	27,28 ± 6,4	NA	24,88 ± 4,92
Humidité des sols (22-07-16) (%)	32,79 ± 1,47	25,33 ± 1,88	28,74 ± 2,72	22,08 ± 2,74	NA	27,23 ± 4,58
Humidité des sols (11-08-16) (%)	16,88 ± 2,34	15,7 ± 0,95	16,01 ± 3,71	15,04 ± 1,34	NA	15,91 ± 2,2
PLTT (%)	87,78 ± 1,84	88,05 ± 1,91	95,98 ± 1,48	95,82 ± 0,64	NA	91,91 ± 4,35

Position de la culture

Site

	½ H	H	½(H+C)	C	T	Moyenne générale
St-Télesphore (maïs)						
Carbone total (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Azote total (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
pH	6,18 ± 0,15	6,22 ± 0,21	6,26 ± 0,19	6,31 ± 0,29	6,31 ± 0,15	6,25 ± 0,2
CEC (cmol/kg)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Phosphore extractible (mg/kg)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Saturation du phosphore (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Poids total sec (g/m ²)	741,6 ± 152,25	851,15 ± 100,39	971,31 ± 68,63	980,07 ± 101,99	968,52 ± 77,65	902,53 ± 100,18
Poids de 100 grains (g)	27,95 ± 1,47	28,15 ± 1,27	28,29 ± 1,2	28,83 ± 0,75	29,63 ± 0,36	28,45 ± 1,2
Nombre de tige par m ²	7,44 ± 0,41	7,22 ± 0,84	7,71 ± 0,84	8,37 ± 0,72	7,33 ± 0,22	7,61 ± 0,61
Humidité des grains (%)	0,25 ± 0,02	0,24 ± 0,02	0,24 ± 0,02	0,25 ± 0,02	0,23 ± 0,01	0,24 ± 0,02
Nombre d'épis par tige	0,77 ± 0,13	0,91 ± 0,07	0,91 ± 0,09	0,89 ± 0,08	0,9 ± 0,06	0,87 ± 0,1
Humidité des sols (22-07-16) (%)	8,74 ± 1,44	10,09 ± 1,03	8,55 ± 1,69	9,65 ± 2,37	9,1 ± 2,01	9,24 ± 1,74
Humidité des sols (11-08-16) (%)	5,24 ± 0,62	5,79 ± 0,38	5,37 ± 0,64	5,75 ± 0,68	7,49 ± 0,44	5,75 ± 0,86
PLTT (%)	95,89 ± 2,61	97,68 ± 0,53	98,66 ± 0,3	98,62 ± 0,41	99,02 ± 0	97,86 ± 1,67
St-Ubalde (luzerne)						
Carbone total (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Azote total (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
pH	6,05 ± 0,28	6 ± 0,3	6,02 ± 0,27	6,31 ± 0,57	6,33 ± 0,23	6,12 ± 0,38
CEC (cmol/kg)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Phosphore extractible (mg/kg)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Saturation du phosphore (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Humidité à la récolte (%)	0,78 ± 0,05	0,77 ± 0,05	0,76 ± 0,05	0,78 ± 0,04	0,79 ± 0,04	0,78 ± 0,05
Poids total sec (g/m ²)	107,26 ± 54,75	123,56 ± 67,24	137,63 ± 76,54	128,88 ± 73,31	133,9 ± 49,43	126,25 ± 64,25
Humidité des sols (22-07-16) (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Humidité des sols (11-08-16) (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Site	Position de la culture					Moyenne générale
	½H	H	½(H+C)	C	T	
PLTT (%)	97,26 ± 1,3	98,4 ± 0,12	98,48 ± 0,15	98,56 ± 0,13	98,55 ± 0,21	98,22 ± 0,8
Hudson (fourrages)						
Carbone total (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Azote total (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
pH	5,76 ± 0,25	5,86 ± 0,33	5,92 ± 0,5	5,8 ± 0,37	NA	5,84 ± 0,37
CEC (cmol/kg)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Phosphore extractible (mg/kg)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Saturation du phosphore (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Humidité à la récolte (%)	0,72 ± 0,05	0,71 ± 0,06	0,72 ± 0,06	0,71 ± 0,06	NA	0,71 ± 0,05
Poids total sec (g/m ²)	385,36 ± 69,56	381,8 ± 51,94	391,7 ± 73,23	385,28 ± 54,64	NA	386,04 ± 62,34
Humidité des sols (22-07-16) (%)	35,35 ± 5,07	37,45 ± 5,58	36,68 ± 4,48	31,91 ± 4,58	NA	35,62 ± 5,52
Humidité des sols (11-08-16) (%)	16,7 ± 2,58	18,39 ± 2,44	17,43 ± 3,36	16,33 ± 3,31	NA	17,2 ± 2,94
PLTT (%)	90,71 ± 3,07	96,26 ± 0,62	96,85 ± 0,59	96,84 ± 0,66	NA	95,27 ± 3,07
Pointe-Fortune (fourrages)						
Carbone total (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Azote total (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
pH	6,88 ± 0,33	6,84 ± 0,34	6,73 ± 0,51	7,05 ± 0,41	7,1 ± 0,53	6,9 ± 0,42
CEC (cmol/kg)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Phosphore extractible (mg/kg)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Saturation du phosphore (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Humidité à la récolte (%)	0,7 ± 0,05	0,71 ± 0,05	0,7 ± 0,07	0,71 ± 0,04	0,69 ± 0,05	0,7 ± 0,05
Poids total sec (g/m ²)	220,44 ± 75,86	259,38 ± 87,11	270,8 ± 103,21	254,96 ± 87,56	249,18 ± 44,72	250,95 ± 79,69
Humidité des sols (22-07-16) (%)	19,49 ± 3,66	23,62 ± 3,17	23,21 ± 3,05	21,9 ± 2,84	21,35 ± 2,11	21,98 ± 3,36
Humidité des sols (11-08-16) (%)	6,42 ± 0,89	6,98 ± 0,94	6,55 ± 0,51	6,55 ± 0,82	6,44 ± 0,73	6,6 ± 0,8
PLTT (%)	80,14 ± 7,77	92,24 ± 2,34	94,58 ± 1,48	95,59 ± 1,12	97,47 ± 0,62	91,4 ± 7,33

Tableau S4. Moyennes et écart-types des rendements totaux secs intégrées (g/m^2) des systèmes agroforestiers (A) en comparaison avec le système témoin (T) en place pour les années 2016 et 2017. À noter que le témoin de Ste-Brigide était non répété dans les différents blocs et est présent à titre indicatif uniquement.

Site	2016		2017	
	A	T	A	T
Baie-du-Febvre (soya)	338,32 ± 38,03	333,33 ± 41,31		
St-André (haricot noir)	189,63 ± 40,32	227,01 ± 38,80		
Ste-Brigide (soya)	154,95 ± 84,15	263,18 ± 30,03		
St-Télesphore (maïs)	907,93 ± 54,42	968,52 ± 77,65		
St-Ubalde(luzerne)				
1 ^{ere} récolte annuelle	83,60 ± 28,99	93,49 ± 28,75		
2 ^e récolte annuelle	174,24 ± 64,40	174,31 ± 22,80		
Moyenne	125,90 ± 66,24	133,90 ± 49,43		
Hudson (fourrages)				
1 ^{ere} récolte annuelle	341,65 ± 27,16		592,79 ± 93,34	
2 ^e récolte annuelle	220,99 ± 11,84			
Moyenne	281,32 ± 65,51		592,79 ± 93,34	
Pointe-Fortune (fourrages)				
1 ^{ere} récolte annuelle	312,26 ± 69,63	292,9 ± 22,48	264,78 ± 72,74	247,77 ± 38,62
2 ^e récolte annuelle	175,19 ± 37,13	206,87 ± 21,17		
Moyenne	243,73 ± 89,19	249,88 ± 51,01	264,78 ± 72,74	247,77 ± 38,62

Tableau S5. Corrélations entre les variables de production agricole (variables dépendantes) et les variables environnementales (variables indépendantes).

Variables dépendantes	Variables indépendantes								
	PLTT (%)	pH	Humidité des sols (22-07-16)	Humidité des sols (11-08-16)	C (%)	N (%)	P (mg/kg)	CEC (cmol/k g)	Envahissement par les mauvaises herbes (%)
St-André (haricot)									
Nombre de gousses par tige	0,48*	0,04							-0,61**
Humidité des grains à la récolte (%)	-0,07	0,03							-0,06
Nombre de tiges par m ²	-0,22	-0,02							-0,05
Poids de 100 grains (g)	-0,08	-0,07							0
Poids total sec (g/m ²)	0,51**	0,03							-0,58**
St-Télesphore (maïs)									
Nombre de gousses par tige	0,36	0,08	0,22	0,1					NA
Humidité des grains à la récolte (%)	-0,19	-0,03	-0,18	-0,16					NA
Nombre de tiges par m ²	0,17	0,22	-0,23	-0,07					NA
Poids de 100 grains (g)	0,44	0,34	0,03	0,41					NA
Poids total sec (g/m ²)	0,54**	0,22	0,03	0,24					NA
Baie-du-Febvre (soya)									
Nombre de gousses par tige	0,13	0,02			-0,01	-0,01	0,02	-0,02	-0,15
Humidité des grains à la récolte (%)	0,1	-0,05			-0,13	-0,12	0,05	-0,20	0,03
Nombre de tiges par m ²	-0,09	0,08			0,03	0,06	-0,03	-0,01	0,16

Poids de 100 grains (g)	-0,24	-0,14	0,01	-0,09	0,16	-0,39	-0,07
Poids total sec (g/m ²)	0,11	-0,08	0,23	0,10	0,20	-0,23	-0,19
Ste-Brigide (soya)							
Nombre de gousses par tige	-0,5	0,19	0,09	-0,15	0,23	-0,17	0,15
Humidité des grains à la récolte (%)	-0,27	0,11	0,05	-0,08	0,04	0,18	0,18
Nombre de tiges par m ²	0,3	-0,40	-0,36	0,16	0,13	-0,25	-0,48
Poids de 100 grains (g)	-0,07	0,15	0,05	-0,07	-0,17	0,14	0,2
Poids total sec (g/m ²)	0,28	-0,35	-0,35	0,00	0,19	-0,18	-0,66**
Pointe-Fortune (fourrages)							
Humidité à la récolte (%)	0,15	0,11	-0,06				
Poids total sec(g/m ²)	0,03	-0,31	0,26				
Hudson (fourrages)							
Humidité à la récolte (%)	0,09	0,06	0,09				
Poids total sec(g/m ²)	0,08	-0,01	0,1				
St-Ubalde (luzerne)							
Humidité à la récolte (%)	0,08	0,23					
Poids total sec(g/m ²)	0,15	0,11					

CONCLUSION GÉNÉRALE

En introduction de ce mémoire, nous avons montré l'intérêt des systèmes agroforestiers intercalaires (SAI) pour améliorer la santé des sols, la qualité de l'eau et la biodiversité en milieu agricole. Il a aussi montré que les SAI constituent une solution efficace pouvant permettre l'atténuation des changements climatiques et l'adaptation à ces changements. Dans tous SAI, les arbres font cependant intervenir un large éventail d'interactions complexes dont la compréhension est capitale à la maîtrise de la productivité des plantes agricoles qui est l'enjeu prépondérant à leur adoption par les agriculteurs. Or, le déploiement des SAI demeure extrêmement limité dans le paysage agricole de la zone tempérée du monde, y compris au Québec. Nous avons fait la démonstration de l'importance de quantifier, dans différents contextes, l'effet de SAI de deuxième génération, adaptés aux réalités des grandes cultures, sur les rendements de diverses cultures agricoles. Il s'agit d'un besoin concret exprimé par les conseillers et producteurs agricoles. Ainsi, l'objectif de ce mémoire était de vérifier l'impact de SAI de deuxième génération sur la disponibilité de la lumière, les propriétés chimiques des sols, le taux d'envahissement des cultures annuelles par les mauvaises herbes et différentes variables de la production agricole sur divers sites agroforestiers de différents niveaux de maturité et conçus pour être adaptés aux grandes cultures.

Dans le chapitre I, les résultats obtenus dans différents SAI expérimentaux de deuxième génération ont montré, de façon générale, des rendements satisfaisants, souvent équivalents à ceux mesurés dans des champs témoins dépourvus d'arbres. Ces pronostics de rendements en SAI de deuxième génération semblent donc davantage prometteurs que ceux obtenus dans des SAI de première génération. Par contre, des pertes de rendement du haricot noir, du soya et du maïs ont été observées dans la zone

proche de l'interface entre les rangées d'arbres et la culture agricole en SAI. Ces pertes de rendement étaient associées à une diminution de la lumière disponible ou à une augmentation du taux d'envahissement de la culture par des mauvaises herbes. Aucune relation significative entre les rendements des cultures et l'humidité et les propriétés chimiques du sol n'a été mesurée, ce qui suggère une absence de concurrence entre les arbres et les cultures pour les ressources souterraines. Notre étude supporte notre hypothèse que les cultures fourragères sont moins sensibles que les cultures annuelles face aux changements des conditions biotiques et abiotiques apportées par les SAI. Notre étude suggère aussi que les bénéfices positifs attendus des SAI sur la qualité chimique des sols ne se manifestent pas à court terme.

Les connaissances actuellement disponibles permettent d'envisager le déploiement à grande échelle de SAI bien adaptés à la réalité des producteurs de grandes cultures. Des recherches supplémentaires sont toutefois nécessaires afin d'optimiser le potentiel de production des SAI et leur rentabilité. Par exemple, des efforts de recherche doivent être orientés vers la sélection de variétés de plantes agricoles tolérant bien un ombrage modéré. Il faudrait aussi déterminer les meilleures options techniques pour favoriser une maîtrise uniforme des mauvaises herbes dans les SAI. Enfin, des recherches futures seraient nécessaires pour vérifier dans quelle mesure la production agricole en SAI peut être modulée par le stade évolutif des arbres et la variation des conditions climatiques. Les résultats de cette étude pourront servir d'outil d'aide à la décision aux conseillers et producteurs agricoles ainsi qu'aux gestionnaires et décideurs gouvernementaux afin de mieux encadrer l'adoption, l'expérimentation et le déploiement de ces nouveaux systèmes.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- Alam, M., Olivier, A., Paquette, A., Dupras, J., Revéret, J. P. et Messier, C. (2014). A general framework for the quantification and valuation of ecosystem services of tree-based intercropping systems. *Agroforestry Systems*, 88(4), 679-691. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-014-9681-x>
- Allen, S. C., Jose, S., Nair, P. K. R., Brecke, B. J., Nkedi-Kizza, P. et Ramsey, C. L. (2004). Safety-net role of tree roots: Evidence from a pecan (*Carya illinoensis* K. Koch)-cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States. *Forest Ecology and Management*, 192(2-3), 395-407. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2004.02.009>
- Anderson, S. H., Udawatta, R. P., Seobi, T. et Garrett, H. E. (2009). Soil water content and infiltration in agroforestry buffer strips. *Agroforestry Systems*, 75(1), 5-16. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-008-9128-3>
- Anel, B., Cogliastro, A., Olivier, A. et Rivest, D. (2017). *Une agroforesterie pour le Québec*. Québec.
- Ayres, E., Steltzer, H., Berg, S., Wallenstein, M. D., Simmons, B. L. et Wall, D. H. (2009). Tree species traits influence soil physical, chemical, and biological properties in high elevation forests. *PLoS ONE*, 4(6). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0005964>
- Baah-Acheamfour, M., Carlyle, C. N., Bork, E. W. et Chang, S. X. (2014). Trees increase soil carbon and its stability in three agroforestry systems in central Alberta, Canada. *Forest Ecology and Management*, 328, 131-139. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2014.05.031>
- Bainard, L. D., Koch, A. M., Gordon, A. M., Newmaster, S. G., Thevathasan, N. V. et Klironomos, J. N. (2011). Influence of trees on the spatial structure of arbuscular mycorrhizal communities in a temperate tree-based intercropping system. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 144(1), 13-20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2011.07.014>
- Bambrick, A. D., Whalen, J. K., Bradley, R. L., Cogliastro, A., Gordon, A. M., Olivier, A. et Thevathasan, N. V. (2010). Spatial heterogeneity of soil organic carbon in

- tree-based intercropping systems in Quebec and Ontario, Canada. *Agroforestry Systems*, 79(3), 343-353. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-010-9305-z>
- Barton, K. (2017). Package 'MuMIn'.
- Beaudette, C., Bradley, R. L., Whalen, J. K., McVetty, P. B. E., Vessey, K. et Smith, D. L. (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(1-2), 33-39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2010.06.014>
- Bergeron, M., Lacombe, S., Bradley, R. L., Whalen, J., Cogliastro, A., Jutras, M. F. et Arp, P. (2011). Reduced soil nutrient leaching following the establishment of tree-based intercropping systems in eastern Canada. *Agroforestry Systems*, 83(3), 321-330. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-011-9402-7>
- Böhm, C., Kanzler, M. et Freese, D. (2014). Wind speed reductions as influenced by woody hedgerows grown for biomass in short rotation alley cropping systems in Germany. *Agroforestry Systems*, 88(4), 579-591. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-014-9700-y>
- Bond. (1987). Field margins: a farmer's view on management. *Field Margins*, 79-83.
- Boutin, C. et Jobin, B. (1998). Intensity of Agricultural Practices and Effects on Adjacent Habitats. *Ecological Applications*, 8(2), 544-557.
- Boutin, C., Jobin, B., Bélanger, L. et Choinière, L. (2001). Comparing weed composition in natural and planted hedgerows and in herbaceous field margins adjacent to crop fields. *Canadian Journal of Plant Science*, 81, 313-324. <http://dx.doi.org/10.4141/P00-048>
- Bouttier, L., Paquette, A., Messier, C., Rivest, D., Olivier, A. et Cogliastro, A. (2014). Vertical root separation and light interception in a temperate tree-based intercropping system of Eastern Canada. *Agroforestry Systems*, 88(4), 693-706. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-014-9721-6>
- Brandle, J. R., Hodges, L. et Zhou, X. H. (2004). Windbreaks in North American agricultural systems. *Agroforestry Systems*, 61-62(1-3), 65-78. <http://dx.doi.org/10.1023/B:AGFO.0000028990.31801.62>
- Burgess, P. J., Incoll, L. D., Corry, D. T., Beaton, A. et Hart, B. J. (2004). Poplar (*Populus* spp) growth and crop yields in a silvoarable experiment at three lowland sites in England. *Agroforestry Systems*, 63(2), 157-169.

<http://dx.doi.org/10.1007/s10457-004-7169-9>

- Burner, D. M. (2003). Influence of Alley Crop Environment on Orchardgrass and Tall Fescue Herbage. *Agronomy Journal*, 95(5), 1163-1171. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2003.1163>
- Campi, P., Palumbo, A. D. et Mastrorilli, M. (2009). Effects of tree windbreak on microclimate and wheat productivity in a Mediterranean environment. *European Journal of Agronomy*, 30(3), 220-227. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2008.10.004>
- Carter, M. R. (2004). Researching structural complexity in agricultural soils. *Soil and Tillage Research*, 79(1), 1-6. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2004.04.001>
- Chiffot, V., Rivest, D., Olivier, A., Cogliastro, A. et Khasa, D. (2009). Molecular analysis of arbuscular mycorrhizal community structure and spores distribution in tree-based intercropping and forest systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 131(1-2), 32-39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2008.11.010>
- Clearwater, R. L., Martin, T. et Hoppe, T. (2016). *Environmental sustainability of Canadian agriculture: Agri-environmental indicator report series – Report #4*. Ottawa, ON, Canada.
- DBU. (2010). *Multifunktionale Bewertung von Agroforstsystemen*. Récupéré de <http://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-25786.pdf>.
- De Baests, N., Gariépy, S. et Vézina, A. (2007). Le portrait de l'agroforesterie au Québec. *Gouvernement du Canada*.
- De Beenhouwer, M., Aerts, R. et Honnay, O. (2013). A global meta-analysis of the biodiversity and ecosystem service benefits of coffee and cacao agroforestry. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 175(August), 1-7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2013.05.003>
- Doblas-Miranda, E., Paquette, A. et Work, T. T. (2014). Intercropping trees' effect on soil oribatid diversity in agro-ecosystems. *Agroforestry Systems*, 88(4), 671-678. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-014-9680-y>
- Dougherty, M. C., Thevathasan, N. V., Gordon, A. M., Lee, H. et Kort, J. (2009). Nitrate and Escherichia coli NAR analysis in tile drain effluent from a mixed tree intercrop and monocrop system. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 131(1-2), 77-84. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2008.09.011>

- Dupraz, C. (1998). Adequate design of control treatments in long term agroforestry experiments with multiple objectives. *Agroforestry Systems*, 43(1), 35-48. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1026495002991>
- Dupraz, C. et Liagre, F. (2008). *Agroforesterie, des arbres et des cultures* (1^{re} éd.). [s.l.] : [s.n.].
- Dupraz, C., Simorte, V., Dauzat, M., Bertoni, G., Bernadac, A. et Masson, P. (1999). Growth and nitrogen status of young walnuts as affected by intercropped legumes in Mediterranean climate. *Agroforestry Systems*, 43(1-3), 71-80. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1026499103899>
- Environnement Canada. (2015). *Sources et puits de gaz à effet de serre : sommaire*. Récupéré le 13 décembre 2017 de <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/emissions-gaz-effet-serre/sources-puits-sommaire.html#agriculture>
- Environnement Canada. (2017). *Environnement Canada*. Récupéré le 4 septembre 2017 de http://climate.weather.gc.ca/index_f.html
- FAO. (2015). *Status of the World 's Soil Resources*.
- Fournier, D., Skaug, H., Ancheta, J., Ianelli, J., Magnusson, A., Maunder, M., Nielsen, A. et Sibert, J. (2012). AD Model Builder: using automatic differentiation for statistical inference of highly parameterized complex nonlinear models.
- Frazer, G., Canham, C. et Lertzman, K. (1999). Gap Light Analyzer (GLA), Version 2.0: Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, users manual and program documentation. *Program*. <http://dx.doi.org/citeulike-article-id:4887176>
- Gagnon, P., Sheedy, C., Farenhorst, A., Cessna, A. J., Newlands, N. et McQueen, D. A. R. (2016). Pesticides. Dans *Environmental sustainability of Canadian agriculture: Agri-environmental indicator report series – Report #4* (p. 153-165). Ottawa, ON : Agriculture et Agroalimentaire Canada.
- Gamble, J. D., Johnson, G., Sheaffer, C. C., Current, D. A. et Wyse, D. L. (2014). Establishment and early productivity of perennial biomass alley cropping systems in Minnesota, USA. *Agroforestry Systems*, 88(1), 75-85. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-013-9657-2>
- Gillespie, A. R., Jose, S., Mengel, D. B., Hoover, W. L., Pope, P. E., Seifert, J. R., Biehle, D. J., Stall, T. et Benjamin, T. J. (2000). Defining competition vectors in

- a temperate alley cropping system in the midwestern USA 1. Production physiology. *Agroforestry Systems*, 48(1), 25-40. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1006285205553>
- Graves, A. R., Burgess, P. J., Liagre, F., Pisanelli, A., Paris, P., Moreno, G., Bellido, M., Mayus, M., Postma, M., Schindler, B., Mantzanas, K., Papanastasis, V. P. et Dupraz, C. (2009). Farmer Perceptions of Silvoarable Systems in Seven European Countries. *Agroforestry in Europe*, 67-86. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-8272-6_4
- Hendershot, W. H., Lalonde, H. et Duquette, M. (2008a). Ion exchange and exchangeable cations. Dans M. R. Carter et E. . Gregorich (dir.), *Soil Sampling and Methods of Analysis* (Second, p. 197-206). [s.l.] : CRC Press Publishers.
- Hendershot, W. H., Lalonde, H. et Duquette, M. (2008b). Soil Reaction and Exchangeable Acidity. Dans M. R. Carter et E. . Gregorich (dir.), *Soil Sampling and Methods of Analysis* (Second, p. 173-178). [s.l.] : CRC Press Publishers.
- John, F. et Weisberg, S. (2009). Package 'car'.
- Jose, S., Gillespie, A. R., Seifert, J. R. et Biehle, D. J. (2000). Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the midwestern USA; 2. Competition for water. *Agroforestry Systems*, 48(1), 41-59.
- Jose, S., Gillespie, A. R. et Pallardy, S. G. (2004). Interspecific interactions in temperate agroforestry. *Agroforestry Systems*, 61, 237-255. <http://dx.doi.org/10.1023/B:AGFO.0000029002.85273.9b>
- Kort, J. (1988). Benefits of Windbreaks to Field and Forage Crops. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 23, 165-190.
- Lacombe, S., Bradley, R. L., Hamel, C. et Beaulieu, C. (2009). Do tree-based intercropping systems increase the diversity and stability of soil microbial communities? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 131(1-2), 25-31. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2008.08.010>
- Lenth, R. et Love, J. (2017). Least-Squares Means.
- Lin, B. B. (2007). Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 144(1-2), 85-94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.12.009>

- Lin, C., McGraw, R., George, M. et Garrett, H. (1999). Shade effects on forage crops with potential in temperate agroforestry practices. *Agroforestry Systems*, 44(2-3), 109-119. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1006205116354>
- Link, C. M., Thevathasan, N. V., Gordon, A. M. et Isaac, M. E. (2015). Determining tree water acquisition zones with stable isotopes in a temperate tree-based intercropping system. *Agroforestry Systems*, 89(4), 611-620. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-015-9795-9>
- Lobb, D. A., Li, S. et McConkey, B. G. (2016). Soil Erosion. Dans *Environmental sustainability of Canadian agriculture: Agri-environmental indicator report series – Report #4* (p. 77-89). Ottawa, ON : Agriculture et Agroalimentaire Canada.
- Lovell, S. T., Dupraz, C., Gold, M., Jose, S., Revord, R., Stanek, E. et Wolz, K. J. (2017). Temperate agroforestry research: considering multifunctional woody polycultures and the design of long-term field trials. *Agroforestry Systems*, 1-19. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-017-0087-4>
- Lovell, S. T. et Sullivan, W. C. (2006). Environmental benefits of conservation buffers in the United States: Evidence, promise, and open questions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 112(4), 249-260. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.002>
- Mahn, E.-G. (1988). Changes in the structure of weed communities affected by agrochemicals—what role does nitrogen play? *Ecological Bulletins*, 39, 71-73. Récupéré de <http://www.jstor.org/stable/20112994>
- Marrs, R. H. (1993). Soil Fertility and Nature Conservation in Europe: Theoretical Considerations and Practical Management Solutions. *Advances in Ecological Research*, 24, 241-300. [http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60044-6](http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60044-6)
- Marshall, E. J. P. (1987). Herbicide effects on the flora of arable field boundaries. *Weeds*, 291-298.
- Marshall, E. J. P. (2004). Agricultural Landscapes : Field Margin Habitats and Their Interaction with Crop Production. *Journal Of Crop Improvement*, 12(January 2015), 365-404. <http://dx.doi.org/10.1300/J411v12n01>
- Marshall, E. J. P. et Moonen, A. C. (2002). Field margins in northern Europe: Integrating agricultural, environmental and biodiversity functions. *Agriculture*,

- Ecosystems & Environment*, 89, 5-21. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00315-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00315-2)
- Masse, S., Marchand, P. P., Bernier-cardou, M. et Delisle, C. (2015). Research, development, and deployment needs for short-rotation plantation and agroforestry systems: an experts' assessment of landowners' perceptions. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(October 2014), 101-110. <http://dx.doi.org/10.1139/cjfr-2014-0289>
- Miller, A. W. et Pallardy, S. G. (2001). Resource competition across the crop-tree interface in a maize-silver maple temperate alley cropping stand in Missouri. *Agroforestry Systems*, 53(3), 247-259. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1013327510748>
- Montagnini, F. et Nair, P. (2004). Carbon sequestration: An under exploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry systems*, 61, 281-295.
- Mungai, N. W. et Motavalli, P. P. (2006). Litter quality effects on soil carbon and nitrogen dynamics in temperate alley cropping systems. *Applied Soil Ecology*, 31(1-2), 32-42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.04.009>
- Mungai, N. W., Motavalli, P. P. et Kremer, R. J. (2006). Soil organic carbon and nitrogen fractions in temperate alley cropping systems. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 37(7-8), 977-992. <http://dx.doi.org/10.1080/00103620600584230>
- Mungai, N. W., Motavalli, P. P., Kremer, R. J. et Nelson, K. A. (2005). Spatial variation of soil enzyme activities and microbial functional diversity in temperate alley cropping systems. *Biology and Fertility of Soils*, 42(2), 129-136. <http://dx.doi.org/10.1007/s00374-005-0005-1>
- Nasielski, J., Furze, J. R., Tan, J., Bargaz, A., Thevathasan, N. V. et Isaac, M. E. (2015). Agroforestry promotes soybean yield stability and N₂-fixation under water stress. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(4), 1541-1549. <http://dx.doi.org/10.1007/s13593-015-0330-1>
- Nuberg, I. K. (1998). Effect of shelter on temperate crops: A review to define research for Australian conditions. *Agroforestry Systems*, 41(1), 3-34. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1006071821948>
- Nuberg, I. K. et Bennell, M. (2009). Trees protecting dryland crops and soil. Dans I. Nuberg, B. George, et R. Reid (dir.), *Agroforestry for Natural Resource*

- Management* (p. 69-95). Collingwood, Australia : CSIRO Publishing.
- Nuberg, I. K., George, B. et Reid, R. (2009). *Agroforestry for Natural Resource Management*. Collingwood, Australia : CSIRO Publishing.
- Oelbermann, M., Paul Voroney, R. et Gordon, A. M. (2004). Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: A review with examples from Costa Rica and southern Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 104(3), 359-377. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2004.04.001>
- Palma, J. H. N., Graves, A. R., Bunce, R. G. ., Burgess, P. J., de Filippi, R., Keesman, K. J., van Keulen, H., Liagre, F., Mayus, M., Moreno, G., Reisner, Y. et Herzog, F. (2007). Modelling environmental benefits of silvoarable agroforestry in Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 119(3-4), 320-334. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.07.021>
- Pardon, P., Reubens, B., Reheul, D., Mertens, J., De Frenne, P., Coussement, T., Janssens, P. et Verheyen, K. (2017). Trees increase soil organic carbon and nutrient availability in temperate agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 247(June), 98-111. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.018>
- Peng, R. K., Incoll, L. D., Sutton, S. L., Wright, C. et Chadwick, A. (1993). Diversity of Airborne Arthropods in a Silvoarable Agroforestry System. *Journal of Applied Ecology*, 30(3), 551-562. <http://dx.doi.org/10.2307/2404194>
- Peng, X., Thevathasan, N. V., Gordon, A. M., Mohammed, I. et Gao, P. (2015). Photosynthetic response of soybean to microclimate in 26-year-old tree-based intercropping systems in southern Ontario, Canada. *PLoS ONE*, 10(6), 1-10. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0129467>
- Pingali, P. L. (2012). Green Revolution: Impacts, limits, and the path ahead. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(31), 12302-12308. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0912953109>
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D., Authors, E., Heisterkamp, S., Van Willigen, B. et R-core. (2017). Linear and Nonlinear Mixed Effects Models.
- Price, G. W. et Gordon, A. M. (1999). Spatial and temporal distribution of earthworms in a temperate intercropping system in southern Ontario, Canada. *Agroforestry systems*, 44, 141-149. <http://dx.doi.org/10.1023%2FA%3A1006213603150>
- Reynolds, P. E., Simpson, J. A., Thevathasan, N. V. et 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(4), 362-371. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.09.024>
- 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(1), 33-40. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-010-9342-7>
- Rivest, D., Cogliastro, A., Vanasse, A. et Olivier, A. (2009). Production of soybean associated with different hybrid poplar clones in a tree-based intercropping system in southwestern Québec, Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 131(1-2), 51-60. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2008.08.011>
- Rivest, D., Lorente, M., Olivier, A. et Messier, C. (2013). Soil biochemical properties and microbial resilience in agroforestry systems: Effects on wheat growth under controlled drought and flooding conditions. *Science of the Total Environment*, 463-464, 51-60. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.071>
- Rivest, D. et Vézina, A. (2015). Maize yield patterns on the leeward side of tree windbreaks are site-specific and depend on rainfall conditions in eastern Canada. *Agroforestry Systems*, 89(2), 237-246. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-014-9758-6>
- Schoeneberger, M., Bentrup, G., de Gooijer, H., Soolanayakanahally, R., Sauer, T., Brandle, J., Zhou, X. et Current, D. (2012). Branching out: Agroforestry as a climate change mitigation and adaptation tool for agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*, 67(5), 128A-136A. <http://dx.doi.org/10.2489/jswc.67.5.128A>
- Schroth, G. (1999). A review of belowground interactions in agroforestry, focussing on mechanisms and management options. *Agroforestry Systems*, 43, 5-34. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1026443018920>
- Seobi, T., Anderson, S. H., Udawatta, R. P. et Gantzer, C. J. (2005). Influence of Grass and Agroforestry Buffer Strips on Soil Hydraulic Properties for an Albaqualf. *Soil Science Society of America Journal*, 69(3), 893. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2004.0280>
- Smith, J., Pearce, B. D. et Wolfe, M. S. (2013). Reconciling productivity with protection of the environment: Is temperate agroforestry the answer? *Renewable Agriculture and Food Systems*, 28(1), 80-92.

<http://dx.doi.org/10.1017/S1742170511000585>

- Stamps, W. T., Dailey, T. V., Gruenhagen, N. M. et Linit, M. J. (2008). Soybean yield and resource conservation field borders. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 124(1-2), 142-146. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2007.08.004>
- Sullivan, W. C. (1994). Perceptions of the rural-urban fringe: citizen preferences for natural and developed settings. *Landscape and Urban Planning*, 29(2-3), 85-101. [http://dx.doi.org/10.1016/0169-2046\(94\)90020-5](http://dx.doi.org/10.1016/0169-2046(94)90020-5)
- Tartera, C., Rivest, D., Olivier, A. et Liagre, F. (2012). Agroforesterie en développement : parcours comparés du Québec et de la France. *The Forestry Chronicle*, 88(1), 21-29. <http://dx.doi.org/10.5558/tfc2012-007>
- Thevathasan, N. V. et Gordon, A. M. (1997). Poplar leaf biomass distribution and nitrogen dynamics in a poplar-barley intercropped system in southern Ontario, Canada. *Agroforestry Systems*, 37(1), 79-90. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1005853811781>
- Thevathasan, N. V, Gordon, A. M., Bradley, R., Cogliastro, A., Folkard, P., Grant, R., Kort, J., Liggins, L., Njenga, F., Olivier, A., Pharo, C., Powell, G., Rivest, D., Schiks, T., Trotter, D., Rees, K. Van, Whalen, J. et Zabek, L. (2012). *Agroforestry - The Future of Global Land Use*, 9. [s.l.] : Springer Netherlands. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-4676-3>
- Thevathasan, N. V et Gordon, A. M. (2004). Ecology of tree intercropping systems in the North temperate region: Experiences from southern Ontario, Canada: New visitas in Agroforestry. *Agroforestry Systems*, 61(1), 257-268. <http://dx.doi.org/10.1023/B:AGFO.0000029003.00933.6d>
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J. et Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(50), 20260-20264. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1116437108>
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R. et Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671-677. <http://dx.doi.org/10.1038/nature01014>
- Torralba, M., Fagerholm, N., Burgess, P. J., Moreno, G. et Plieninger, T. (2016). Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 230(August), 150-161. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.002>

- Tsonkova, P., Böhm, C., Quinkenstein, A. et Freese, D. (2012). Ecological benefits provided by alley cropping systems for production of woody biomass in the temperate region: A review. *Agroforestry Systems*, 85(1), 133-152. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-012-9494-8>
- Udawatta, R. P., Gantzer, C. J., Anderson, S. H. et Garrett, H. E. (2008). Agroforestry and Grass Buffer Effects on Pore Characteristics Measured by High-Resolution X-ray Computed Tomography. *Soil Science Society of America Journal*, 72(2), 295. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2007.0057>
- Udawatta, R. P. et Jose, S. (2011). Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Practices in Temperate North America. Dans B. M. Kumar et P. K. R. Nair (dir.), *Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems: Opportunities and Challenges, Advances* (p. 43-59). Gainesville, Florida, U.S.A. : Springer. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-1630-8_3
- Udawatta, R. P., Kremer, R. J., Adamson, B. W. et Anderson, S. H. (2008). Variations in soil aggregate stability and enzyme activities in a temperate agroforestry practice. *Applied Soil Ecology*, 39(2), 153-160. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.12.002>
- Udawatta, R. P., Motavalli, P. P., Jose, S. et Nelson, K. A. (2014). Temporal and spatial differences in crop yields of a mature silver maple alley cropping system. *Agronomy Journal*, 106(2), 407-415. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2013.0429>
- Valdivia, C., Barbieri, C. et Gold, M. A. (2012). Between Forestry and Farming: Policy and Environmental Implications of the Barriers to Agroforestry Adoption. *Canadian Journal of Agricultural Economics*, 60(2), 155-175. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1744-7976.2012.01248.x>
- Wanvestraut, R. H., Jose, S., Nair, P. K. R. et Brecke, B. J. (2004). Competition for water in a pecan (*Carya illinoensis* K. Koch) – cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States. *Agroforestry Systems*, 60, 167-179.
- Wilkinson, B. H. et McElroy, B. J. (2007). The impact of humans on continental erosion and sedimentation. *Bulletin of the Geological Society of America*, 119(1-2), 140-156. <http://dx.doi.org/10.1130/B25899.1>
- Winans, K., Whalen, J., Rivest, D., Cogliastro, A. et Bradley, R. (2016). Carbon Sequestration and Carbon Markets for Tree-Based Intercropping Systems in Southern Quebec, Canada. *Atmosphere*, 7(2), 17. <http://dx.doi.org/10.3390/atmos7020017>

- Worth, D. E., Desjardins, R. L., MacDonald, D., Cerkowniak, D., McConkey, B. G., Dyer, J. A. et Vergé, X. P. . (2016). Agricultural Greenhouse Gases. Dans *Environmental sustainability of Canadian agriculture: Agri-environmental indicator report series – Report #4* (p. 169-179). Ottawa, ON : Agriculture et Agroalimentaire Canada.
- Wotherspoon, A., Thevathasan, N. V., Gordon, A. M. et Voroney, R. P. (2014). Carbon sequestration potential of five tree species in a 25-year-old temperate tree-based intercropping system in southern Ontario, Canada. *Agroforestry Systems*, 88(4), 631-643. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-014-9719-0>
- Zidia, N. et Sen Tran, T. (2008). Mehlich III – Extractable Elements. Dans M. R. Carter et E. . Gregorich (dir.), *Soil Sampling and Methods of Analysis* (Second, p. 81-88). [s.l.] : CRC Press Publishers.