



Effets de systèmes agroforestiers intercalaires de deuxième génération sur l'humidité du sol et les rendements des cultures annuelles

Mémoire

Félix-Antoine Rhéaume-Gonzalez

Maîtrise en agroforesterie

Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

Félix-Antoine Rhéaume-Gonzalez, 2018

Effets de systèmes agroforestiers intercalaires de deuxième génération sur l'humidité du sol et les rendements des cultures annuelles

Mémoire

Félix-Antoine Rhéaume-Gonzalez

Sous la direction de :

Alain Olivier, directeur de recherche

David Rivest, codirecteur de recherche

Résumé

Les systèmes agroforestiers intercalaires (SAI) fournissent une multitude de bénéfices environnementaux, sociaux et économiques pour la société et l'entreprise agricole. Or, leur niveau d'adoption en Amérique du Nord, y compris au Québec, est très faible. Depuis environ cinq ans, une deuxième génération de SAI, qui comporte de plus larges espacements entre les rangées d'arbres, a été mise en place. Cependant, on connaît mal leurs effets sur le rendement des cultures agricoles. Le but de ce projet est d'acquérir une meilleure connaissance des effets de différents SAI de deuxième génération sur la variabilité spatiale de l'humidité et de la température du sol ainsi que des rendements des cultures et de la densité de mauvaises herbes. Au cours de la saison de croissance 2017, le rendement des cultures dans cinq SAI, soient quatre jeunes (quatre et six ans) et un mature (21 ans) associant soya, maïs et blé à des arbres (feuillus à croissance rapide et nobles à croissance modérée), a été étudié (Saint-Télesphore, Sainte-Brigide d'Iberville, Baie-du-Febvre, Saint-André de Kamouraska (deux sites)). La température et l'humidité du sol ont été mesurées de façon ponctuelle à différentes distances de la rangée d'arbres à au moins deux moments pendant l'été et ce, pour l'ensemble des sites. L'humidité du sol a été étudiée en continu à Baie-du-Febvre à l'aide de sondes électroniques Hobo 10HS. La densité de mauvaises herbes a également été mesurée. Les résultats montrent que les arbres ont causé des variations spatiales du rendement, mais n'ont eu aucun effet sur le rendement intégré des cultures dans les allées. L'humidité du sol, la température du sol et la densité de mauvaises herbes n'étaient pas corrélées significativement avec le rendement des cultures. Les résultats de cette recherche apportent des arguments en faveur de l'adoption des SAI de deuxième génération en démontrant que les rendements agricoles y sont comparables à ceux des systèmes conventionnels.

Table des matières

Résumé	iii
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	vii
Liste des abréviations	viii
Remerciements	ix
Avant-propos	x
Introduction	1
Chapitre 1 : Revue bibliographique.....	4
1.1. Effets souterrains	4
1.1.1. Carbone organique du sol	4
1.1.2. Fertilisation.....	5
1.1.3. Mycorhizes arbusculaires	6
1.1.4. Activité microbienne et vers de terre	6
1.1.5. Température du sol	7
1.1.6. Compétition souterraine.....	7
1.1.7. Compétition pour l'eau	8
1.1.8. Mauvaises herbes.....	10
1.2. Effets aériens.....	11
1.2.1. Vent.....	11
1.2.2. Compétition pour la lumière	12
1.2.3. Espacement entre les arbres et les rangées.....	13
1.3. Rentabilité des SAI	14
1.3.1. Qualité du bois	15
1.4. Services écosystémiques	16
1.4.1. Qualité de l'eau	16
1.4.2. Biodiversité du milieu agricole	17
1.4.3. Séquestration de carbone	17
1.4.4. Analyse économique	18
1.5. Objectifs et hypothèses.....	20
Chapter 2: Scientific article.....	21
2.1. Résumé	22
2.2 Abstract.....	23

2.3. Introduction	24
2.4. Materials and methods.....	26
2.4.1. Experimental sites	26
2.4.2. Data collection.....	27
2.4.3. Crop yield and yield components	27
2.4.4. Soil moisture and temperature	28
2.4.5. Weed density.....	28
2.4.6. Statistical Analysis.....	29
2.5. Results.....	29
2.5.1. Crop yields and components	29
2.5.2. Soil moisture content.....	30
2.5.3. Soil temperature.....	30
2.5.4. Weed density.....	30
2.5.5. Relationships between variables.....	31
2.6. Discussion.....	31
2.7. Conclusion	34
2.8. Tables and figures	36
Conclusion générale.....	44
Bibliographie.....	46

Liste des figures

FIGURE 1 : EXPERIMENTAL DESIGN OF THE SAMPLING PLOTS.....	39
FIGURE 2 : SOIL MOISTURE VARIATIONS ACROSS ONE BLOCK IN BAIE-DU-FEBVRE (BDF)	40
FIGURE 3: CORN 100-GRAIN WEIGHT AND GRAIN YIELD PER M ² IN BAIE-DU-FEBVRE (BDF).....	41
FIGURE 4 : SOYBEAN 100-GRAIN WEIGHT AND NUMBER OF PODS PER STEM IN STE- BRIGIDE D'IBERVILLE (STB).....	42
FIGURE 5: WEED DENSITY FOR EACH SITE IN FUNCTION OF THE DISTANCE FROM THE TREE ROW	43

Liste des tableaux

TABLE 1: TREE ARRANGEMENTS, CROPS, CROP MANAGEMENT AND SITE-SPECIFIC INFORMATION.	36
TABLE 2: RAINFALL FOR EACH SITE	38

Liste des abréviations

BDF : Baie-du-Febvre

SE : Services écosystémiques

C : Centre de l'allée cultivée

H : Hauteur moyenne des arbres

MA : Mycorhizes arbusculaires

MAPAQ: ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec

COS : Carbone organique du sol

SAI : Système agroforestier intercalaire

SAKV : Saint-André de Kamouraska Village

SAKF : Saint-André de Kamouraska Ferme

SPEDE : Système de plafonnement et d'échange de droits d'émission de gaz à effet de serre

STB: Sainte-Brigide d'Iberville

STT: Saint-Télesphore

VAN : Valeur actuelle nette

Remerciements

Merci à mes directeurs et co-directeurs Alain Olivier, David Rivest et Alain Cogliastro d'avoir partagé vos connaissances avec moi et de m'avoir inculqué votre rigueur scientifique. Malgré la distance qui nous séparait souvent, votre appui était toujours palpable. Votre dévouement pour le développement d'une agroforesterie pour le Québec s'étend bien au-delà des murs universitaires.

Merci aux producteurs agricoles qui ont accepté d'embarquer dans l'aventure et de prêter leurs terres à la science afin d'optimiser les prochaines générations de systèmes agroforestiers intercalaires. 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 ministre de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, et Agriculture et Agroalimentaire Canada.

Merci à mes parents de m'avoir hébergé chez eux (trop) longtemps afin que je poursuive mes études universitaires. Qui eut cru que le sous-sol se transformerait un jour en entrepôt à grains et en station météorologique!

Merci à Anne de m'avoir botté les fesses aux bons moments pour que je mette les bouchées doubles!

Avant-propos

Ce mémoire est divisé en deux sections. La première, en français, passe en revue les connaissances scientifiques liées aux interactions entre arbres et cultures dans les systèmes agroforestiers intercalaires, particulièrement ceux implantés au Québec et en Ontario. La seconde partie, rédigée en anglais sous forme d'article scientifique, décrit en détail le projet de recherche et ses résultats. Félix-Antoine Rhéaume-Gonzalez a été le principal auteur de cet article, sous la supervision de Alain Olivier, David Rivest et Alain Cogliastro. Maxime Carrier, étudiant à la maîtrise à l'Université du Québec en Outaouais, était impliqué dans l'analyse statistique des données. Au moment du dépôt initial du mémoire, l'article n'avait pas été soumis à aucune revue scientifique.

Introduction

L'agriculture intensive mise de l'avant par la "Révolution Verte" nous a permis, en 40 ans, de doubler notre production annuelle de grains (Tilman et al., 2002). L'irrigation et l'ajout de fertilisants et de pesticides, combinés à de nouveaux cultivars et une machinerie spécialisée, ont permis d'augmenter les rendements agricoles pour répondre à la croissance démographique mondiale, mais ont toutefois un effet négatif sur la qualité de l'eau et du sol, la biodiversité et le paysage agricole.

La qualité des sols agricoles a beaucoup changé depuis les dernières décennies. Le labour, typique des cultures annuelles, accélère la décomposition de la matière organique. Un sol sans couverture végétale s'assèche plus rapidement et est plus susceptible d'être érodé par la pluie et le vent (Guyot, 1989). L'arbre, qui a longtemps joué un rôle de brise-vent en agriculture, a progressivement été éliminé car il nuisait aux manœuvres de la machinerie. L'utilisation répétée de cette lourde machinerie agricole crée un sol compact dont la structure ne favorise pas l'infiltration d'air ni d'eau (Naylor, 1996). Ce sol pauvre et compact est à son tour plus susceptible d'être érodé, car il n'est pas favorable à l'établissement de végétation. Cette érosion du sol agricole diminue sa fertilité, accélère son acidification et augmente les coûts de production du producteur désirant maintenir de hauts rendements (Naylor, 1996 ; Nair et al., 2010).

Les rendements obtenus dans ces systèmes agricoles intensifs dépendent fortement de l'ajout de fertilisants, particulièrement ceux à base d'azote et de phosphore. Or, seule une fraction de ces intrants est absorbée par la plante : 30 à 50 % de l'azote et environ 45 % du phosphore (Smil, 1999). La lixiviation et les pertes par ruissellement des intrants agricoles affectent négativement la qualité de l'eau de surface et de la nappe phréatique (Sims et al., 1998 ; Laird et al., 2010). Ces contaminants peuvent perdurer dans l'eau et le sol, ce qui engendre des coûts de traitement en plus de réduire le potentiel récréotouristique et de pêche (Carpenter et al., 1998 ; Tilman et al., 2002).

En plus de contaminer directement le sol et l'eau, nos systèmes agricoles possèdent une biodiversité très réduite. Depuis les années 70, les systèmes agricoles ont tendance à être simplifiés et étendus à grande échelle. Au Québec, le maïs et le soya occupent 72 % des terres agricoles dédiées aux grandes cultures (MAPAQ, 2015). Ces cultures à courtes rotations (monocultures) abritent une très pauvre biodiversité et requièrent un épandage de pesticides pour éradiquer maladies et ravageurs. Or, une grande diversité végétale peut abriter une plus grande diversité d'espèces associées, ce qui peut augmenter la productivité, la stabilité et la résilience du site (Power, 1999).

L'attractivité du paysage agricole et l'offre récréotouristique autour des villes sont des enjeux importants. Au-delà des préoccupations d'ordre environnemental, l'agriculture est un enjeu social. Les prédictions démographiques nous disent que les villes accueilleront une proportion grandissante de la population mondiale. Ces mouvements de population autour des centres urbains mettent beaucoup de pression sur les milieux ruraux qui cherchent à maintenir leurs paysages agricoles attrayants. Depuis 1951, 80 % des terres agricoles québécoises dédiées au pâturage ont été converties vers une agriculture intensive (Ruiz et Domon, 2005) pour laquelle l'arbre est généralement une contrainte.

L'agroforesterie est une pratique intégrant l'arbre à une autre forme de production végétale ou animale qui peut répondre aux enjeux énumérés ci-haut. Leakey (1996) définissait l'agroforesterie comme un système dynamique de gestion des ressources naturelles fondé sur l'écologie à travers lequel on intègre l'arbre dans les fermes, les exploitations d'élevage et d'autres paysages. Ce type de système diversifie et accroît la production tout en procurant des bénéfices sociaux, économiques et environnementaux aux utilisateurs des terres. Dans l'est du Canada, les cinq principaux systèmes sont : les haies brise-vent, les bandes riveraines arborées, les systèmes sylvopastoraux, les systèmes de culture de plantes herbacées en milieu forestier et les systèmes agroforestiers intercalaires (SAI). Au Québec, les bandes riveraines arborées et les haies brise-

vent sont les systèmes agroforestiers les plus répandus, couvrant environ 10 000 kilomètres linéaires (Thevathasan et al., 2012).

Ce projet de maîtrise porte sur les SAI, qui intercalent des rangées d'arbres à même la culture. Comparativement aux arbres en haies brise-vent, qui sont souvent en périphérie des cultures, les arbres en SAI partagent la parcelle avec la culture. Considérant les effets positifs que ces systèmes peuvent avoir en réponse aux enjeux cités précédemment, il est curieux de constater que leur taux d'adoption demeure très faible au Québec (Anel et al., 2017). Une des raisons pouvant expliquer ce phénomène vient du fait que très peu d'études dans l'est du Canada se sont penchées sur l'effet de ces systèmes sur le rendement des cultures. Une meilleure connaissance des interactions entre l'arbre et les cultures permettrait de mieux informer les producteurs désirant implanter ces systèmes, particulièrement au Québec. Le premier chapitre de ce mémoire offre une revue bibliographique des différents concepts utiles à la compréhension des SAI, notamment en ce qui a trait aux interactions aériennes et souterraines entre arbres et cultures. Le second chapitre est un article scientifique rédigé en anglais qui décrit en détails le dispositif expérimental, l'analyse statistique, les résultats obtenus et les principaux éléments de discussion qui se dégagent de ces résultats. Une brève conclusion est ensuite présentée pour clore les deux sections. Les références bibliographiques utilisées pour les différents chapitres sont compilées à la fin du mémoire.

Chapitre 1 : Revue bibliographique

Dans les sections qui suivent, nous aborderons différents éléments permettant d'expliquer l'effet des arbres en SAI sur le rendement des cultures et sur les services écosystémiques qu'ils peuvent rendre à la société. Nous verrons ce que la science connaît concernant leurs effets bénéfiques, mais aussi la compétition potentielle entre arbres et cultures pour les ressources au champ. Ainsi, une première section couvrira les effets souterrains (eau et nutriments) et aériens (lumière et vent) de l'ajout d'arbres aux systèmes de production agricoles. Ensuite, une section sera dédiée aux connaissances sur le rendement des arbres et des cultures en SAI à l'échelle de la parcelle agricole. Enfin, dans le but de mieux comprendre le rôle que peuvent jouer les SAI au-delà de la parcelle agricole, nous verrons comment les services écosystémiques fournis par ces systèmes agroforestiers peuvent contribuer à la société québécoise.

1.1. Effets souterrains

1.1.1. Carbone organique du sol

Les arbres, comparativement aux cultures annuelles, ont un système de support aérien et souterrain ligneux qui leur permet de perdurer plusieurs années et de puiser une partie de leurs ressources dans des strates peu explorées par les plantes annuelles. On parle alors d'un usage mutuel des ressources. Les arbres et les cultures en SAI produisent des résidus organiques aériens et souterrains qui sont continuellement recyclés et font augmenter le taux de carbone organique du sol (COS). Les sources de COS peuvent provenir de la décomposition de la litière aérienne (feuilles et branches) de même que de celle des racines fines. Bambrick et al. (2010) ont étudié trois SAI âgés de 4, 8 et 21 ans au Québec et en Ontario afin de déterminer la quantité et la répartition spatiale du COS. Leurs résultats montrent une augmentation marquée à proximité des arbres dans le site de 8 ans et celui de 21 ans. En plus d'augmenter, le COS autour des peupliers du site de 21 ans était distribué de

façon homogène entre les rangées. Le sol du plus jeune site (4 ans) ne présentait toutefois pas d'augmentation significative entre les rangées d'arbres. Il faut donc attendre quelques années avant de pouvoir observer les effets des SAI sur la répartition du COS dans le sol au-delà de la couronne des arbres.

En France, pour six SAI étudiés, Cardinael et al. (2017) ont observé pour tous les sites des taux de COS supérieurs dans les 10 premiers cm de sol par rapport aux témoins agricoles. Dans deux SAI, le COS était supérieur à 30 cm et dans un seul cas, il l'était à 60 cm de profondeur. Alors que les arbres ne couvraient qu'entre 7 et 18 % de la surface du sol, ils généraient entre 20 et 50 % du COS, tous horizons confondus. Bien que statistiquement significatif, l'apport en COS des deux plus jeunes sites (6 ans) n'était pas très important comparativement aux sites plus matures (18, 26 et 41 ans), en accord avec l'étude de Bambrick et al., (2010). Plusieurs études s'accordent sur le fait que les SAI peuvent augmenter le COS (Montagnini et Nair, 2004; Jose, 2009). Toutefois les méthodes de calcul utilisées pour arriver à ces conclusions ne sont pas toutes pareilles (Nair, 2012) et il faut donc être vigilant lors de comparaisons quantitatives.

1.1.2. Fertilisation

La vaste majorité des systèmes agricoles de nos jours, qu'ils intègrent des SAI ou non, utilisent des fertilisants dans le but de fournir les éléments nutritifs essentiels aux cultures. De ces éléments, l'azote est souvent le plus critique et son absorption dépend d'une humidité adéquate du sol. Il semblerait que l'utilisation de l'azote par la plante et par l'arbre soit décalée dans le temps (Jose et al., 2000b) et survienne partiellement dans des horizons du sol différents (Thevathasan et Gordon, 2004), ce qui réduit grandement les risques de compétition entre arbres et cultures pour cet élément nutritif essentiel. Dans deux contextes différents, le rendement du maïs en SAI n'était pas limité par la disponibilité de l'azote dans le sol (Miller et Pallardy, 2001; Jose et al., 2000b). Bien que l'utilisation de fertilisants azotés soit largement répandue et probablement vouée à être présente dans l'agroécosystème québécois pour

quelque temps, les SAI ont le potentiel de réduire l'usage d'intrants tout en maintenant des rendements compétitifs. Rappelons que, à rendements égaux, une réduction dans l'usage des fertilisants ou de tout autre intrant acheté se traduit par un gain économique, car les coûts pour l'entreprise agricole sont réduits.

Grâce à cette captation de nutriments ainsi qu'aux conditions lumineuses auxquelles ils ont accès, les arbres en milieu agroforestier peuvent croître plus rapidement qu'ils ne l'auraient fait dans un milieu forestier (Rivest et al., 2009). Et c'est cette accélération de production de matière organique aérienne et souterraine qui nourrit le système à nouveau, faisant des SAI de puissants outils pour dynamiser la fertilité du sol.

1.1.3. Mycorhizes arbusculaires

Les champignons mycorhiziens arbusculaires (MA) entrent en symbiose avec les racines des arbres, ce qui permet un échange et une utilisation plus efficaces de l'eau (Furze et al., 2017) et des nutriments dans le sol. Cette symbiose peut réduire la nécessité de recourir à des intrants agricoles tout en maintenant un rendement équivalent (Hijri et al., 2006). À St-Rémi, au Québec, Chiffot et al. (2009) ont comparé l'activité et la répartition spatiale des MA dans un SAI et une plantation forestière. En SAI, leurs résultats montrent une plus grande hétérogénéité des MA, ainsi que de leur répartition spatiale. Ainsi, les SAI favoriseraient une plus grande richesse de MA qu'une plantation forestière et offriraient par conséquent une plus grande résilience face aux stress hydriques.

1.1.4. Activité microbienne et vers de terre

La matière organique constamment incorporée dans le sol sert de nourriture pour la vie du sol. Comparativement aux systèmes agricoles conventionnels sans arbres, les sols des SAI voient une augmentation de la biomasse microbienne (Lee et Jose, 2003 ; Rivest et al., 2013; Doblaz-Miranda et al., 2014), qui contribue à une meilleure disponibilité des éléments nutritifs dans le sol (Rivest et al., 2009) et potentiellement à de meilleurs rendements. Cette fertilisation

organique améliore la disponibilité de l'azote pour les plantes, ce qui peut réduire les coûts en fertilisants pour le producteur (Gao et al., 2014). Ainsi, dans un système relativement mature (21 ans), une augmentation du taux de MO de 1 % apporterait une fertilisation en azote de 5 kg/ha en plus (Thevathasan et Gordon, 2004). De plus, cette décomposition annuelle des litières d'arbres et de cultures fait augmenter l'abondance de vers de terre, particulièrement à proximité des arbres (Price et Gordon, 1998; Thevathasan et Gordon, 2004). À leur tour, les vers de terre forment des agrégats qui améliorent la macroporosité (Marinissen et De Ruiter, 1993) et favorisent l'infiltration et la rétention de l'eau dans le sol (Udawatta et al., 2008).

1.1.5. Température du sol

La température du sol (comme celle de l'air) peut affecter la germination, la croissance et le remplissage des grains, ce qui peut affecter le rendement des cultures, particulièrement en climat chaud (Monteith et al., 1991). Ces effets seraient proportionnels à l'âge des SAI; en climat tempéré de l'Ontario, l'effet des arbres sur les cultures dans de jeunes SAI (3 ans) n'affectait la température du sol que de 1°C dans le soya, le blé et le maïs (Williams et Gordon, 1995). L'impact des arbres était toutefois plus élevé dans un SAI mature en Floride, où la germination et la survie des plants de coton était meilleure comparativement à un milieu dépourvu d'arbres (Jose et al., 2008). De façon générale, les arbres en milieux agroforestiers pourraient réduire les extrêmes de température auxquels seraient exposées les cultures et qui affectent parfois très sévèrement les rendements agricoles. Sans pour autant parler d'une assurance quant au rendement, il s'agit tout de même d'une mesure d'atténuation intéressante face aux changements climatiques éventuels.

1.1.6. Compétition souterraine

Une préoccupation souvent soulevée concernant les SAI réside dans les interactions racinaires entre arbres et cultures qui entraîneraient une compétition pour les ressources (eau et nutriments). En effet, les racines des arbres sont

présentes dans les mêmes horizons pédologiques que les racines de la culture. Dans une étude réalisée au Québec, 95 % des racines de chêne rouge (*Quercus rubra*), de peuplier hybride (*Populus deltoides* × *Populus nigra*) et de fourrages se trouvaient dans les premiers 45 cm du sol et 40 % des racines d'arbres se trouvaient dans les premiers 10 cm du sol (Bouttier et al., 2014). Or, dans notre contexte climatique et à l'échelle de la parcelle agricole, la compétition souterraine ne semble pas affecter les rendements agricoles en SAI de façon négative. Certes, on observe une diminution marquée du rendement à proximité de la rangée d'arbres. Par rapport au centre de l'allée (5,75 m des arbres), le rendement était d'environ 40 % inférieur à 1,5 m des chênes rouges et jusqu'à 75 % inférieur pour les peupliers hybrides (Bouttier et al., 2014). Cependant, le rendement se rétablit lorsque l'on s'éloigne des arbres. Par ailleurs, des analyses statistiques de corrélation ont révélé que c'était le manque de lumière qui était responsable de la baisse de rendement et non la compétition racinaire, ce qui confirme les résultats d'autres études (Miller et Pallardy, 2001; Rivest et al., 2009). Dans le cas des fourrages, qui tolèrent un ombrage allant jusqu'à 50 %, leur teneur en protéines en SAI serait de 33 % supérieure par rapport au témoin agricole (Gagnon, 2015).

Rivest et al. (2010) évoquent la possibilité que le paillis de plastique, couramment utilisé en SAI et dans d'autres aménagements agroforestiers pour favoriser l'établissement des arbres en limitant la concurrence des mauvaises herbes, puisse contribuer à la compétition pour les nutriments avec la culture adjacente. Sous le paillis de plastique, l'activité microbienne et l'activité mycorhizienne seraient moindres que dans l'allée cultivée (Chiffot et al., 2009), ce qui inciterait les racines d'arbres à croître vers l'allée en culture.

1.1.7. Compétition pour l'eau

L'eau est un facteur important qui peut affecter le rendement des cultures en SAI (Jose et al., 2000a). Toutefois, dans le sud-est québécois, la lumière et non l'eau s'avère être le facteur le plus limitant (Reynolds et al., 2007; Rivest et al., 2009;

Bouttier et al., 2014). Bien que l'eau ne soit généralement pas une contrainte majeure au Québec, les rendements lors d'une saison de croissance ponctuée d'épisodes secs peuvent être diminués. Ce serait donc lors de circonstances particulières (pluviométrie basse, sol poreux, culture exigeante en eau, etc.) que les SAI auraient un effet plus marqué sur les rendements agricoles. Dans ces cas, l'eau, et non la lumière, est le facteur abiotique limitant les rendements agricoles.

Nous savons que l'effet que peut avoir un stress hydrique sur le rendement dépend de la culture et de la phénophase, soit le stade de croissance de la plante. Pour le soya, par exemple, si le stress hydrique survient pendant que la plante remplit le grain, le rendement pourrait diminuer de 23 % et contenir des grains 17 % plus petits (Brevédan et Egli, 2003). Pour le maïs, lors de la même phénophase, ce sont des pertes de rendement de 20 à 41 % qui peuvent être observées (NeSmith et Ritchie, 1992). En Indiana, où l'eau est un facteur limitant et non la lumière, le rendement du maïs avait diminué de 50 % et ce, dans un SAI de seulement 10 ans (Gillespie et al., 2000). Cette réduction de rendement était directement attribuée à la concurrence pour les ressources hydriques entre les arbres (chênes rouges et noyers noirs) et le maïs. Une étude de Miller et Pallardy (2001) arrive à des résultats comparables. L'humidité du sol en systèmes agroforestiers peut être réduite comparativement à ce qu'on observe en monoculture et ce, jusqu'à une profondeur de 40 cm (Anderson et al., 2009). Outre la concurrence exercée par le prélèvement des arbres, on attribue une partie de ce phénomène à la croissance et à la décomposition des racines profondes des arbres qui augmentent la porosité du sol et favorisent l'infiltration de l'eau à des profondeurs supérieures à ce qu'on observe dans des systèmes dépourvus d'arbres (Cadisch et al., 2004). Par ailleurs, cette porosité accrue pourrait avoir comme effet d'assécher davantage le sol sous les cultures à proximité des arbres que sous celles qui en sont plus éloignées.

Les conclusions que nous pouvons tirer de ces études sont que, dans des conditions critiques, il peut y avoir compétition pour les ressources hydriques et

que chaque culture est affectée différemment par ce changement. Toutefois, ce qui a été documenté en Ontario ne révèle pas une compétition pour l'eau qui affecterait négativement la culture adjacente (Thevathasan et al., 2004). Compte tenu du fait que le maïs, culture exigeante en eau, est très présent au Québec, l'adoption des SAI serait tout à fait appropriée dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques.

1.1.8. Mauvaises herbes

La documentation concernant l'effet des mauvaises herbes sur le rendement des arbres et des cultures en SAI est limitée, particulièrement en climat tempéré nord-américain. En Saskatchewan, Kabba et al. (2007) ont étudié la croissance des peupliers soumis à une compétition herbacée de pissenlit (*Taraxacum officinale*) et de chiendent (*Agropyron repens*) en chambre de croissance contrôlée. Une étude similaire a ensuite été menée en champ (Kabba et al., 2011). Les résultats des deux études montrent une importante réduction dans la croissance des peupliers lors de leur établissement. Dans le sud des États-Unis, Ramsey et al. (2003) ont trouvé que la gestion des mauvaises herbes et non la fertilisation était plus critique pour l'établissement des pins (*Pinus palustris* Mill). En Oregon, une étude en champ portant sur la biomasse des peupliers hybrides étalée sur trois saisons de croissance selon cinq scénarios de couverture du sol avec irrigation (mauvaises herbes, luzerne, courge, blé et sol nu traité avec herbicide) a montré une croissance supérieure sous un sol laissé à nu (Shock et al., 2002). Ainsi, les plantes herbacées seraient néfastes à la croissance des jeunes peupliers, qui sont utilisés abondamment en aménagements agroforestiers dans l'est du Canada. De plus, la perception qu'ont les producteurs agricoles face aux mauvaises herbes en agroforesterie constitue un frein à l'adoption, car les rangées d'arbres sont perçues comme étant des obstacles lors des opérations mécaniques de désherbage au champ (Valdivia et al., 2012). Les manœuvres d'épandage d'herbicides pourraient aussi être complexifiées par la présence d'arbres et mener à une répartition moins uniforme des herbicides comparativement à un champ dépourvu d'arbres. Toutefois, peu

d'information semble disponible concernant l'effet des rangées d'arbres sur la répartition et la densité des mauvaises herbes et leur effet sur les rendements des cultures en SAI.

1.2. Effets aériens

1.2.1. Vent

L'effet brise-vent des arbres sur les cultures est un phénomène bien documenté; ce sont d'ailleurs les systèmes agroforestiers les plus répandus au Québec. Les SAI et les haies brise-vent partagent certains effets communs sur l'agroécosystème et il peut être pertinent de faire référence à certaines études sur le sujet pour mieux comprendre les SAI. Les haies peuvent être plantées dans le but de protéger les cultures, les animaux et les bâtiments et sont généralement plantées en périphérie des champs alors que les SAI sont implantés à même la culture. Les haies ne sont généralement pas taillées et peuvent être espacées de plus de 10 fois la hauteur de l'arbre. En ce sens, l'interaction de l'arbre avec la culture est plus homogène dans le champ en SAI. De plus, les haies brise-vent peuvent avoir plus d'une rangée d'arbres et sont souvent arrangées avec un sous-étage d'arbustes, détail inexistant en SAI.

En ralentissant le vent, la haie aide à la conservation de l'humidité au sol, réduit les risques d'abrasion de la plante par les particules de sol transportées (Brandle et al., 2004) et aide à préserver une meilleure couverture de neige au sol (Brandle et Nickerson, 1996). Au Québec, les haies sont fréquemment utilisées autour des bâtiments d'élevage, car elles freinent les odeurs et poussières et peuvent réduire les coûts de chauffage. En Ontario, on observe des hausses de rendement allant jusqu'à 12 % dans des cultures de soya protégées par des brise-vent (Baldwin et Johnston, 1984). Même de jeunes arbres (moins de 3 m) peuvent réduire la vitesse du vent jusqu'à 80 % (Böhm et al., 2014). De plus, en Nouvelle-Zélande et aux Pays-Bas, les haies brise-vent sont responsables d'une réduction de 80 à 90 % des dérives de pesticides (Ucar et Hall, 2001).

Bien qu'il existe quelques études sur l'effet des haies brise-vent sur les cultures dans l'est du Canada, il est difficile de transposer ces résultats sur les SAI en raison de différences dans l'espacement entre les arbres sur le rang et entre les rangées, dans les espèces ligneuses utilisées et dans les interventions pratiquées, notamment l'élagage des branches basses. Nous pouvons toutefois supposer qu'en présence de vents dominants marqués, les SAI rempliront partiellement les fonctions d'un brise-vent: une distribution de la neige plus uniforme et une réduction de la dérive des pesticides, des odeurs et des poussières et de l'abrasion des feuilles par les particules de sol. On connaît mal les subtilités microclimatiques qui pourraient distinguer une haie brise-vent et un SAI. C'est pourquoi ce projet de maîtrise étudiera l'humidité et la température à la surface du sol, deux variables influencées par le vent, en espérant que cela nous aidera à mieux comprendre l'effet microclimatique aux alentours des arbres.

1.2.2. Compétition pour la lumière

Dans notre climat, le principal facteur biophysique limitant la productivité des cultures en SAI est la lumière (Reynolds et al., 2007 ; Rivest et al., 2009 ; Bouttier et al., 2014). L'espace occupé par la couronne de l'arbre affecte la radiation du soleil qui atteint la culture. Ainsi, la distance entre les rangées d'arbres, la densité foliaire propre à chaque essence, l'orientation des rangées et l'élagage des branches affectent la lumière disponible pour la culture. Pour des cultures plus exigeantes en lumière, une diminution de la luminosité diminuera fortement le rendement, particulièrement à proximité de l'arbre. À Guelph, en Ontario, Reynolds et al. (2007) ont étudié plusieurs variables pouvant expliquer l'effet compétitif entre arbres et cultures, notamment l'assimilation nette (photosynthèse), la radiation photosynthétiquement active (RPA) et le taux d'humidité dans le sol en lien avec la croissance et le rendement du soya et du maïs à 2 et 6 m de la rangée d'arbres, constituée d'érables argentés (*Acer sacharinum*) et de peupliers hybrides d'environ 8 et 12 m de hauteur moyenne, respectivement. Leurs résultats montrent que l'assimilation nette du maïs et du

soya était fortement corrélée à la radiation photosynthétiquement active avec un effet négatif significatif des arbres sur la croissance et le rendement des cultures à 2 m de la rangée d'arbres. Le maïs, plante C4 exigeante en lumière, serait affecté plus négativement par le manque de lumière que le soya (C3), ce qui confirme les résultats obtenus dans d'autres études (Board et al., 1995; Peng et al., 2009). Or, au-delà d'une certaine distance de la rangée d'arbres, le rendement des cultures ne serait plus affecté négativement. Les résultats de Reynolds et al. (2007) montrent que les rendements des cultures n'étaient pas significativement différents à 6 m des arbres comparativement au témoin agricole. Les peupliers avaient un effet négatif plus marqué sur le rendement du maïs que sur celui du soya. Cette étude montre également que, sous notre climat, un déficit en lumière et non un déficit en eau semble être le frein plus important pour le rendement du soya. De façon générale, les cultures fourragères, pour leur part, s'accommodent bien à l'ombre et ne sont pas affectées négativement par l'ombre des arbres (Lin et al., 1998). Elles peuvent même présenter une teneur en protéine plus élevée par rapport aux témoins agricoles (Gagnon, 2015). Le défi pour les SAI en climat tempéré est donc de satisfaire les besoins en lumière de la culture en trouvant des essences ayant un port adéquat disposées selon une orientation nord-sud afin d'uniformiser l'ensoleillement et en effectuant l'élagage nécessaire des branches basses.

Ainsi, une plantation d'arbres trop dense ou un manque d'entretien des branches basses priverait la culture de lumière et aurait tendance à augmenter la proportion cultivée présentant un rendement inférieur. D'ailleurs, les SAI récemment implantés au Québec (Saint-André de Kamouraska, Baie-du-Febvre, Saint-Télesphore) présentent des espacements entre les rangées d'arbres oscillant plutôt entre 30 et 40 m afin de minimiser le manque de lumière pour la culture à proximité des arbres. Un élagage est aussi effectué à cette fin.

1.2.3. Espacement entre les arbres et les rangées

Au Québec et en Ontario, une première vague de SAI a été implantée en suivant des espacements entre les rangées d'arbres de moins de 15 m. Or, comme nous

l'avons vu précédemment, la zone de culture susceptible de subir une diminution de rendement significative s'étend à 2 m de la rangée d'arbres, parfois plus, ce qui couvre une proportion importante de la surface cultivée. Mentionnons également le fait que l'allée consacrée à la plantation des arbres, qui peut mesurer elle aussi 2 m de largeur, est également soustraite à la surface cultivable. L'observation de ces premiers SAI a mené à une augmentation de l'espacement entre les rangées qui varie maintenant entre et 25 et 40 m.

En 2005, à Saint-Rémi, au Québec, dans un SAI de première génération espacé de 6 ou 8 m entre les rangées et de 2 m entre les arbres, le rendement du soya diminuait fortement à proximité des arbres. Une diminution de la lumière totale transmise aurait été la principale cause de cette forte diminution du rendement du soya. Toutefois, suite à une récolte de 2 arbres sur trois (2006), Rivest et al. (2009) ont observé que le rendement du soya à proximité des arbres était revenu à des niveaux comparables à ceux du centre de l'allée. Ainsi, la tendance que l'on observe actuellement pour les SAI consiste à octroyer plus de lumière aux cultures afin de limiter la compétition pour cette ressource. C'est pourquoi, au Québec, dans les SAI de deuxième génération, l'espacement initial entre les arbres tend à être de 5 m.

1.3. Rentabilité des SAI

En associant arbres et cultures sur une même unité de surface, la productivité de chaque composante sera moindre qu'elle l'aurait été si toute la surface y avait été consacrée. Une manière de mesurer la productivité globale d'une parcelle agroforestière consiste donc à mesurer le rendement des productions séparément, par exemple le volume de bois et le rendement de la culture, puis de les comparer à leur équivalent en monoculture. On constate que, dans la plupart des cas, la productivité globale d'une parcelle agroforestière augmente lorsque les composantes croissent ensemble plutôt que séparément. Graves et al. (2007) ont montré que la productivité totale d'un SAI pouvait être de 10 à 40 % supérieure à celle d'une monoculture pour des SAI composés, notamment, de

noyers, de chênes et de peupliers associés principalement à du blé. La densité d'arbres optimale pour le rendement des cultures était de 50 arbres/ha alors qu'elle était de 113 arbres/ha pour la production de bois. Les associations les plus prometteuses semblaient être entre le noyer et le blé. Certes, il est possible de changer la densité des arbres dans le champ de manière à favoriser le rendement des arbres ou des cultures dans le temps. En deçà de 50 arbres/ha, le rendement des cultures devrait rester rentable pour toute la durée de vie des arbres. Entre 50 et 200 arbres/ha, certains arbres pourraient devoir être récoltés afin de maintenir la rentabilité des cultures. Au-delà de 200 arbres/ha, le SAI est orienté vers la production de bois et les cultures ne seront rentables que lors des premières années (Dupraz et Liagre, 2008).

Dans un SAI de première génération en Ontario avec un espacement de 15 m entre les rangées d'arbres, Toor et al. (2012) ont eu des résultats mitigés quant à la rentabilité de l'opération. Les cultures étant le principal revenu, une perte de surface cultivable en raison de l'espace occupé par les arbres de même qu'une légère baisse de rendement à proximité des arbres n'étaient pas compensées par la valeur espérée des arbres à maturité. Les SAI de deuxième génération implantés au Québec, plus largement espacés, comprennent des densités qui varient entre 51 et 67 arbres/ha, ce qui, selon Dupraz et Liagre (2008), serait une densité légèrement trop élevée pour conserver un rendement optimal des cultures durant toute la vie des arbres. Cependant, la récolte des peupliers hybrides, qui constituent la moitié des arbres plantés, devrait théoriquement ramener la densité des arbres à des niveaux optimaux pour le rendement des cultures, tout en fournissant un revenu de la vente de bois.

1.3.1. Qualité du bois

Comparativement aux haies brise-vent, la taille des arbres, souvent des feuillus possédant une bonne valeur marchande, confère aux SAI l'avantage de pouvoir tirer un revenu supérieur de la vente de bois. Au Québec, les SAI sont toutefois encore trop jeunes pour pouvoir tirer des conclusions sur la qualité du bois produit dans ces conditions. Une étude de Genet et al. (2013) a comparé la

qualité du chêne rouge en plantation et celle en peuplements naturels et suggère que, bien que les arbres en plantation aient une croissance pratiquement deux fois plus rapide que celle des chênes en forêt naturelle, la densité du bois était comparable et leur valeur marchande aussi. Les arbres avaient été plantés dans des conditions comparables à celles rencontrées en milieu agricole (paillis de plastique de 1 m², désherbage chimique, élagués 6 fois en 21 ans). Toutefois, les arbres en SAI requièrent plus d'entretien que des arbres en milieu forestier.

1.4. Services écosystémiques

Les services écosystémiques (SE) que génèrent les SAI (amélioration de la qualité de l'eau, augmentation de la biodiversité et de la quantité de carbone séquestrée, etc.) bénéficient à l'entreprise agricole, mais aussi beaucoup, et parfois surtout, à la société.

1.4.1. Qualité de l'eau

Les racines profondes des arbres ont un rôle bénéfique important contre la lixiviation. Le système racinaire des arbres est vaste et peut aller puiser de l'eau et des éléments minéraux dans les horizons profonds du sol où les racines des cultures sont souvent absentes (Allen et al., 2004). Tel que mentionné précédemment, en agriculture intensive conventionnelle, seule une fraction des intrants utilisés est captée par la plante; le reste est lixivié et aboutit dans les cours d'eau. Dans les SAI, les racines d'arbres peuvent intercepter les éléments minéraux avant qu'ils ne soient lixiviés (Bradley et al., 2008; Bergeron et al., 2011; Grant et al., 2016). On a également observé que les racines du peuplier deltoïde pouvaient dégrader certains composés chimiques comme l'atrazine présents dans les pesticides agricoles (Burken et Schoor, 1997). On assiste ici à un service environnemental qui dépasse les frontières de l'entreprise agricole et bénéficie à toute la société, qui dépend de la qualité de cette eau.

1.4.2. Biodiversité du milieu agricole

Thevathasan et Gordon (2004) avancent que la diversité d'arthropodes que l'on retrouve en SAI pourrait réduire les dommages causés aux cultures par les ravageurs, réduisant de ce fait l'usage de pesticides de synthèse. En effet, Middleton (2001) a observé que le ratio entre prédateurs ou parasites et herbivores ravageurs était significativement supérieur dans un SAI que dans une monoculture. Au Missouri, Stamps et al. (2009) ont observé un taux de mortalité plus élevé des ravageurs dans un SAI de luzerne et de noyers noirs espacés de 24 m que dans une luzernière pure. Ainsi, la présence d'arbres dans les systèmes agricoles augmenterait la présence d'insectes utiles aux cultures pouvant réguler les populations de ravageurs. Comparativement aux systèmes agricoles conventionnels, les SAI offrent un plus grand nombre d'habitats, ce qui augmente l'abondance et la diversité de petits mammifères (Klaa et al., 2005) et d'oiseaux (Gibbs et al., 2016). Ces systèmes servent de corridor de déplacement et permettent un échange génétique entre les îlots de populations. Ces écosystèmes à biodiversité accrue jouent un rôle de conservation tout en produisant des biens de consommation potentiels (chasse et cueillette).

1.4.3. Séquestration de carbone

Tel que mentionné précédemment, la litière aérienne des arbres déposée annuellement de même que la décomposition des racines fines dans le sol constituent un apport en matière organique plus important que celui d'une culture agricole seule (Peichl et al., 2006; Wotherspoon et al., 2014). À Guelph, dans un SAI de 25 ans, Wotherspoon et al. (2014) ont mesuré le carbone total séquestré (aérien en souterrain) de cinq espèces d'arbres couramment utilisées dans les SAI du sud-est canadien et l'ont comparé à celui d'une monoculture de soya. Pour toutes les espèces d'arbres, leurs résultats montrent un bilan de carbone positif variant entre $2,1 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour le peuplier hybride et $0,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour le chêne rouge, alors que le bilan de carbone du soya était négatif ($-1,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$). Dans une lutte aux changements climatiques, les SAI peuvent donc s'avérer de

judicieux outils, car sur une même unité de surface, ils peuvent séquestrer une quantité supérieure de carbone tout en produisant des cultures.

Depuis 2010, grâce à son Système de plafonnement et d'échange de droits d'émission de gaz à effet de serre (SPEDE), le Québec fait partie d'un marché de carbone international dans lequel les SAI peuvent s'insérer. Une étude de Winans et al. (2016) s'est penchée sur la séquestration de carbone dans deux SAI au Québec afin de quantifier la rémunération que pouvaient espérer recevoir les entreprises agricoles intéressées à adopter ces systèmes. Les puits de carbone retenus dans leurs calculs étaient les parties souterraines et aériennes de la culture et de l'arbre. Selon la méthode de la valeur actuelle nette (VAN) et pour une période de 10 ans, les auteurs ont calculé une rémunération totale d'environ 2500 \$ par hectare pour le site de St-Édouard et d'environ 1700 \$ pour celui de St-Paulin, la différence entre les deux sites étant principalement expliquée par la densité des arbres (500 arbres/ha et 276 arbres/ha, respectivement). Ces chiffres ne tiennent pas compte des pertes de rendements engendrées ni du coût d'implantation de ces systèmes qui, au Québec, est subventionné à au moins 70 % par le programme Prime-Vert. Bien que ces calculs soient en partie basés sur des estimés du carbone séquestré, ils arrivent à quantifier ce qui pourrait être un incitatif financier non négligeable pour une entreprise agricole québécoise intéressée. Notons que la densité d'arbres présents sur ces sites est de beaucoup supérieure à celle des SAI plus récents. Les cinq sites à l'étude dans le présent projet de maîtrise avaient, en effet, une densité qui varie entre 25 et 67 arbres par hectare.

1.4.4. Analyse économique

Les coûts des SAI sont inférieurs aux bénéfices sociaux que l'on peut tirer. Or, financièrement, ces aménagements ne sont pas toujours rentables à l'échelle de l'entreprise agricole. Alam et al. (2014) ont estimé la valeur moyenne sur 40 ans de dix SE procurés par les SAI à partir de données collectées au Québec et en Ontario. Leurs résultats montrent que la valeur marginale annuelle moyenne des SE s'élève à 2645 \$ ha⁻¹ an⁻¹. En valeur actualisée nette, le revenu agricole

annuel moyen en SAI ($\$785 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) est inférieur au rendement agricole en monoculture ($1110 \text{ \$ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$). Toutefois, la valeur économique des services écosystémiques non marchands ($1634 \text{ \$ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) dépasse la valeur des biens agricoles pour lesquels il existe un marché. Selon cette étude, la valeur des SE qui bénéficient à la société dépassent la valeur des produits eux-mêmes. Des mesures de compensation pour l'entreprise agricole seraient donc envisageables afin de récompenser ces SE à leur juste valeur.

Une étude menée au Québec (Nolet et al., 2011) dans deux bassins versants (rivière Fouquette et rivière Esturgeon) a porté sur les services écosystémiques des haies brise-vent et des bandes riveraines selon trois scénarios de plantation (3, 10 et 25 m de largeur). Seuls les aménagements agroforestiers autour des bâtiments de ferme, qui réduisent les coûts de chauffage, et ceux protégeant les cultures, qui augmentent les rendements au champ, présentaient des bénéfices économiques à l'échelle de l'entreprise agricole. En extrapolant les résultats à l'échelle de 13 bassins versants, qui couvrent presque toute la surface agricole provinciale, on constate que les bénéfices sociaux d'aménagements agroforestiers dépassent les coûts nets privés. Les scénarios réglementaire (3 m), prioritaire (10 m) et intensif (25 m) génèrent respectivement des bénéfices nets de 35, 78 et 864 M \$.

Selon cette extrapolation, l'État aurait avantage à investir dans l'aménagement et l'entretien de haies brise-vent et de bandes riveraines. Étant donné la très faible proportion de SAI sur l'ensemble des aménagements agroforestiers québécois, il est toutefois difficile de transposer directement les résultats de cette étude. Cependant, en se basant sur la présente revue bibliographique, nous pouvons voir que les interactions entre arbres et cultures en SAI sont bien documentées et que les bénéfices de ces aménagements sont nombreux. Cependant, il semblerait que, dans les conditions actuelles, la rentabilité des SAI doive être prouvée avant qu'une entreprise agricole ne l'adopte.

1.5. Objectifs et hypothèses

Le but de ce projet d'étude est d'approfondir la connaissance des effets des SAI, particulièrement ceux de deuxième génération, sur la température, l'humidité du sol, la densité de mauvaises herbes et le rendement des cultures (soya, maïs et blé).

L'hypothèse principale est que les SAI affectent la température, l'humidité du sol et la densité de mauvaises herbes dans la culture agricole, ce qui aurait un effet sur le rendement. L'étude comporte par ailleurs quatre hypothèses secondaires :

1. Les SAI diminuent la température et l'humidité du sol à proximité de la rangée d'arbres ($\frac{1}{2} H$ et H , où H est la hauteur moyenne des arbres). Au-delà de H ($\frac{1}{2} (H+C)$ et C où C représente le centre de l'allée cultivée), la température et l'humidité du sol ne sont pas influencées par la rangée d'arbres.
2. Les SAI augmentent la densité de mauvaises herbes à proximité de la rangée d'arbres. Au-delà de H , la densité de mauvaises herbes n'est pas influencée par la rangée d'arbres.
3. Les SAI affectent légèrement les rendements agricoles, particulièrement ceux du maïs, à proximité de la rangée d'arbres. Au-delà de H , les rendements agricoles ne sont pas influencés par la rangée d'arbres.
4. Les rendements agricoles intégrés en SAI ne sont pas différents de ceux des témoins. (Par rendements agricoles intégrés, on entend les rendements des cultures par unité de surface dans les allées, sans considérer l'espace occupé par les rangées d'arbres.)

Chapter 2: Scientific article

Toward a second generation of tree-based intercropping systems in eastern North America: effect on soil moisture, soil temperature, weed density and crop yield.

Authors

Félix-Antoine Rhéaume-Gonzalez*¹, Maxime Carrier², Alain Cogliastro³, Alain Olivier⁴, David Rivest².

¹ Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, Québec, (QC), Canada, G1V 0A6

² Institut des sciences de la forêt tempérée (ISFORT), Université du Québec en Outaouais (UQO), 58 rue Principale, Ripon, QC, Canada, J0V 1V0

³ Institut de recherche en biologie végétale (IRBV), 4101, Sherbrooke Est, Montréal, QC, Canada, H1X 2B2

⁴ Département de phytologie, Université Laval, Québec, (QC), Canada, G1V 0A6

*Author's email: gonzalez048@hotmail.com

2.1. Résumé

Les systèmes agroforestiers intercalaires (SAI) offrent de nombreux avantages pour la société et l'entreprise agricole mais demeurent peu communs dans l'est de l'Amérique du Nord. Un réseau de sites expérimentaux de SAI âgés de 4 à 6 ans adaptés aux grandes cultures annuelles (25 à 40 mètres entre les rangées d'arbres) a été implanté dans le sud du Québec. Pour que l'adoption à grande échelle de ces systèmes se concrétise, une meilleure connaissance de leurs effets réels sur le rendement des cultures et les conditions microclimatiques est nécessaire. Le rendement du soya (*Glycine max*), du maïs (*Zea mays*) et du blé (*Triticum aestivum*), la densité de mauvaises herbes, l'humidité du sol et la température du sol ont été étudiés à quatre distances de la rangée d'arbres ($\frac{1}{2}H$, H, $\frac{1}{2}(H+C)$ et C, où H est la hauteur moyenne des arbres et C la distance entre le centre de l'allée cultivée et la rangée d'arbres) de même que dans des témoins agricoles et ce, pendant la saison de croissance 2017 dans cinq sites expérimentaux âgés de 4, 6, 6, 6 et 21 ans. Dans chacun des sites, la distance par rapport à la rangée d'arbres affectait la densité des mauvaises herbes. Les SAI n'ont eu aucun effet sur la température du sol ni sur l'humidité du sol mesurées à une profondeur de 15 cm. Les rendements des cultures montrent de légères variations spatiales (non significatives) à différentes distances par rapport à la rangée d'arbres. Dans tous les cas, les rendements intégrés (toutes distances combinées en excluant l'espace occupé par les arbres) n'étaient pas différents de ceux des témoins. Nos résultats suggèrent que les effets des jeunes SAI largement espacés sur les rendements agricoles et les conditions microclimatiques sont négligeables.

Mots-clés : rendement agricole, densité de mauvaises herbes, humidité du sol, température du sol

2.2 Abstract

Tree-based intercropping (TBI) systems, which offer many benefits for society and the farm enterprise, are not very common in eastern North America. An experimental network of widely spaced 4 to 6 year-old TBI systems (25-40 m between tree rows) that are adapted to large scale annual crops was established 4 to 6 years ago in southern Quebec. Realistic estimates of the effects of these TBI systems on crop yields and microclimatic conditions are clearly needed if their widespread adoption is to occur. Soybean (*Glycine max*), corn (*Zea mays*) and wheat (*Triticum aestivum*) yields, weed density, soil moisture and soil temperature were studied at four distances from a tree row ($\frac{1}{2}$ H, H, $\frac{1}{2}$ (H+C) and C, where H= average tree height and C= distance between the center of the cropped alley and the tree row) and in control plots over the 2017 growing season across five sites (4, 6, 6, 6 and 21 years old). In every site, the distance from the tree row significantly affected weed density. TBI systems did not affect the soil temperature and soil moisture measured at 15 cm depth. Crop yields show a slight spatial variation (non-significant) at different distances from the tree row. In all cases, integrated crop yields (all distances combined, where only the space occupied by the crop is considered) were not different from the control. Our results suggest that the effects of widely spaced tree rows on soil microclimatic conditions and crop yields are negligible in young TBI systems.

Keywords: crop yield; weed density; soil moisture; soil temperature

2.3. Introduction

With over 10 000 linear km of trees planted across the province of Quebec, agroforestry practices such as windbreaks and integrated riparian buffers are becoming more and more common across the agricultural landscape (Thevathasan et al., 2012). This is not the case for other types of agroforestry systems such as tree-based intercropping (TBI) systems. Yet, despite the growing evidence that TBI may offer major environmental benefits in eastern Canada, their adoption remains low in this region. For example, only 200 ha of crop land have been converted to these systems in Quebec in the last decade (Anel et al., 2017).

Compared to riparian tree buffers and windbreaks, TBI systems may have a more evenly distributed interaction between the soil and the crop. If designed and maintained properly, they can have beneficial environmental impacts for society such as reducing nutrient leaching in waterways (Bradley et al., 2008; Bergeron et al., 2011; Grant et al., 2016), improving biodiversity (Thevathasan and Gordon, 2004; Klaa et al., 2005; Gibbs et al., 2016) and sequestering carbon (Peichl et al., 2006; Wotherspoon et al., 2014; Winans et al., 2016).

For a farm enterprise, TBI systems have the potential of at least maintaining the overall productivity of a field while reducing inputs (Middleton, 2001; Thevathasan and Gordon, 2004; Stamps et al., 2009). Studies in Quebec and Ontario have shown that the introduction of widely spaced trees in annual fields may increase soil organic carbon content (Bambrick et al., 2010), microbial biomass (Lee and Jose, 2003; Rivest et al., 2013; Doblas-Miranda et al., 2014) and arbuscular mycorrhizal diversity and abundance (Chiffot et al., 2009), which in turn may increase the nutrient availability for the crop (Thevathasan and Gordon, 2004). These factors can reduce the input needs (fertilizers and pesticides) in TBI systems with yields comparable to systems without trees (Nair et al., 2009; Gao et al., 2014).

Microclimatic conditions in the field can also be influenced by trees. We know that by reducing wind speed, tree windbreaks can affect the air and soil temperatures positively for the crop by reducing extreme wind speeds and temperature swings, thus improving plant water-use efficiency, germination and extending the growing season (Brandle et al., 2004). However, TBI systems are structurally different from tree windbreaks and their effects may be different. Although generally not the most limiting factor in eastern Canada, competition for water can sometimes have a negative effect on crop yields and tree growth (Jose et al., 2004; Thevathasan et al., 2004). Indeed, trees and crops do use some water in the soil which is then not available for the other component of the association. But trees also create shade that reduces soil evaporation and evapotranspiration of crops and weeds (Jose et al., 2004). Much like with windbreaks, extreme soil temperatures in TBI systems can also be buffered by trees, which can potentially increase seed germination and extend the growing season (Monteith et al., 1991; Jose et al., 2008). However, such effects were not observed in a young (3 years) TBI system in Ontario with corn, wheat and soybean (Williams and Gordon, 1995).

Uneven crop development or moisture content at harvest due to microclimatic variations across the crop alley could affect farmer's crop management. Generally, in eastern North America, competition for light, not water, is considered to be the primary abiotic limiting factor for crop yields in agroforestry systems (Reynolds et al., 2007; Rivest et al., 2009; Bouttier et al., 2014). Since trees do create shade, crop yields of light demanding crops such as corn tend to decrease closer to the tree row while soybean yields tend to be less affected (Board et al., 1995; Peng et al., 2009). Moreover, the microclimatic conditions created by trees could affect weed density, which can have a negative effect on tree growth (Shock et al., 2002; Ramsey et al., 2003; Kabba et al., 2007; Kabba et al., 2011). High weed density in the uncultivated strip under the tree rows could also affect weed density in the crop alley, hence affecting crop yields. However, the effects of weed density on crop yields in TBI systems are not well documented.

In the last three decades worldwide, a first generation of experimental TBI systems was established in different temperate regions, including in Quebec, which were designed with narrow alleys between trees (less than 15 m) and as little as 2 m spacing between trees at plantation (Gillespie et al., 2000; Burgess et al., 2005; Rivest et al., 2009; Cardinael et al., 2015). In southern Quebec, such high tree-density systems proved very effective for improving soil quality and tree growth (Rivest et al., 2010) but captured much of the light before it could reach the crop, therefore reducing crop yields significantly (Reynolds et al., 2007; Rivest et al., 2009; Bouttier et al., 2014). A second generation of TBI systems, where trees are more widely spaced both on the row (5 m) and between rows (25 to 40 m), was then established with willing producers in order to adapt TBI systems to large scale mechanical farming practices. Systems with similar spacing and tree species have been studied in Belgium (Pardon et al., 2017). However, in southern Quebec, these systems have not yet been studied and their effect on crop yields have not been documented. We hypothesized that the second generation of TBI systems, by letting more light through, would have very little negative effects on soil moisture, soil temperature, weed density and overall crop yields.

By studying five experimental sites of widely spaced TBI systems seeded with three of the most common annual crops in North America (corn, soybean and wheat), each on different soils and managed using different techniques, this research provides data that can be potentially used on a much larger territory to help estimate economic benefits of TBI systems.

2.4. Materials and methods

2.4.1. Experimental sites

Five sites (4, 6, 6, 6 and 21 years old) were studied across southern Quebec (Ste-Brigide d'Iberville (STB), Baie-du-Febvre (BDF), St-Télesphore (STT) and two in St-André de Kamouraska (SAKF and SAKV)). Relevant characteristics for

each site are summarized in table 1. Between 1981 and 2010, the average annual temperature ranged from 3.9 to 6.6 °C, total precipitation between 940 and 1077 mm and the degree-days (above 5 °C) between 1419 and 2121 (Environment Canada, 2018). Sites with fast growing hybrid poplars planted alternately in the same row with slower growing deciduous trees such as oaks (*Quercus rubra* and *Quercus macrocarpa*), sugar maple (*Acer saccharum*), american basswood (*Tilia americana*) and black locust (*Robinia pseudoacacia*) were chosen for this study. The annual crops in the alleys were soybean (*Glycine max*) (three sites (STB, SAKV and SAKF)), corn (*Zea mays*) (one site (BDF)) and wheat (*Triticum aestivum*) (one site (STT)).

2.4.2. Data collection

For each of the five sites, three or four blocks were sampled during the 2017 growing season (June to October) for a total of seventeen blocks (table 1). Each block, containing eight trees, comprised eight quadrats taken along a transect perpendicular to the tree row (four on each side) (figure 1). The four distances on each side of the tree row were $\frac{1}{2} H$, H , $\frac{1}{2} (H+C)$ and C , where H is the average height of the trees and C is the distance between the center of the cropped alley and the tree row. In total, thirteen control quadrats were sampled (three control quadrats per site except for STB which had one). Each quadrat integrated an area covering two 1.5 m long crop rows. Control quadrats were located minimally 50 m away from any tree or infrastructure susceptible of affecting the crop and the microclimatic conditions and were subjected to the same cropping management as the TBI quadrats.

2.4.3. Crop yield and yield components

All quadrats were sampled manually less than one week before crop maturity, threshed, then dried at 55 °C for five days, screened, weighted and counted electronically. For each quadrat, the following variables were determined: the number of stems per m^2 , the number of grains per stem, the number of pods per

stem (for soybean), 100-grain weight, grain yield per m² and integrated crop yield. The integrated crop yield was calculated for each site using the mean yield at each distance in proportion to its relative area in the alley excluding the space occupied by tree rows (Rivest and Vézina, 2015). The moisture content was calculated using the weight of grains at harvest (in situ when possible, otherwise within 24-48 hours) and the weight of the grains after being dried. Due to time constraints and in order to preserve the quality of the samples, the number of pods per stem was measured for STB, but not for SAKV and SAKF.

2.4.4. Soil moisture and temperature

All quadrats (including controls) were sampled at least twice during the growing season (see table 2 for dates and precipitations prior to sampling) at a depth of 15 cm for soil temperature, using a standard electronic thermometer, and for soil water content using a moisture meter (FieldScout TDR100, Spectrum Technology Inc., Aurora, IL, USA). For each quadrat, four parallel measurements were taken, 30 cm apart and perpendicular to the tree row (not shown in figure 1), in order to account for the soil spatial heterogeneity. Only the average of these measures was used for statistical analyses.

A set of nine soil moisture sensors (Onset 10HS) was also deployed at a 15 cm depth in one block in BDF using the same pattern as the crop yield quadrats (figure 2) in order to assess ongoing soil water content variations. These sensors recorded water content (m³/m³) for a unit interval (UI) of 30 minutes from July 26 to September 22, 2017.

2.4.5. Weed density

The visual presence of weeds was measured once and by the same observer in all quadrats in early August (see table 2 for weed density sampling dates) using a scale of 0 to 5 where 0= 0 %, 1= 1 to 20 %, 2= 21 to 40 %, 3= 41 to 60 %, 4= 61 to 80 %, 5= 81 to 100 % cover.

2.4.6. Statistical Analysis

Crop yield variables, integrated crop yield and weed abundance were analyzed using mixed-effects model ANOVA including three factors: distance from the tree row (fixed), blocks (random) and the side of the tree row (random). Each site was analyzed independently. Soil moisture and soil temperature were analyzed using mixed models with repeated measures (nlme package in R; Pinheiro et al., 2017). In some cases, when linear conditions were not met, a non-linear generalized model was used (glmmADMB package in R; Fournier et al., 2012) and then a mixed-model ANOVA with repeated measures was used (car package in R; Fox et al., 2017). When the distance from the tree row had a significant effect on the crop yield, a mixed-model was used to compare the integrated crop yield (all distances combined) to the control plot (system effect) (nlme package in R; Pinheiro et al., 2017). A Tukey test was used when comparing the means for each distance from the tree row (lsmean package in R; Lenth and Love, 2017). The relationships between crop yield components and soil moisture, soil temperature and weed density were analyzed using mixed linear regression models (nlme package in R; Pinheiro et al., 2017).

2.5. Results

2.5.1. Crop yields and components

In every site, the distance from the tree row had no significant effect on the humidity of the grains, the number of stems per m², the number of grains per stem and the integrated crop yield.

In BDF, the distance from the tree row had an effect on the 100-grain weight ($n=27$, $F_{(4,14)}=8.39$, $P=0.001$) and the grain yield of corn ($n=27$, $F_{(4,14)}=7.79$, $P=0.002$) (figure 3). The corn yield at $\frac{1}{2}$ H and H was significantly lower than at $\frac{1}{2}$ (H+C) and C, but did not differ from the control.

In STB, the distance from the tree row had a significant effect on the number of pods per stem ($n=32$, $F_{(2,21)}=3.51$, $P=0.033$) and on the 100-grain weight ($n=32$, $F_{(3,21)}=6.13$, $P=0.004$) of soybean (figure 4), but no effect on its grain yield ($n=32$, $F_{(3,21)}=1.85$, $P=0.169$) (results not shown). At $\frac{1}{2}$ H, the 100-grain weight (22.60 g) was significantly higher than at all other distances although the number of pods per stem was relatively low (16.70 g at $\frac{1}{2}$ H as opposed to 21.51 g at H).

2.5.2. Soil moisture content

In every site, the soil water content was not affected by the distance from the tree row ($N=150$, $c^2_{(4)}=5.00$, $P=0.289$). The continuous sensors in BDF show that after an important rain event, soil moisture reaches similar peaks at all distances. However, after a few days, there seems to be an inverse relationship between the distance from the tree row and the soil moisture. The area under the curve resulting from continuous soil moisture measurements at $\frac{1}{2}$ H, H, $\frac{1}{2}$ (H+C), C and in the control was respectively 697, 702, 845, 736 and 736 ($m^3/m^3 \times UI$) (figure 2). Control and C had a very similar soil moisture curve with peaks happening exactly at the same time.

2.5.3. Soil temperature

In every site, the soil temperature was not affected by the distance from the tree row ($N=109$, $c^2_{(4)}=6.46$, $P=0.167$).

2.5.4. Weed density

In every site, the distance from the tree row had a significant effect on weed density (figure 5). Weed density according to distance from the tree rows was highly variable depending on the site. In some sites, weed density was higher near the tree rows compared to the center of the cropped alley, while in other sites it was lower.

For soybean, the most affected distances were $\frac{1}{2}$ H (36,6 %) and H (20 %) in SAKV ($n=27$, $c^2_{(4)}=201.59$, $P<0.001$), $\frac{1}{2}$ (H+C) (60 %) in SAKF ($n=27$, c^2

$c^2_{(4)}=243.36$, $P<0.001$) and both $\frac{1}{2}$ (H+C) and C (31.4 %) in STB ($n=32$, $c^2_{(3)}=58.62$, $P<0.001$).

For corn (BDF), the highest weed density (25.80 %) was found at H ($n=36$, $c^2_{(4)}=17.99$, $P=0.001$).

For wheat (STT), the highest weed density (62.60 % and 57.6 %) was found at $\frac{1}{2}$ H and H ($n=36$, $c^2_{(4)}=35.21$, $P<0.001$).

2.5.5. Relationships between variables

Only one correlation was significant among all correlations tested. In SAKV, there was a significant correlation (0.65) between the 100-grain weight of soybean ($n=26$, $F_{(4,13)}=0.43$, $P=0.785$) and the soil temperatures taken on August 17 ($N=109$, $c^2_{(4)}=6.46$, $P=0.167$).

2.6. Discussion

In general, trees had no significant effect on crop yields and yield components. In BDF, the two closest distances from the tree row ($\frac{1}{2}$ H and H) showed significantly lower corn yields than in the center of the cropped alley, yet the integrated crop yield was not different from the control. The fact that only BDF was found to have a slightly lower yield within H could be due to the fact that corn, which was grown in BDF, is a C4 crop with higher light requirements than soybean or wheat, which were grown in the other sites. Also, after every important rain event, the soil water content at $\frac{1}{2}$ H seemed to drop lower than at other distances (figure 2). These events occurred approximately between growth stage six and nine, which is when kernels are blistering and filling the grain (Hanway, 1963). Yet, in these reproductive growth stages, what appears to be a decrease in soil water availability may contribute to reduce crop yields (NeSmith and Ritchie, 1992). The lower soil water content readings, as seen in figure 2, could be explained by competition for water between trees and corn (Gillespie et al., 2000) and/or by a difference in soil porosity near the tree row (Udawatta and Anderson, 2008).

The results obtained in BDF seem to support other studies on TBI systems in eastern Canada, suggesting that lower yields can be expected close to the tree row (Reynolds et al., 2007; Rivest et al., 2009; Bouttier et al., 2014), but are compensated by slightly higher yields towards the center of the alley. However, in STB, results show a significantly higher 100-grain weight of soybean at $\frac{1}{2}$ H ($n=32$, $F_{(3,21)}=6.13$, $P=0.004$) compared to the other distances. Despite this, the distance from the tree row was not found to have an effect on soybean yield or on the integrated crop yield.

The two significant effects of trees on crop yields were found in the fields where the average height of trees was the highest of all experimental sites (12.7 m for STB followed by 6.3 m for BDF (table 1). This could suggest that the effects of trees on crop yields become detectable when trees reach a certain height. These higher trees with a wider crown would logically be capturing more light and leaving less to the crop. However, the experimental design of this study does not provide the ability to distinguish between above and belowground interactions and therefore, the cause(s) for the effects observed cannot be accurately determined and remain speculative. In a recent study, Carrier (2018) studied soil chemical properties in STB and BDF and reported no significant effect from the tree row on cationic exchange capacity, total carbon and nitrogen, saturated and extractible phosphorus and pH levels.

Since BDF, SAKF, SAKV and STT are young (four or six years old), it is possible that the present neutral effect of trees on the crop yields becomes negative as the trees mature and intercept more sun-light. However, this second generation of TBI systems with wider spacing both between trees within the tree row and between tree rows should provide adequate sun-light for most annual crops and could have, under certain conditions (i.e. drier years), positive effects on crop yields. Moreover, the removal of 50 % of trees, which are fast growing hybrid poplars, 15 to 20 years after planting should open up the canopy even more and provide enough sunlight for most crops while providing ample space for the remaining trees as well.

Contrary to our expectations, the distance from the tree row showed no effect on the soil moisture and the soil temperature and did not affect the moisture content of crops at harvest. Therefore, such TBI systems should not affect farmers' harvesting management strategies. The other method used to show the continuous soil moisture tendencies in BDF (figure 2) shows a trend where the moisture is at its lowest at $\frac{1}{2}$ H, followed by H, then intermediary at C and at its highest at $\frac{1}{2}$ (H+C). Possible explanations for the higher soil moisture readings obtained at $\frac{1}{2}$ (H+C) could be spatial soil heterogeneity or spatial heterogeneity in water absorption from tree roots (at C, soil water evaporation could be high due to sunlight while the lower soil water content at $\frac{1}{2}$ H and H could be the result from tree roots high water uptake, leaving the $\frac{1}{2}$ (H+C) distance somehow protected from both factors. Another explanation is simply a misplacement or improper functioning of the probes. This method was used solely to give an overall image of the changes in soil water content in this field. Furthermore, a lack of repetitions (other blocks equipped with the same probes) prevents us from using this data to draw any conclusions. Nonetheless, this experimental design could be informative in further experiments for crops with sensitive soil moisture requirements and to understand how TBI systems might affect water distribution in the soil. Precipitations in BDF in 2017 were not lower than normal during the month of August (83.9 vs 87.1 mm) but happened as few large (< 20 mm) rain events. The lower soil moisture content observed closer to the tree rows could be explained by periodic water stresses for the corn and the trees resulting from competition for that resource (Gillespie et al., 2000). It should also be mentioned that these results were obtained from only one growing season and should therefore be used carefully due to variation in annual precipitation distribution and soil water storage.

Weed density was significantly affected by the distance from the tree row on all sites but had no effect on crop yields, despite very different soil management strategies (table 1). All sites used tillage except BDF, which was managed using direct seeding. In BDF, SAKV and STT, the distances most affected by weeds were $\frac{1}{2}$ H and H. Improper herbicide spraying near the cropped alley edge and

the tree row could be the cause of higher weed density near trees. Overtime, this untreated strip of weeds could cause a higher seed bank to develop near tree rows (Boutin et al., 2001). In STB and SAKF, where no herbicides were used, weeds were most present at ½ (H+C) and C and a root disease, possibly *Fusarium* sp, was observed and seemed more prevalent near the center of the cropped alley than close to the trees. Interestingly, an herbicide was sprayed in SAKV, also seeded with soybean and with the same soil management as in SAKF, but the root disease was not observed at any distance. Perhaps the root disease, by weakening and killing the crop, could create favorable conditions for weeds to germinate and become denser over the rest of the growing season. It is unclear why this phenomenon was more present near the center of the cropped alley than closer to the tree row. Studies with more attention dedicated to weeds in TBI systems could be useful for farmers concerned with weed management.

No significant integrated crop yields or microclimatic effects were measured in STB. The measurements made in this 21-year TBI system have to be used carefully in comparison with the other four younger TBI experimental fields due to its much wider spacing between rows and its only one control quadrat. However, the environmental conditions created by trees in STB could help us understand the upcoming management practices for farmers interested in implementing this second generation of TBI.

The second-generation TBI systems that were part of this study only show a slight variation in the spatial distribution of crop yields that does not affect the integrated crop yield. These findings could help promote this second generation design for southern Quebec and other regions with similar climates and farming practices.

2.7. Conclusion

Effects of trees on crop yields were detected within close proximity of trees on two out of five sites. There, they caused a spatial variation in crop yields with slightly lower yields within H compared to the controls. However, this was

compensated by slightly higher yields near the center of the alley crop. Therefore, the integrated yield was not different in each one of the five TBI studied compared to control plots. Weed density was important on every site, but did not affect crop yields. Soil moisture and soil temperature were not affected significantly by trees. These findings suggest that the second generation of more widely spaced TBI systems established in southern Quebec have a neutral effect on crop yields, at least when the trees are young, and should therefore be considered as a viable option for large scale annual agriculture, considering that they also generate several environmental benefits for farmers and society.

2.8. Tables and figures

Table 1: Tree arrangements, crops, crop management and site-specific information.

Location	Ste-Brigide (STB)	St-Télésphore (STT)	Baie-du-Febvre (BDF)	St-André de Kamouraska Farm (SAKF)	St-André de Kamouraska Village (SAKV)
Latitude	45°22' N	45°17' N	46°08' N	47°37' N	47°40' N
Longitude	73°02' O	74°26' O	72°40' O	69°44' O	69°43' O
Annual average temperature (°C)	6.5	5.8	5.3	3.4	3.4
Annual average precipitation (mm)	1103	1077	924	998	998
Average degree days (above 5 °C)	2121	1989	1931	1419	1419
Soil % sand	9	19	69	66	69
Soil % loam	47	47	26	22	26
Soil % clay	45	33	5	11	5
pH	6.8	6.3	6.4	6.4	6.4
Year established	1996	2014	2012	2012	2012
Spacing between tree rows (m)	90	38	39	30	30
Spacing between trees on the row (m)	4	5	5	5	5
Tree density/ha	28	53	51	67	67

Average height (H) of trees (m)	12.7	5.2	6.3	2.7	3.1
Crop	Soybean	Wheat	Corn	Soybean	Soybean
Tree species	Red oak (<i>Quercus rubra</i>) Bur oak (<i>Quercus macrocarpa</i>) White ash (<i>Fraxinus americana</i>)	Poplar (<i>Populus deltoides x nigra</i>) Black alder (<i>Alnus glutinosa</i>) American basswood (<i>Tilia americana</i>) Bur oak Red oak	Poplar <i>Populus deltoides x nigra</i> Sugar maple (<i>Acer saccharum</i>) Red oak	Poplar (<i>Populus nigra x maximowiczii</i>) Sugar maple Bur oak Red oak	Poplar (<i>Populus nigra x maximowiczii</i>) Black locust (<i>Robinia pseudoacacia</i>) Red oak Bur oak American basswood
Crop management	Organic with Tillage	Conventional with Tillage	Conventional with Direct seeding	Conventional with Tillage	Conventional with Tillage
Herbicide	No	Yes	Yes	Yes	Yes
Drainage system	Yes	Yes	Yes	No	Yes
Number of blocks	4	4	3	3	3
Number of control quadrats	1	3	3	3	3

Table 2: Rainfall for each site according to Environment Canada (2018). Weed density sampling dates are marked with **.

Location	St-André de Kamouraska Farm (SAKF)			St-Télesphore (STT)		Baie-du-Febvre (BDF)			Ste-Brigide d'Iberville (STB)		Saint-André de Kamouraska Village (SAKV)																			
Day of sampling	July 14	August 7**	August 17	July 17	August 24**	July 15	August 11**	August 29	July 17	August 30**	July 15	August 7**																		
Rainfall (mm) in the last 14 days	31.2	34.8	51.5	65.5	102.9	60.0	49.6	29.4	73.0	28.5	29.3	34.8																		
Average yearly rainfall (mm) between 1981-2010	734.4			849.2		721.4			921.2		734.4																			
Yearly 2017 rainfall (mm)	N/A			838.7		876.8			951.5		N/A																			
Average monthly rainfall (mm) between 1981-2010	May	June	July	August	Sept.	October	May	June	July	August	Sept.	October	May	June	July	August	Sept.	October												
	109.9	94.0	91.8	99.2	78.7	81.9	94.3	109.1	94.9	104.7	92.1	97.0	78.2	94.8	101.4	87.1	94.6	82.3	95.5	104.5	121.2	97.6	96.1	110.6	109.9	94.0	91.8	99.2	78.7	81.9
2017 monthly rainfall (mm)	N/A			May	June	July	August	Sept.	October	May	June	July	August	Sept.	October	N/A														
				172.6	85.2	112.4	82.2	51.8	44.2	110.1	84.4	109.1	83.9	42.3	135.4	83.5	124.0	106.0	83.5	56.5	114.5									

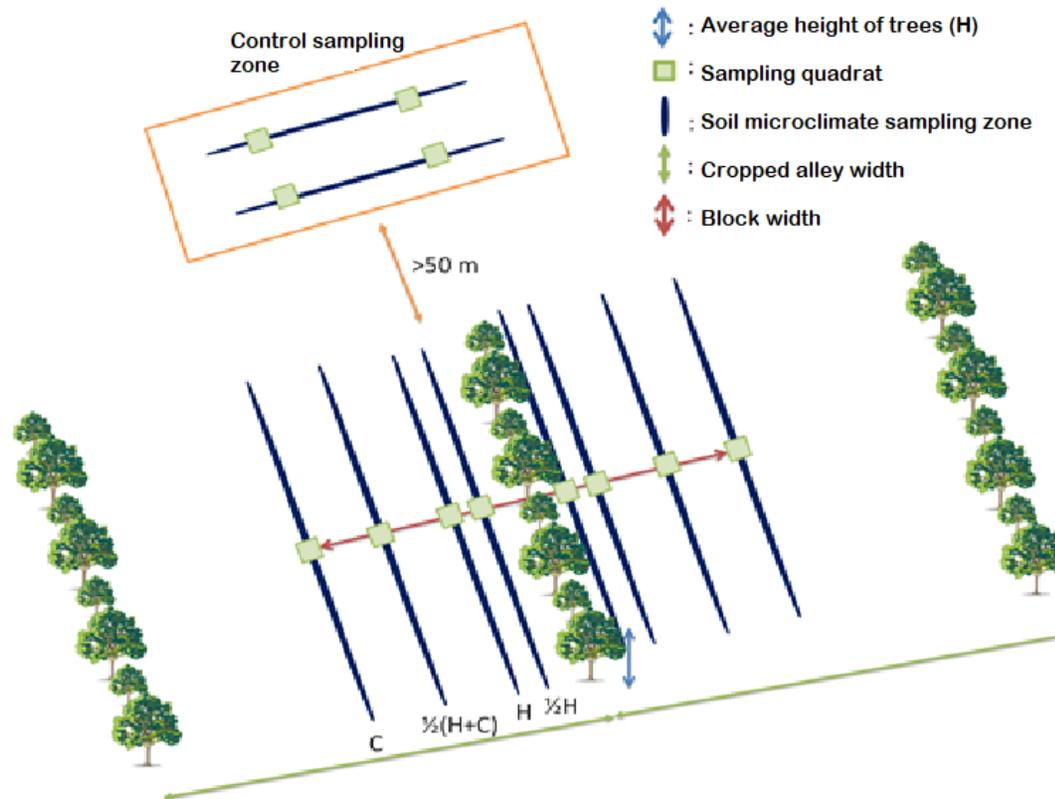


Figure 1 : Experimental design of the sampling plots. Sampling quadrats were used for crop yield variables and weed density. Soil moisture and temperature were sampled along the parallel blue lines. H= the average height of a tree, C= the center of the cropped alley.

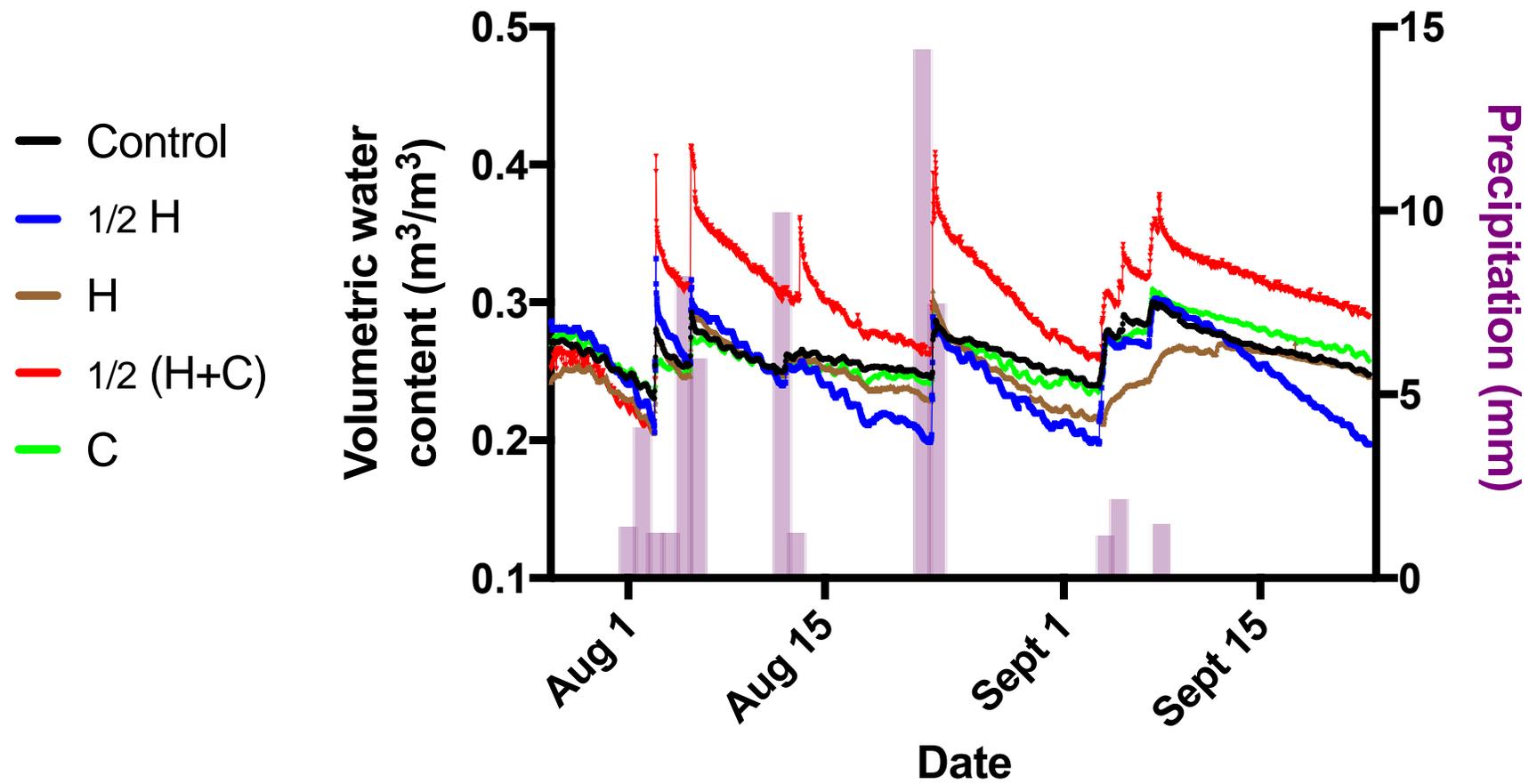


Figure 2 : Soil moisture variations across one block in Baie-du-Febvre (BDF). East and West values were pooled together. H= the average height of a tree, C= the center of the cropped alley. Data was collected every 30 minutes from July 26 to September 22 using Hobo 10HS. Precipitations are based on daily values taken from Environment Canada (2018).

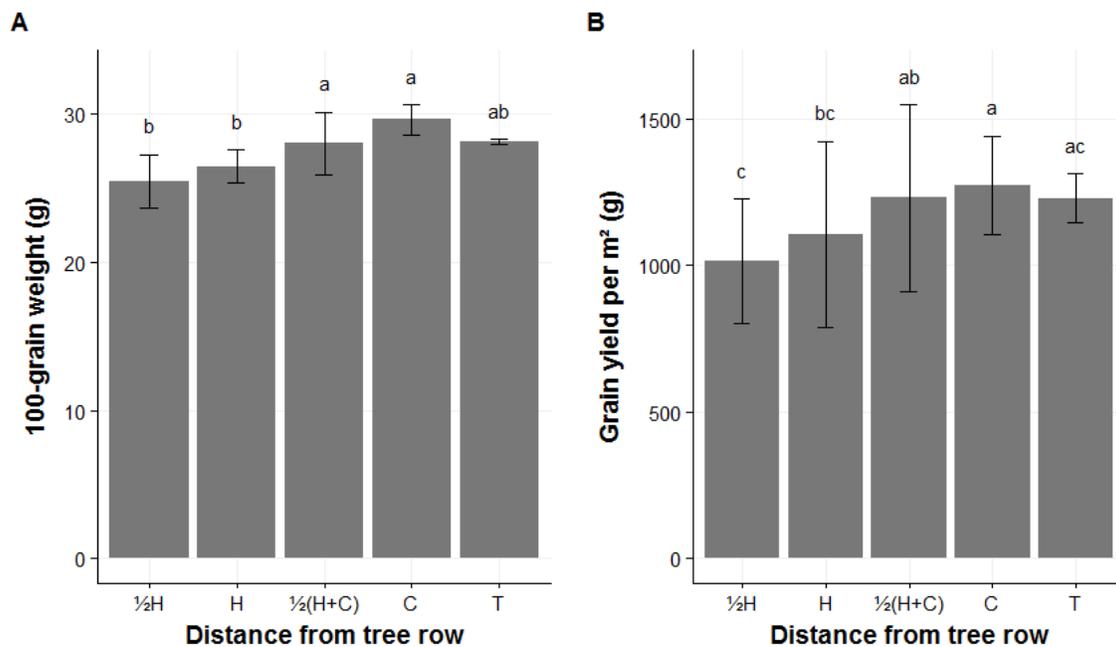


Figure 3: Corn 100-grain weight and grain yield per m² in Baie-du-Febvre (BDF) in function of the distance from the tree row where H=average height of trees, C=center of the cropped alley, T=control. Vertical lines indicate standard deviation. Means not sharing the same letter are significantly different. P<0.05.

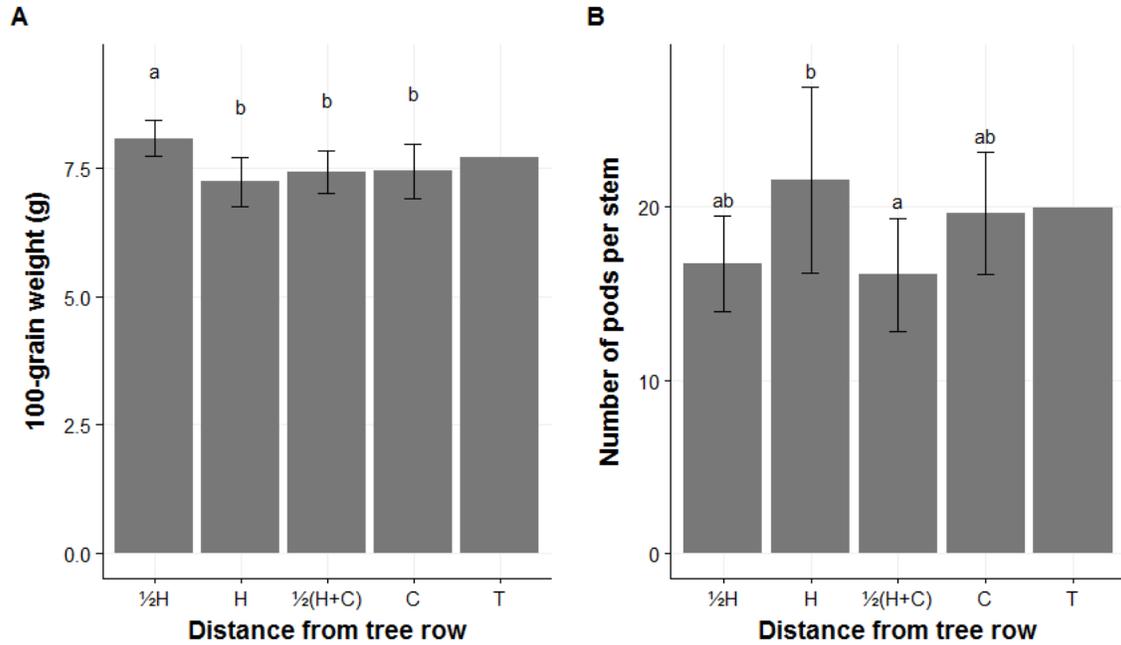


Figure 4 : Soybean 100-grain weight and number of pods per stem in Ste-Brigide d'Iberville (STB) in function of the distance from the tree row where H=average height of trees, C=center of the cropped alley, T=control. Vertical lines indicate standard deviation. Means not sharing the same letter are significantly different. $P < 0.05$. This site had only one control quadrat.

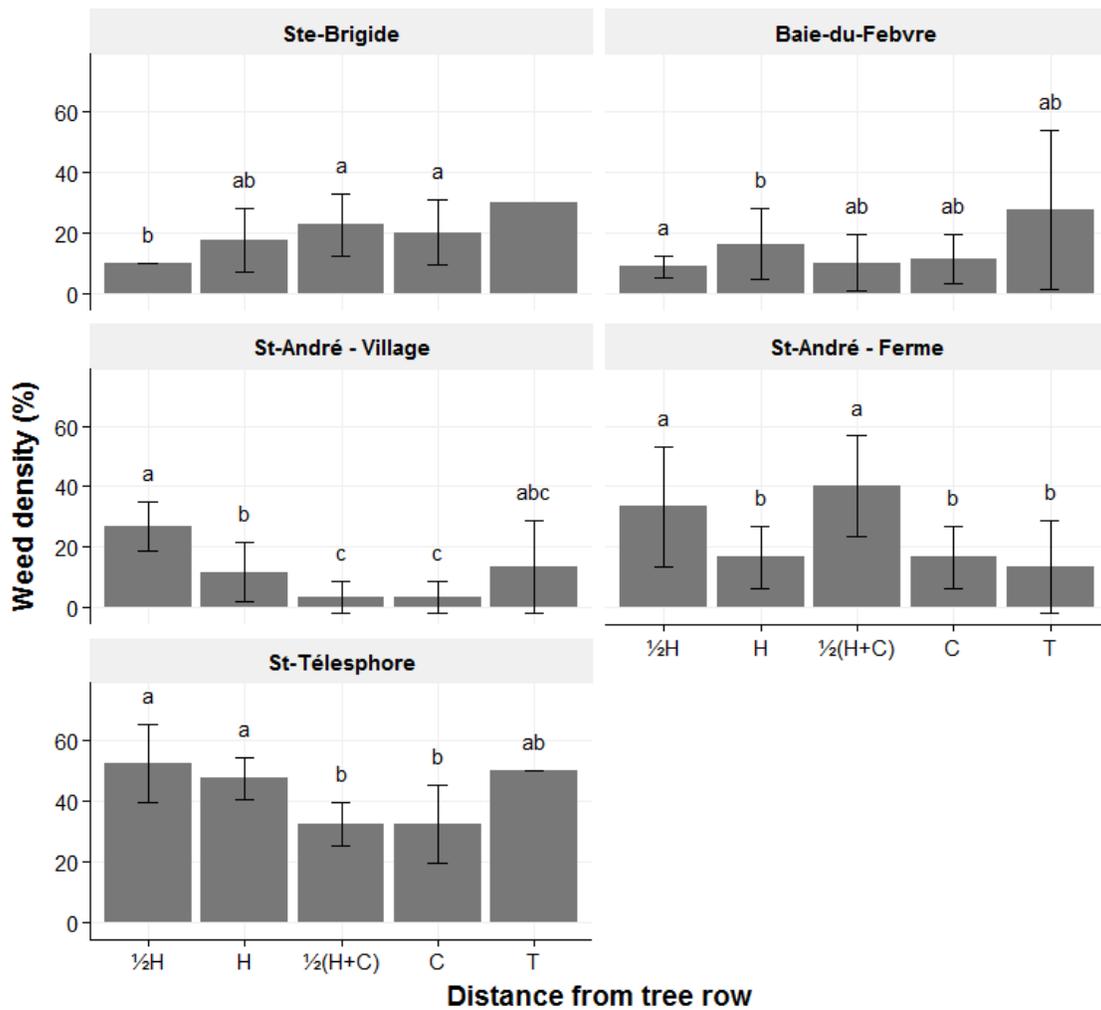


Figure 5: Weed density for each site in function of the distance from the tree row where H=average height of trees, C=center of the cropped alley, T=control. Vertical lines indicate standard deviation. Means not sharing the same letter are significantly different. P<0.05. Ste-Brigide (STB) had only one control quadrat.

Conclusion générale

Dans le premier chapitre de ce mémoire, nous avons vu que les connaissances scientifiques au sujet des SAI démontrent plusieurs bénéfices autant à l'échelle de la société que pour l'entreprise agricole privée. Les SAI ont un effet positif sur la qualité des sols agricoles car ils en augmentent la teneur en carbone organique et la vie microbienne, notamment la richesse des mycorhizes arbusculaires et leur répartition hétérogène dans le sol. Ainsi, la présence d'arbres en milieu agricole contribue à séquestrer une quantité considérable de carbone atmosphérique. Nous avons aussi vu que les arbres jouent un rôle bénéfique pour la qualité de l'eau qui dépasse largement les limites de la parcelle agricole sans pour autant créer une compétition néfaste majeure pour l'approvisionnement en eau de la culture. De plus, le bois issu des aménagements agroforestiers intercalaires croît plus rapidement qu'en milieu forestier et offre un produit de haute valeur. Tout compte fait, les services écosystémiques que produisent les SAI au Québec sont nombreux et s'avèrent être des investissements sociaux viables, car leurs bénéfices dépassent largement leurs coûts. Malgré ces bénéfices sociaux, l'implantation de ces systèmes se fait par des entreprises agricoles qui doivent assumer l'intégralité des frais d'entretien et une partie des frais de plantation, ce qui limite leur potentiel d'adoption.

À l'échelle de la parcelle agricole, le principal facteur limitant la production en SAI au Québec est la lumière. Certes, les premiers SAI, plantés densément, interceptaient cette précieuse lumière et se prêtaient mal à l'agriculture mécanisée d'aujourd'hui. Le but du présent projet de recherche était de caractériser les conditions microclimatiques dans des SAI de deuxième génération, plus largement espacés, et de déterminer leurs effets sur les rendements agricoles. L'analyse des données nous révèle un effet relativement neutre des arbres sur le rendement du soya et du blé, alors que de légères variations spatiales de rendement ont été mesurées dans le maïs à Baie-du-Febvre, sans pour autant en affecter le rendement intégré. Cependant, les SAI

de deuxième génération étudiés sont jeunes (4 à 6 ans) et il est probable que leur effet s'accroît avec le temps. Le manque de lumière pour la culture, facteur critique pour le rendement au Québec, pourrait être atténué par la récolte des peupliers qui sont présents dans ces systèmes, dégagant ainsi beaucoup d'espace pour la culture en plus de fournir un revenu d'appoint pour le producteur. L'avenir nous dira comment arbres et cultures se comportent dans ces systèmes matures. Tout porte à croire que les instances publiques et privées devraient sérieusement se pencher sur ces aménagements agroforestiers fort prometteurs.

Bibliographie

- Alam, M., Olivier, A., Paquette, A., Dupras, J., Revéret, J. P., & 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.
- Allen, S. C., Jose, S., Nair, P. K. R., Brecke, B. J., Nkedi-Kizza, P., & Ramsey, C. L. (2004). Safety-net role of tree roots: evidence from a pecan (*Carya illinoensis* K. Koch)–cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States. *Forest Ecology and Management*, 192(2), 395-407.
- Anderson, S. H., Udawatta, R. P., Seobi, T., & Garrett, H. E. (2009). Soil water content and infiltration in agroforestry buffer strips. *Agroforestry Systems*, 75(1), 5-16.
- Anel, B., Cogliastro, A., Olivier, A., & Rivest, D. (2017). *Une agroforesterie pour le Québec*. Document de réflexion et d'orientation. Comité agroforesterie, Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, Québec, Canada. 73 p.
- Baldwin, C.S., & Johnston, E.F. (1984). Windbreaks on the farm. Publication no 527. Ontario Ministry of Agriculture and Food, Ridgeway, Ontario. 20 p.
- Bambrick, A. D., Whalen, J. K., Bradley, R. L., Cogliastro, A., Gordon, A. M., Olivier, A., & 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.
- Bergeron, M., Lacombe, S., Bradley, R. L., Whalen, J., Cogliastro, A., Jutras, M. F., & Arp, P. (2011). Reduced soil nutrient leaching following the establishment of tree-based intercropping systems in eastern Canada. *Agroforestry Systems*, 83(3), 321-330.
- Board, J. E., Wier, A. T., & Boethel, D. J. (1995). Source Strength Influence on Soybean Yield Formation during Early and Late Reproductive Development. *Crop Science*, 35(4), 1104.
- Böhm, C., Kanzler, M., & 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.
- Boutin, C., Jobin, B., Bélanger, L., & 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.
- Bouttier, L., Paquette, A., Messier, C., Rivest, D., Olivier, A., & 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.
- Bradley, R. L., Olivier, A., Thevathasan, N., & Whalen, J. (2008). Environmental and economic benefits of tree-based intercropping systems. *Policy Options*, 29, 46-49.

- Brandle, J. R., & Nickerson, H. D. (1996). Windbreaks for Snow Management. EC96-1770. *Historical Materials from University of Nebraska-Lincoln Extension*, 844.
- Brandle, J. R., Hodges, L., & Zhou, X. H. (2004). Windbreaks in North American agricultural systems. *New Vistas in Agroforestry, Advances in Agroforestry, vol 1*. Springer, Dordrecht. 65-78.
- Brevedan, R. E., & Egli, D. B. (2003). Short periods of water stress during seed filling, leaf senescence, and yield of soybean. *Crop Science*, 43(6), 2083-2088.
- Burgess, P. J., Incoll, L. D., Corry, D. T., Beaton, A., & Hart, B. J. (2005). Poplar (*Populus* spp) growth and crop yields in a silvoarable experiment at three lowland sites in England. *Agroforestry Systems*, 63(2), 157-169.
- Burken, J.G., & Schoor, J.L. (1997). Uptake and metabolism of atrazine by poplar trees. *Environmental Science Technology*, 31, 1399-1406.
- Cadisch, G., de Willigen, P., Suprayogo, D., Mobbs, D. C., van Noordwijk, M., & Rowe, E. C. (2004). Catching and competing for mobile nutrients in soils. *Below-ground interactions in tropical agroecosystems: concepts and models with multiple plant components*. CAB International, Wallingford, 171-191.
- Cardinael, R., Chevallier, T., Barthès, B. G., Saby, N. P., Parent, T., Dupraz, C., Bernoux, M., & Chenu, C. (2015). Impact of alley cropping agroforestry on stocks, forms and spatial distribution of soil organic carbon— A case study in a Mediterranean context. *Geoderma*, 259, 288-299.
- Cardinael, R., Chevallier, T., Cambou, A., Béral, C., Barthès, B. G., Dupraz, C., Durand, C., Kouakoua, E., & Chenu, C. (2017). Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: a survey of six different sites in France. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 236, 243-255.
- Carpenter, S. R., Caraco, N. F., Correll, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N., & Smith, V. H. (1998). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 8(3), 559-568.
- Carrier, M. (2018). *Impact des systèmes agroforestiers intercalaires de deuxième génération sur la lumière disponible, les propriétés chimiques du sol et la production agricole*. Mémoire de maîtrise, Université du Québec en Outaouais. 62 p.
- Chiffot, V., Rivest, D., Olivier, A., Cogliastro, A., & Khasa, D. (2009). Molecular analysis of arbuscular mycorrhizal community structure and spores distribution in tree-based intercropping and forest systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 131(1), 32-39.
- Doblas-Miranda, E., Paquette, A., & Work, T. T. (2014). Intercropping trees' effect on soil oribatid diversity in agro-ecosystems. *Agroforestry Systems*, 88(4), 671-678.
- Dupraz, C., & Liagre, F. (2008). *Agroforesterie : des arbres et des cultures*. Éditions France Agricole, Paris, France. 413 p.

- Environment Canada (2018). *The national climate data and information archive. Canadian climate normals or averages 1981–2010.* www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca. Accessed Feb 5, 2018
- Fournier, D. A., Skaug, H. J., Ancheta, J., Ianelli, J., Magnusson, A., Maunder, M. N., Nielsen, A., & Sibert, J. (2012). AD Model Builder: using automatic differentiation for statistical inference of highly parameterized complex nonlinear models. *Optimization Methods and Software*, 27(2), 233-249.
- Fox, J., Weisberg, S., Adler, D., Bates, D., Baud-Bovy, G., Ellison, S., & Heiberger, R. (2017). *Package 'car'*. R Foundation for Statistical Computing, Vienne.
- Furze, J. R., Martin, A. R., Nasielski, J., Thevathasan, N. V., Gordon, A. M., & Isaac, M. E. (2017). Resistance and resilience of root fungal communities to water limitation in a temperate agroecosystem. *Ecology and Evolution*, 7(10), 3443-3454.
- Gagnon, L.-M. (2015). *Performance des fourrages en système de culture intercalaire au Québec*. Essai de maîtrise, Université Laval. 81 p.
- Gao, J., Barbieri, C., & Valdivia, C. (2014). A socio-demographic examination of the perceived benefits of agroforestry. *Agroforestry Systems*, 88(2), 301-309.
- Genet, A., Auty, D., Achim, A., Bernier, M., Pothier, D., & Cogliastro, A. (2013). Consequences of faster growth for wood density in northern red oak (*Quercus rubra* Liebl.). *Forestry*, 86(1), 99-110.
- Gibbs, S., Koblents, H., Coleman, B., Gordon, A., Thevathasan, N., & Williams, P. (2016). Avian diversity in a temperate tree-based intercropping system from inception to now. *Agroforestry Systems*, 90(5), 905-916.
- Gillespie, A. R., Jose, S., Mengel, D. B., Hoover, W. L., Pope, P. E., Seifert, J. R., Biehle, D. J., Stall, T., & Benjamin, T. J. (2000). Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the midwestern USA: 1. Production physiology. *Agroforestry Systems*, 48(1), 25-40.
- Grant, R. F., Kinch, T. A., Bradley, R. L., Whalen, J. K., Cogliastro, A., Lange, S. F., Allaire, S.E., & Parsons, W. F. (2016). Carbon sequestration vs. agricultural yields in tree-based intercropping systems as affected by tree management. *Canadian Journal of Soil Science*, 97(3), 416-432.
- Graves, A. R., Burgess, P. J., Palma, J. H., Herzog, F., Moreno, G., Bertomeu, M., Dupraz, C., Liagre, F., Keesma, K., van der Werf, W., Koeffeman de Nooy, A. K., & van den Briel, J.P. (2007). Development and application of bio-economic modelling to compare silvoarable, arable, and forestry systems in three European countries. *Ecological Engineering*, 29(4), 434-449.
- Guyot, G. (1989). Les effets microclimatiques des brise-vent et des aménagements régionaux. *Techniques Agricoles*, 1-27.
- Hanway, J. (1963). Growth Stages of Corn (*Zea mays* L.) 1. *Agronomy Journal*, 55(5), 487-492.

- Hijri, I., Sýkorová, Z., Oehl, F., Ineichen, K., Mäder, P., Wiemken, A., & Redecker, D. (2006). Communities of arbuscular mycorrhizal fungi in arable soils are not necessarily low in diversity. *Molecular Ecology*, *15*(8), 2277-2289.
- Jose, S., Gillespie, A. R., Seifert, J. R., & Biehle, D. J. (2000a). Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the midwestern USA: 2. Competition for water. *Agroforestry Systems*, *48*(1), 41-59.
- Jose, S., Gillespie, A. R., Seifert, J. R., Mengel, D. B., & Pope, P. E. (2000b). Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the midwestern USA: 3. Competition for nitrogen and litter decomposition dynamics. *Agroforestry Systems*, *48*(1), 61-77.
- Jose, S., Gillespie, A. R., & Pallardy, S. G. (2004). Interspecific interactions in temperate agroforestry. *Agroforestry Systems*, *61*(1-3), 237-255.
- Jose, S., Allen, S. C., & Nair, P. K. R. (2008). Tree-crop interactions: lessons from temperate alley-cropping systems. *Ecological Basis of Agroforestry*, 15-36.
- Jose, S. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry Systems*, *76*(1), 1-10.
- Kabba, B. S., Knight, J. D., & Van Rees, K. C. (2007). Growth of hybrid poplar as affected by dandelion and quackgrass competition. *Plant and Soil*, *298*(1-2), 203-217.
- Kabba, B. S., Knight, J. D., & Van Rees, K. C. (2011). Modeling nitrogen uptake for hybrid poplar with and without weed competition. *Forest Ecology and Management*, *262*(2), 131-138.
- Klaa, K., Mill, P. J., & Incoll, L. D. (2005). Distribution of small mammals in a silvoarable agroforestry system in Northern England. *Agroforestry Systems*, *63*(2), 101-110.
- Laird, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R., & Karlen, D. (2010). Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, *158*(3), 436-442.
- Leakey, R. (1996). Definition of agroforestry revisited. *Agroforestry Today*, *8*, 5-5.
- Lee, K. H., & Jose, S. (2003). Soil respiration and microbial biomass in a pecan—cotton alley cropping system in Southern USA. *Agroforestry Systems*, *58*(1), 45-54.
- Lenth, R., Love, J., & Lenth, M. R. (2017). Package 'lsmeans'. *The American Statistician*, *34*(4), 216-221.
- Lin, C. H., McGraw, R. L., George, M. F., & Garrett, H. E. (1998). Shade effects on forage crops with potential in temperate agroforestry practices. *Agroforestry Systems*, *44*(2), 109-119.
- MAPAQ (ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec) (2015). Monographie de l'industrie des grains au Québec. 37 p.

- Marinissen, J. C. Y., & De Ruiter, P. C. (1993). Contribution of earthworms to carbon and nitrogen cycling in agro-ecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 47(1), 59-74.
- Middleton, H. (2001). Agroforestry and its effects on ecological guilds and arthropod diversity. *M. Sc. (Forestry) Thesis. Faculty of Forestry, University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada.*
- Miller, A. W., & 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.
- Montagnini, F., & Nair, P. K. R. (2004) Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. In: Nair, P. K. R., Rao, M. R., & Buck, L. E. (eds) *New Vistas in Agroforestry. Advances in Agroforestry, vol 1.* Springer, Dordrecht.
- Monteith, J. L., Ong, C. K., & Corlett, J. E. (1991). Microclimatic interactions in agroforestry systems. *Forest Ecology and Management*, 45(1-4), 31-44.
- Nair, P. K. R., Mohan Kumar, B., & Nair, V. D. (2009). Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172(1), 10-23.
- Nair, P. K. R., Nair, V. D., Kumar, B. M., & Showalter, J. M. (2010). Chapter five-carbon sequestration in agroforestry systems. *Advances in Agronomy*, 108, 237-307.
- Nair, P. K. R. (2012). Carbon sequestration studies in agroforestry systems: a reality-check. *Agroforestry Systems*, 86(2), 243-253.
- Naylor, R. L. (1996). Energy and resource constraints on intensive agricultural production. *Annual Review of Energy and the Environment*, 21(1), 99-123.
- NeSmith, D. S., & Ritchie, J. T. (1992). Effects of soil water-deficits during tassel emergence on development and yield component of maize (*Zea mays*). *Field Crops Research*, 28(3), 251-256.
- Nolet, J., Mondon, M. & Zussy, S. (2011). Biens et services écologiques et agroforesterie : l'intérêt du producteur agricole et de la société. *Agriculture et Agroalimentaire Canada*, 42 p.
- Pardon, P., Reubens, B., Reheul, D., Mertens, J., De Frenne, P., Coussement, T., Janssens, P., & Verheyen, K. (2017). Trees increase soil organic carbon and nutrient availability in temperate agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 247, 98-111.
- Peichl, M., Thevathasan, N. V., Gordon, A.M., Huss, J., Abohassan, R.A. (2006). Carbon sequestration potentials in temperate tree-based intercropping systems, southern Ontario, Canada. *Agroforestry Systems*, 66, 243-257.
- Peng, X., Zhang, Y., Cai, J., Jiang, Z., & Zhang, S. (2009). Photosynthesis, growth and yield of soybean and maize in a tree-based agroforestry intercropping system on the Loess Plateau. *Agroforestry Systems*, 76(3), 569-577.

- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D., Heisterkamp, S., Van Willigen, B., & Maintainer, R. (2017). *Package 'nlme'*. Linear and Nonlinear Mixed Effects Models, version, 3-1.
- Power, A. G. (1999). Linking ecological sustainability and world food needs. *Environment, Development and Sustainability*, 1(3-4), 185-196.
- Price, G. W., & Gordon, A. M. (1998). Spatial and temporal distribution of earthworms in a temperate intercropping system in southern Ontario, Canada. *Agroforestry Systems*, 44(2-3), 141-149.
- Ramsey, C. L., Jose, S., Brecke, B. J., & Merritt, S. (2003). Growth response of longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) seedlings to fertilization and herbaceous weed control in an old field in southern USA. *Forest Ecology and Management*, 172(2-3), 281-289.
- Reynolds, P. E., Simpson, J. a., Thevathasan, N. V. & Gordon, A. M. (2007). Effects of tree competition on corn and soybean photosynthesis, growth, and yield in a temperate tree-based agroforestry intercropping system in southern Ontario, Canada. *Ecological Engineering*, 29(4), 362-371.
- Rivest, D., Cogliastro, A., Vanasse, A., & 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), 51-60.
- Rivest, D., Cogliastro, A., Bradley, R. L., & Olivier, A. (2010). Intercropping hybrid poplar with soybean increases soil microbial biomass, mineral N supply and tree growth. *Agroforestry Systems*, 80(1), 33-40.
- Rivest, D., Lorente, M., Olivier, A. & 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.
- Rivest, D., & 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.
- Ruiz, J., & Domon, G. (2005). *Les paysages de l'agriculture en mutation. Paysages en perspective*. Presses de l'Université de Montréal, série «Paysages», Montréal, 47-97.
- Shock, C. C., Feibert, E. B., Saunders, L. D., & Seddigh, M. (2002). Initial growth of irrigated hybrid poplar decreased by ground covers. *Western Journal of Applied Forestry*, 17(2), 61-65.
- Sims, J. T., Simard, R. R., & Joern, B. C. (1998). Phosphorus Loss in Agricultural Drainage: Historical Perspective and Current Research. *Journal of Environmental Quality*, 27, 277-293.
- Smil, V. (1999). Nitrogen in crop production: An account of global flows. *Global Biogeochemical Cycles*, 13(2), 647-662.

- Stamps, W. T., McGraw, R. L., Godsey, L., & Woods, T. L. (2009). The ecology and economics of insect pest management in nut tree alley cropping systems in the Midwestern United States. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 131(1), 4-8.
- Thevathasan, N. V., Gordon, A. M., Simpson, J. A., Reynolds, P. E., Price, G., & Zhang, P. (2004). Biophysical and ecological interactions in a temperate tree-based intercropping system. *Journal of Crop Improvement*, 12(1-2), 339-363.
- Thevathasan, N. V. & Gordon, A. M. (2004). Ecology of tree intercropping systems in the North temperate region: Experiences from southern Ontario, Canada. *Agroforestry Systems*, 61, 257-268.
- 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. & Zabek, L. (2012). Agroforestry research and development in Canada: the way forward. *Agroforestry-The Future of Global Land Use*. Springer, Netherlands, 247-283.
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R. & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671-677.
- Toor, I. A., Smith, E. G., Whalen, J. K., & Naseem, A. (2012). Tree-Based Intercropping in Southern Ontario, Canada. *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue canadienne d'agroéconomie*, 60(2), 141-154.
- Ucar, T., & Hall, F. R. (2001). Windbreaks as a pesticide drift mitigation strategy: a review. *Pest Management Science*, 57(8), 663-675.
- Udawatta, R. P., Kremer, R. J., Adamson, B. W., & Anderson, S. H. (2008). Variations in soil aggregate stability and enzyme activities in a temperate agroforestry practice. *Applied Soil Ecology*, 39(2), 153-160.
- Udawatta, R. P., & Anderson, S. H. (2008). CT-measured pore characteristics of surface and subsurface soils influenced by agroforestry and grass buffers. *Geoderma*, 145(3-4), 381-389.
- Valdivia, C., Barbieri, C., & Gold, M. A. (2012). Between forestry and farming: policy and environmental implications of the barriers to agroforestry adoption. *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue canadienne d'agroéconomie*, 60(2), 155-175.
- Williams, P. A., & Gordon, A. M. (1995). Microclimate and soil moisture effects of three intercrops on the rows of a newly-planted intercropped plantation. *Agroforestry Systems*, 29(3), 285-302.
- Winans, K. S., Whalen, J. K., Rivest, D., Cogliastro, A., & Bradley, R. L. (2016). Carbon sequestration and carbon markets for tree-based intercropping systems in Southern Quebec, Canada. *Atmosphere*, 7(2), 17.
- Wotherspoon, A., Thevathasan, N. V., Gordon, A. M., & 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), 631-64.