

IMPACT DES SYSTÈMES AGROFORESTIERS SUR LA STABILITÉ DU RENDEMENT DU MAÏS ET DU SOYA FACE À UNE RÉDUCTION DES PRÉCIPITATIONS



Réalisé par :

David Rivest, Ph.D., Université du Québec en Outaouais

Geneviève Gagné, M.Sc., Université du Québec en Outaouais

Alain Cogliastro, Ph.D., Institut de recherche en biologie végétale

François Lorenzetti, Ph.D., Université du Québec en Outaouais

Jérôme Dupras, Ph.D., Université du Québec en Outaouais

Octobre 2020

Remerciements

Nous remercions chaleureusement M. Jacques Côté de la Ferme Bertco pour sa bienveillance et son implication à toutes les étapes de ce projet. Nous remercions aussi l'Institut des sciences de la forêt tempérée, l'Institut de recherche en biologie végétale et l'Université Laval (Martin Lacroix) pour le prêt de plusieurs équipements ayant servi aux mesures sur le terrain et en laboratoire. Nous sommes reconnaissants envers tous les assistants de terrain qui ont contribué à la réussite de ce projet : Jolaine Arseneau, Jacques Baril, Vincent Cogliastro, Ève-Marie-Hébert, Romain Jaeger, Antoine Magnoux, Eva Masson, Fabrice Petel et Florence Tauc. Nous remercions le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada pour son soutien financier par l'entremise d'une subvention Découverte attribuée à David Rivest.

Ce projet a été réalisé en vertu du volet 4 du Programme Prime-Vert 2013-2018 et il a bénéficié d'une aide financière du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ) dans le cadre du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques (PACC 2013-2020). Les résultats, opinions et recommandations exprimés dans ce rapport émanent des auteurs et n'engagent aucunement le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.

Référence à citer

Rivest D, Gagné G, Cogliastro A, Lorenzetti F, Dupras J. 2020. Impact des systèmes agroforestiers sur la stabilité du rendement du maïs et du soya face à une réduction des précipitations. Rapport final. Université du Québec en Outaouais.

Point de contact pour information

David Rivest, Ph.D.

Université du Québec en Outaouais et Institut des sciences de la forêt tempérée

david.rivest@uqo.ca

819-595-3900 Poste 2937

Résumé

L'objectif de cette étude était de déterminer les effets d'un système agroforestier intercalaire (SAI) et d'une haie brise-vent sur les conditions microclimatiques, le rendement des cultures agricoles et différentes propriétés des communautés microbiennes du sol. Cette étude a testé un traitement de taille des racines (cernage racinaire) et un traitement de diminution artificielle de la pluie (avec gouttières couvrant 50 % de la surface du sol en juillet et août) afin de mieux comprendre les interactions aériennes et souterraines en systèmes agroforestiers dans un climat en changement. Cette étude visait aussi à estimer la rentabilité du SAI expérimenté dans un contexte opérationnel propre à une régie agricole de grandes cultures. Le SAI (50 arbres/ha, 2012) et la haie (2006) ont été implantés à Baie-du-Febvre, dans la région du Centre-du-Québec, dans une zone agricole à fort potentiel agronomique, mais où le couvert forestier demeure limité.

Le SAI a diminué la vitesse du vent et la température du sol dans les allées cultivées. Une diminution significative de la disponibilité de la lumière à proximité des rangées d'arbres a été mesurée dans le SAI; celle-ci n'a toutefois pas eu d'effets négatifs sur le rendement du soya. En 2018, marquée par un printemps et un été anormalement secs, le rendement du soya dans les allées du SAI à 12 et 20 m de la rangée d'arbres était significativement supérieur à celui dans le système agricole témoin, possiblement en raison d'une amélioration des conditions microclimatiques. En 2019, marquée par un printemps et un été avec des précipitations normales, le rendement du soya dans les allées cultivées était similaire à celui dans le système agricole témoin. Les effets de protection de la haie brise-vent sur le maïs étaient aussi plus prononcés en 2018 qu'en 2019. Ces résultats suggèrent que les systèmes agroforestiers peuvent contribuer à augmenter la résilience des cultures face à des stress hydriques, mais principalement lors des périodes de croissance les plus sèches. La méthode d'interception de la pluie développée à faible coût s'est avérée efficace, autant dans le SAI que dans la parcelle protégée par la haie, pour simuler expérimentalement au champ un stress hydrique modéré de longue durée. En 2018 et 2019, le traitement d'exclusion de la pluie a diminué le rendement en grains de 12 (maïs) à 14 (soya) %.

Les résultats de l'effet du cernage racinaire dans le SAI sur l'humidité du sol et le rendement des cultures indiquent qu'il n'y a pas eu de concurrence souterraine pour l'eau entre les rangées d'arbres et le soya, même en situation d'exclusion partielle de la pluie. Contrairement à ce qui a été observé dans d'autres régions tempérées, le cernage racinaire a eu un impact négatif sur le rendement agricole dans les allées cultivées. L'immobilisation de l'azote par des organismes décomposeurs de la litière racinaire pourrait être en cause. Il nous apparaît important que des travaux futurs s'attardent à mesurer les effets du cernage racinaire sur différents types de cultures et de sols. Il serait aussi important dans le futur de continuer à évaluer la variation interannuelle du rendement de différentes cultures en SAI, à différents stades évolutifs des arbres. Cette approche devrait permettre de mieux connaître le potentiel des SAI dans le contexte de l'adaptation des grandes cultures aux changements climatiques.

La biomasse totale des communautés de bactéries et la biomasse des bactéries Gram négatif dans le témoin agricole tendaient à être supérieures à celles à 4, 12 et 20 m de la rangée d'arbres dans le SAI. Ces résultats reflètent de possibles différences de qualité des apports de matière organique fraîche entre le témoin agricole et le SAI, où des litières et des racines fines mortes des arbres s'ajoutent aux résidus de culture. De façon générale, le SAI a eu des effets relativement limités sur la structure des communautés microbiennes du sol. Nous croyons que ces effets limités étaient attribuables au stade relativement jeune du SAI expérimental. Il serait intéressant que des recherches futures déterminent si les SAI, à des stades plus avancés de maturité, favorisent l'activité des communautés fongiques plutôt que celles des communautés de bactéries. Les champignons ont des métabolismes plus lents que ceux des bactéries et peuvent donc favoriser une plus grande accumulation de carbone organique au sol.

Notre analyse économique a révélé que les investissements relativement importants que doivent faire les producteurs agricoles pour planter et entretenir les arbres dans les SAI défavorisent leur valeur actuelle nette (VAN), qui a été mesurée sur un cycle complet de production des arbres (40 ans). Par contre, nous avons estimé qu'une aide financière couvrant 70 % des coûts d'implantation et d'entretien des SAI permettrait d'augmenter leur valeur économique à un niveau comparable à celui des systèmes agricoles traditionnels. Une telle aide financière permettrait ainsi de reconnaître les nombreux bénéfices sur la biodiversité et services écosystémiques fournis par les SAI, mais dont la valeur économique est plus difficilement quantifiable. L'analyse économique a aussi révélé que des paiements aux producteurs agricoles pour séquestration du carbone peut rendre la VAN des SAI comparable ou supérieure à celle des systèmes agricoles traditionnels. Afin que ce potentiel économique puisse s'opérationnaliser, il faudra développer au Québec des protocoles de quantification de crédits compensatoires permettant de reconnaître les projets de séquestration de carbone et de réduction d'émission de GES en systèmes agroforestiers.

Introduction

L'agriculture au Québec doit s'adapter à des températures croissantes qui affecteront de plus en plus les sols et les cultures. Par exemple, selon Ouranos, dans les régions du sud du Québec, les températures annuelles de l'air projetées pourraient augmenter d'environ 2 à 4 °C (scénario de fortes émissions de GES RCP 8.5) pour la période 2041-2070. Les vagues de chaleur devraient également devenir plus fréquentes au cours des prochaines décennies. La hausse des températures combinée aux précipitations estivales plus erratiques devrait augmenter la probabilité de stress hydrique en été, ce qui pourrait affecter la productivité des cultures. La température de l'air est généralement positivement corrélée avec la température du sol et peut contribuer à réduire significativement l'humidité du sol, en particulier dans l'horizon de surface, où se développent la majorité de la biomasse racinaire des cultures. Certains modèles prédisent que l'augmentation attendue de la température durant la saison de croissance va se traduire par des diminutions significatives des rendements des cultures (Thivierge et al. 2016; Zhao et al. 2017). La sécheresse et les excès de chaleur ont totalisé 24 % des déclarations de pertes par les producteurs québécois de grandes cultures, maraîchers et de pommes de terre entre 1982 et 2001 (Bryant et al. 2007) et les changements climatiques sont amenés à exacerber ces problèmes. On s'intéresse de plus en plus au potentiel des systèmes agroforestiers pour aider les agroécosystèmes à s'adapter aux changements climatiques. Ce projet s'intéresse particulièrement aux systèmes agroforestiers intercalaires (SAI) qui consistent en la plantation d'arbres en rangées largement espacées, de façon à pouvoir cultiver différentes plantes agricoles dans l'espace intercalaire (ou allées). Une expérience intégrant une haie brise-vent a aussi été réalisée dans ce projet.

Au Québec, les systèmes agroforestiers les plus répandus sont les haies agroforestières. Elles couvriraient près de 10 000 km au Québec (Thevathasan et al. 2012). Le déploiement des systèmes agroforestiers demeure toutefois relativement limité au Québec. Par exemple, entre 2002-2014, uniquement 3 m de haies agroforestières par hectare de terre cultivée ont été plantés au Québec grâce au support du programme Prime-Vert du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) (Anel et al. 2017). Par ailleurs, moins de 200 hectares de SAI ont été dénombrés. La reconnaissance institutionnelle, la formation de la relève agricole et de professionnels qualifiés, le développement de programmes de support financier adaptés et le développement de connaissances pratiques constituent des défis importants à relever pour augmenter l'adoption des systèmes agroforestiers par les producteurs agricoles du Québec (Anel et al. 2017; Hotelier et al. 2020).

La majorité des résultats concernant l'impact des systèmes agroforestiers tempérés sur la production agricole ont été obtenus dans des travaux sur les haies brise-vent. Il est bien connu que les haies, en diminuant la vitesse du vent dans la large zone de protection des cultures et des sols (e.g. 1-12H, où H=hauteur des arbres), réduisent les fluctuations de la température de l'air et du sol, augmentent l'humidité de l'air, diminuent l'évaporation de l'eau du sol, limitent les dommages causés aux plantes par l'action abrasive des particules de sol, réduisent l'érosion éolienne, favorisent la rétention de la neige et augmentent

l'activité des insectes pollinisateurs, ce qui se traduit généralement par une augmentation du rendement des cultures (Kort 1988; Nuberg 1998; Cleugh 1998; Brandle et al. 2004). Cependant, ces effets positifs varient largement selon le contexte climatique, les types de sols et de cultures et les choix d'aménagement des haies. La seule étude publiée et menée au Québec a mesuré des effets globaux généralement neutres de haies implantées en Montérégie sur le rendement du maïs lors d'années à pluviométrie normale ou élevée (Rivest et Vézina 2015). Selon des travaux de modélisation, il est probable que les effets microclimatiques positifs attendus des haies sur le rendement du maïs se manifestent principalement lors d'années plus sèches (Easterling et al. 1997).

Kanzler et al. (2018), dans un SAI à larges allées cultivées (48 m de largeur), ont mesuré une augmentation du rendement du blé de 16 % comparativement à un témoin sans arbre. Les auteurs ont mesuré une diminution significative de la vitesse du vent, du déficit de pression de vapeur de l'air, de la demande évaporative de l'atmosphère et de la température de l'air dans le SAI comparativement au témoin. Les bilans hydriques des sols dans les SAI peuvent aussi être améliorés par des effets directs des rangées d'arbres sur les propriétés hydrauliques du sol (e.g. augmentation du taux d'infiltration de l'eau dans les macropores et de la capacité de rétention de l'eau) (Wolz et al. 2018). La modification des propriétés physico-chimiques des sols (e.g. température, humidité, porosité, densité) et les apports de litière des arbres peuvent aussi contribuer à augmenter la qualité du sol, notamment grâce à une amélioration de l'activité, de la diversité et de la structure des communautés microbiennes, ce qui peut être favorable aux cultures, notamment pendant et après un stress hydrique (Rivest al. 2013; Nasielski et al. 2015; Beuschel et al. 2019). Néanmoins, les connaissances concernant l'impact des systèmes agroforestiers sur les communautés microbiennes du sol demeurent très limitées.

Les haies brise-vent comme les SAI sont parfois mal perçus par les producteurs agricoles en raison de la zone de concurrence arbre-culture située à la proximité des rangées d'arbres, même si cette zone n'occupe généralement qu'une très faible surface à l'échelle de la parcelle agricole (Valdivia et al. 2012). Dans cette zone à l'interface arbre-culture, l'ombrage des arbres a été présumé comme un déterminant important de la productivité de grandes cultures dans les conditions du sud du Québec et de l'Ontario (Reynolds et al. 2007; Rivest et al. 2009; Bouttier et al. 2014). La concurrence souterraine pour l'eau à proximité des arbres pourrait aussi être à craindre sous certaines conditions climatiques et édaphiques (Miller and Pallardy 2001; Rivest et al. 2009; Rivest et Vézina 2015). Cette concurrence souterraine pour l'eau peut s'accroître lors des épisodes de sécheresse (Rivest et al. 2011), mais elle peut être atténuée par la taille fréquente des racines des arbres (ou cernage racinaire) (Jose et al. 2004). Aucune étude n'a encore permis de discriminer les effets de la concurrence aérienne par rapport à ceux de la concurrence souterraine des arbres sur le rendement des cultures en SAI, dans le contexte climatique du sud du Québec. Aussi, les connaissances actuelles ne nous permettent pas de déterminer dans quelle mesure l'augmentation du stress hydrique des sols peut affecter la concurrence aérienne et souterraine des arbres sur les cultures. Or, ces connaissances aideraient à mieux planifier les nouveaux aménagements agroforestiers (e.g. choix des

espèces d'arbres, espacements à privilégier lors de la plantation) et cibler les opérations d'entretien des arbres (e.g. cernage des racines, élagages et éclaircies) à privilégier pour maîtriser en partie leur concurrence sur les cultures.

La majorité des études sur les SAI tempérés, y compris au Québec et en Ontario, ont été réalisées en testant des écartements relativement faibles entre les rangées d'arbres (8-15 m) (Jose et al. 2004; Thevathasan et al. 2012). Bien que ces SAI de «1re génération» aient permis de documenter rapidement les interactions arbre-culture, ceux-ci ne sont pas optimaux du point de vue de la productivité agricole et demeurent peu compatibles avec la machinerie agricole de grande envergure, ce qui limite grandement leur potentiel d'adoption auprès des producteurs agricoles de grandes cultures. De plus, les études sur les SAI de 1re génération dans les pays tempérés ont souvent été réalisées sur un seul site, sans témoin agricole (sans arbre) et en ne testant qu'une seule espèce d'arbre (Wolz et DeLucia 2018; Lovell et al. 2018). Le développement de SAI intégrant une diversité accrue d'arbres, inspirée de la succession naturelle des forêts, constitue une adaptation technologique dont les effets sur le microclimat, les sols et les cultures doivent être mesurés (Wolz et al. 2018). Depuis le début des années 2010, nous avons installé au Québec plusieurs sites expérimentaux et de démonstration d'envergure testant différents SAI de 2e génération (figure 1), en partenariat avec divers producteurs agricoles. Les rangées d'arbres ont été plantées à de larges écartements (35-40 m) et différents mélanges et compositions d'espèces d'arbres y sont testés.



Figure 1. Système agroforestier intercalaire de 2^e génération à larges espacements d'arbres (40 m entre les rangées), à Baie-du-Febvre (photo : Yanick Rose).

Une étude récente nous a permis de déterminer pendant 2 ans le rendement de différentes cultures (maïs, soya, blé, cultures fourragères) dans huit jeunes (3 à 7 ans) SAI de 2e génération. Les résultats ont montré, de façon générale, des rendements équivalents à ceux mesurés dans des témoins dépourvus d'arbres (Carrier et al. 2019). Des suivis de la croissance des arbres ont aussi montré un très bon succès d'établissement dans ces SAI (Rivest et al. 2019). Il est maintenant important de déterminer la rentabilité économique de ces SAI de 2^e génération dans le contexte propre aux grandes cultures. Diverses simulations réalisées dans d'autres régions tempérées (Ontario, États-Unis, Europe de l'Ouest) ont montré que, dans certains contextes, les SAI peuvent avoir une rentabilité comparable, voire supérieure, aux systèmes agricoles conventionnels, y compris sur les terres à fort potentiel agronomique (Graves et al. 2007; Toor et al. 2012; Sereke et al. 2015; Wolz et Delucia 2019).

Divers travaux antérieurs nous amènent à émettre l'hypothèse que les SAI et les haies brise-vent peuvent contribuer à augmenter la résilience des sols et des cultures face à des stress hydriques dans les sols (Easterling et al. 1997; Jones et Sudmeyer 2002; Rivest et al. 2013; Link et al. 2015; Nasielski et al. 2015; Lawson et al. 2019). Les résultats de ces travaux ont cependant été obtenus sur un nombre limité de sites dédiés à la recherche, en serre ou par des travaux de modélisation. Compte tenu du grand potentiel que présente cette hypothèse, il importe maintenant de travailler en étroite partenariat avec les producteurs agricoles, en contexte réel de production, afin de la valider. L'objectif de cette étude était de déterminer les effets d'un SAI et d'une haie brise-vent sur les conditions microclimatiques, le rendement des cultures agricoles et différentes propriétés des communautés microbiennes du sol. Cette étude a testé un traitement de cernage racinaire et un traitement de diminution artificielle de la pluie afin de mieux comprendre les interactions aériennes et souterraines en systèmes agroforestiers dans un climat en changement. Cette étude visait aussi à estimer la rentabilité du SAI expérimenté dans un contexte opérationnel propre à une région agricole de grandes cultures.

Matériels et méthodes

Sites et dispositifs expérimentaux

L'étude a été réalisée à la Ferme Bertco, à Baie-du-Febvre, dans le Centre-du-Québec. Le sol moyen des deux champs adjacents (un avec haie brise-vent et l'autre avec un SAI) où a été réalisée l'étude est un loam sablo-argileux avec un pH à l'eau de 6,5. Les deux champs sont situés sur un terrain relativement plat, dans une zone agricole à fort potentiel agronomique, mais où le couvert forestier est relativement faible (figure 2). Ainsi, les deux champs sont fortement exposés aux vents. Dans la région de l'étude, pour la période entre mai et septembre inclusivement, 23 % du temps les vents ont une force entre 6 et 7 nœuds et proviennent du nord-est (40 et 70°) et 37 % du temps, les vents les plus rapides proviennent de l'ouest (entre 220 et 330°) et ont une vitesse entre 8 et 11 nœuds (NOAA, 2018). La température moyenne annuelle (1980-2010) est de 5,3 °C et la moyenne annuelle des précipitations de 924 mm. Les données de précipitations disponibles à la

station de Nicolet (à 8 km du site d'étude), pour la période entre le 1^{er} mai et le 24 août étaient de 163 mm en 2018 et de 354 mm en 2019 (Environnement et Changement climatique Canada 2020). Pour la même période, la normale (entre 1981 et 2010) est de 341 mm. Ainsi, nous avons considéré la saison 2018 comme étant relativement sèche et la saison 2019 comme étant normale.



Figure 2. Haie brise-vent et système agroforestier intercalaire à la ferme Bertco à Baie-du-Febvre (photo : Drone Deshamps).

Les deux premiers dispositifs expérimentaux ont été implantés dans un champ de 11 ha (560 x 200 m, avec drainage souterrain) intégrant un SAI. Ce SAI a été mis en place en 2012. Il comprend quatre rangées simples d'arbres (orientation nord-ouest – sud-est) de 400 m de longueur espacés aux 40 m. La rangée la plus à l'ouest est une rangée de mélèze laricin (plantés aux 2 m sur le rang) qui fait office de brise-vent. Les trois autres rangées sont composées d'un feuillu à bois noble (érable à sucre, noyer noir, chêne rouge, chêne bicoloré, chêne à gros fruits et caryer cordiforme) à croissance modérée, planté en alternance avec un peuplier hybride (*Populus deltoides* x *nigra*) à croissance rapide. Les arbres ont été plantés selon un espacement de 5 m sur le rang (50 arbres/ha). À l'automne 2019, la hauteur moyenne des peupliers était de 12,5 m et celle des feuillus nobles de 5,5 m. Depuis leur plantation, les peupliers et les feuillus nobles ont été soigneusement entretenus par des interventions annuelles de taille et d'élagage. Le soja a été cultivé en semis direct (à entre-rangs de 38 cm) sur cette parcelle en 2018 (variété Hydra R2 à 2550 UTM, semé le 20 mai) et 2019 (variété Katonda R2 à 2775 UTM, semé le 30 mai). Le premier dispositif expérimental a permis de comparer, dans huit blocs distribués dans la portion du champ occupée par les peupliers et les feuillus nobles, quatre parcelles principales correspondant à une distance par rapport à la rangée d'arbres: 4, 12 et 20 m (centre des allées) ainsi que le témoin agricole situé à plus de 30-40 m du plus proche arbre (figure 3). Chacune des parcelles principales a été divisée en deux sous-

parcelles correspondant à deux traitements d'interception artificielle de la pluie : sans interception de la pluie (SIP) ou avec interception de la pluie (AIP) sur environ 50 % de la surface du sol dans les entre-rangs de soya (total de 64 sous-parcelles; 8 blocs x 4 distances x 2 traitements d'interception de la pluie). Le traitement AIP a été réalisé à l'aide de gouttières de 3 m de long disposées à environ 10 cm du sol et légèrement inclinées vers des fosses (30 cm) creusées dans le sol (figure 4). Dans chaque sous-parcelle, les gouttières ont été installées dans trois entre-rangs consécutifs après l'application d'herbicide en post-levée (vers la fin juin) jusqu'au début du mois de septembre. Le deuxième dispositif expérimental a été conçu de façon à diviser, dans huit blocs, deux parcelles principales correspondant à deux traitements de cernage des racines des arbres : sans cernage et avec cernage. Le cernage des racines a eu lieu en mai 2018 et 2019, avant l'implantation de la culture, à l'aide d'une sous-soleuse (50 cm de profondeur), à 2,5 m de la rangée d'arbres, sur une longueur de 30 m. Chacune de ces parcelles principales a été divisée en trois distances par rapport à la rangée d'arbres : 4, 12 et 20 m (figure 3). Chacune de ces trois distances a ensuite été divisée selon les deux traitements d'interception de la pluie décrits précédemment (total de 96 sous-parcelles; 8 blocs x 2 traitements de cernage x 3 distances x 2 traitements d'interception de la pluie).

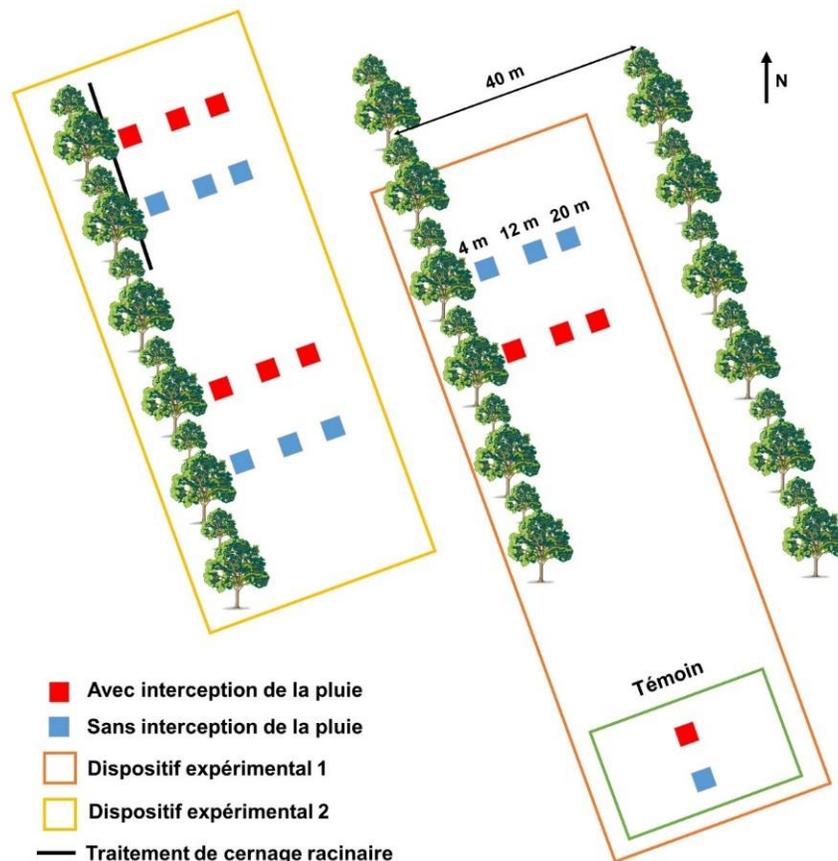


Figure 3. Plan d'un bloc des deux dispositifs expérimentaux implantés en 2018 et 2019 dans le champ avec système agroforestier intercalaire.



Figure 4. Traitement d'exclusion partielle de la pluie à l'aide de gouttières dans la culture de soya (photos : Yanick Rose).

Le troisième dispositif expérimental a été implanté dans un champ de 20 ha (800 x 250 m, avec drainage souterrain) intégrant une haie brise-vent de 800 m de longueur. La haie, plantée en 2006, est composée d'une rangée d'arbres, où le frêne d'Amérique et le mélèze laricin ont été plantés en alternance sur le rang, selon un espacement de 2,5 m. La hauteur moyenne des arbres de la haie était de 12 m au printemps 2018 et son orientation est nord-ouest – sud-est. Du maïs à ensilage a été cultivé en semis direct (à entre-rangs de 76 cm) sur cette parcelle en 2018 et 2019. Le dispositif expérimental a permis de comparer, dans quatre blocs (équivalent à un transect perpendiculaire à la haie), six parcelles principales correspondant à une distance par rapport à la haie : 0,5H, 2H, 4H, 8H, 12H et 20H, où H = hauteur de la haie. Chacune des parcelles principales a été divisée en deux sous-parcelles selon les deux traitements d'interception de la pluie décrits précédemment dans deux entre-rangs consécutifs de maïs par sous-parcelle (total de 48 sous-parcelles; 4 blocs x 6 distances x 2 traitements interception pluie). En 2019, pour des raisons logistiques liées aux besoins de la ferme, le champ intégrant la haie a été divisé en deux productions distinctes. Ainsi, les distances à 12H et 20H n'ont pas pu être échantillonnées car elles correspondaient à une surface cultivée avec une plante autre que le maïs.

Variables mesurées

Variables microclimatiques mesurées en continu

Entre le 26 juillet et le 9 septembre 2019, une caractérisation fine de la variation temporelle (mesures en continu aux 15 min) de variables microclimatiques (température du sol dans l'horizon 0-10 cm, vitesse et direction du vent, rayonnement photosynthétiquement actif) a été faite sur un nombre limité de sous-parcelles du SAI. Cette caractérisation a été faite à l'aide de centrales d'acquisition de données installées en réseau et munies de senseurs de température, d'anémomètres et de capteur de lumière (système WatchDog, Spectrum Technology Inc.).

Proportion de lumière totale transmise (PLTT)

À la fin juillet 2019, dans chaque sous-parcelle du premier dispositif du SAI, des photos hémisphériques ont été prises à 1 m du sol à l'aide d'une caméra digitale (Nikon Coolpix 995, Tokyo, Japan) équipée d'une lentille hémisphérique (Nikkor fisheye converter FC-E8). La PLTT a été estimée à l'aide du logiciel Gap Light Analyser (Frazer et al. 1999), pour la période du 15 juin au 30 septembre qui correspond à la période de forte activité photosynthétique des cultures et à un stade où la surface foliaire des arbres était stabilisée. Nous avons utilisé une localisation unique ajustée à chaque site ainsi qu'une résolution temporelle de 2 min et une résolution spatiale de 36 azimuts par 9 zéniths.

Humidité du sol

Dans chacune des sous-parcelles des trois dispositifs expérimentaux, l'humidité du sol (0-10 cm) a été estimée à trois dates, au moins 48 h après la dernière pluie, à l'aide d'un humidimètre (FieldScout TDR100, Spectrum Technologie, Inc., Aurora, IL, USA). Afin de tenir compte de la variabilité spatiale, l'humidité du sol a été mesurée à trois points dans chaque sous-parcelle et la moyenne issue de ces trois valeurs a été conservée pour les analyses statistiques.

Production agricole

Dans chacune des sous-parcelles des deux dispositifs expérimentaux du SAI, les plants de soya ont été récoltés manuellement à la maturité du soya (23 septembre 2018 et 9 octobre 2019) dans des parcelles de 1,52 m² (2 m x 0,76 m). Le rendement en grains du soya et le poids de 100 grains ont ensuite été déterminés en laboratoire après nettoyage et séchage des grains (48 h à 60 °C). Le rendement dans les allées cultivées a été estimé en pondérant les moyennes de chaque distance selon leur aire relative dans une allée (4 m = 25%, 12 m = 50%, 20 m = 25%). Dans chacune des sous-parcelles du dispositif expérimental dans le champ avec haie brise-vent, les épis de maïs ont été récoltés manuellement quelques jours avant la récolte pour l'ensilage (2 octobre 2018 et 13 octobre 2019) dans des parcelles de 1,52 m² (2 m x 0,76 m). Le rendement en grains du maïs et le poids de 100 grains ont été évalués après nettoyage et séchage des grains (48 h à 60 °C).

Propriétés des communautés microbiennes du sol

Dans chacune des sous-parcelles des deux dispositifs expérimentaux du SAI, 8 carottes (7 cm diam., 0-15 cm profondeur) ont été prélevées le 4 septembre 2019. Les carottes ont été mélangées au champ afin de produire un échantillon composite. Les échantillons ont été congelés en attendant les analyses de laboratoire. Une extraction des acides gras phospholipidiques (PLFA) a été réalisée selon la méthode décrite dans Hamel et al. (2006). La méthode d'analyse des PLFA peut fournir une empreinte globale des communautés microbiennes trouvées dans les sols et a été largement utilisée pour caractériser la structure des communautés microbiennes trouvées dans un large éventail d'agroécosystèmes et de régions agronomiques (Frostegard et al. 2011). L'extraction et le dosage des PLFA, réalisés dans les laboratoires Ward inc. (Kearney, NE, États-Unis), ont permis d'estimer la biomasse active de différents groupes d'organismes du sol (bactéries

totales, bactéries Gram (+) qui comprend les actinomycètes, bactéries Gram (-) qui comprend les rhizobiums, champignons totaux et champignons mycorhiziens arbusculaires) ainsi que différents ratios (champignons totaux/bactéries totales, Gram (+)/Gram(-)) qui permettent d'apprécier la composition des communautés microbiennes.

Analyses statistiques

Les effets de la distance de la rangée d'arbre (dispositifs 1, 2 et 3), de l'interception de la pluie (dispositifs 1, 2 et 3), du cernage racinaire (dispositif 2) et des interactions entre ces facteurs à effets fixes sur les variables mesurées ont été analysés par des modèles linéaires généralisés d'ANOVA. Suite à un effet significatif d'un facteur fixe ou d'une interaction entre facteurs fixes, un test de Tukey a été réalisé afin de comparer les moyennes. Un seuil alpha de significativité de 5 % a été fixé pour chacune des analyses. Les analyses ont été réalisées à l'aide du logiciel statistique JMP (version 15.2.1, SAS Institute Inc, Cary, NC).

Analyse économique

La rentabilité du SAI à l'étude a été estimée à l'aide de la méthode du budget partiel. À partir de données accumulées par les experts de ce projet et d'informations retrouvées dans la littérature, nous avons déterminé l'ensemble des coûts (plantation, protection contre la faune, maîtrise de la végétation dans la bande non cultivée, taille et élagage des arbres les 10 premières années, perte d'espace cultivable de 3,75 %) et des bénéfices privés (revenus annuels de la culture agricole, revenus de la récolte des peupliers hybrides, 15 ans après plantation, et des feuillus nobles, 40 ans après plantations) pour le SAI (nommé SAI de base) et le système agricole de référence sur une période de 40 ans (2020 à 2059). Afin de simplifier les analyses, le chêne rouge (vitesse de croissance et valeur économique intermédiaire) a été utilisé comme feuillu noble modèle dans le SAI plutôt que de considérer l'ensemble des six espèces de feuillus nobles plantées dans le SAI expérimental. En utilisant les équations de Perron (1986), le volume marchand de bois a été calculé en fonction du diamètre à la hauteur de poitrine (1,3 m) et de la hauteur totale anticipés des peupliers (45 cm et 20 m) et du chêne rouge (40 cm et 20 m) lors de leur récolte. À partir des observations faites sur le site d'étude, nous avons émis l'hypothèse réaliste que 50 % du bois récolté sera destiné au sciage et 50 % à la pâte. Les prix du bois ont été fixés après une analyse des prix actuels affichés par le Syndicat des Producteurs forestiers du Sud du Québec pour le sciage et la pâte: 140 \$/m³ et 40 \$/m³ pour le chêne rouge; 60\$/m³ et 30 \$/m³ pour le peuplier. Les revenus nets du bois ont été calculés en multipliant le prix du bois par le volume produit et par un facteur de 0,35 pour tenir compte des frais d'exploitation. La rotation des cultures adoptée à la ferme Bertco, représentative d'une ferme en production laitière et de grandes cultures a été considérée dans l'analyse économique : culture fourragère à base de luzerne pendant 4 ans – maïs fourrager – soya – blé. Les résultats de cette étude et ceux de nos travaux antérieurs (Carrier et al. 2019) indiquent que les rendements dans les allées du SAI ont été soit équivalents à ceux dans le témoin agricole, soit légèrement supérieurs lors d'années plus sèches (comme en 2018). Avec la coupe des peupliers à 15 ans, diminuant la densité de plantation de 50 à 25 arbres/ha, nous anticipons que des rendements

similaires à ceux dans le témoin agricole pourront être maintenus dans le SAI jusqu'à la récolte finale des feuillus nobles. Ainsi, nous avons comparé un scénario de base où les rendements dans les allées du SAI sont équivalents à ceux dans le système agricole conventionnel à deux scénarios où les rendements dans les allées du SAI seraient accrus de 5 ou 10 %, une année sur trois. Les revenus et les coûts (perte d'espace cultivable dans le SAI) générés par les cultures agricoles ont été comptabilisés en utilisant la valeur de la marge sur les coûts variables pour chacune des cultures (CRAAQ 2018a, 2018b, 2018c, 2018d). Nous avons aussi tenté d'estimer les revenus supplémentaires que pourrait apporter des paiements, à tous les 5 ans suite à la plantation, associés à la séquestration de carbone dans la biomasse des arbres dans le SAI de base. Nous avons considéré des paiements proportionnels au taux de carbone accumulé pendant chaque période quinquennale. Un prix de 50 \$/tonne CO₂e⁻¹ a été utilisé dans les calculs (Macneil 2020). L'évolution temporelle du taux de séquestration de C dans les parties aériennes des arbres a été estimée à l'aide du calculateur de biomasse des arbres développé par Ressources naturelles Canada. La séquestration du carbone dans les racines des arbres a été estimée en considérant des ratios parties aériennes/parties souterraines de 3,08 pour le chêne rouge et de 5,42 pour le peuplier (Winans et al. 2016). Des concentrations en carbone 50 % et 57 % ont été considérées pour les parties aériennes et souterraines des arbres, respectivement (Pipatti et al. 2006). Les poids de carbone ont été convertis en équivalent CO₂ en les multipliant par un facteur de 3,67. Par ailleurs, nous avons estimé l'impact d'un soutien financier pour la plantation des arbres, leur protection contre la faune et leur entretien (maîtrise de la végétation dans la bande non cultivée, taille et élagage des arbres) sur la valeur économique du SAI de base. Nous avons considéré un appui financier de 70 % des coûts d'implantation et d'entretien, tel qu'adopté dans le programme Prime-Vert du MAPAQ concernant l'appui aux aménagements agroenvironnementaux durables intégrant des arbres et des arbustes ou étant favorables à la biodiversité (intervention 4300).

Lorsque l'on compare des coûts et bénéfices survenant au cours d'années différentes, il importe de les convertir en valeur actuelle nette (VAN). La VAN permet de traduire les bénéfices et coûts futurs en bénéfices et coûts actuels. La VAN a été calculée à l'aide de la formule suivante :

$$VAN = \sum_{n=0}^n R_n (1 + i)^{-n} - C_n (1 + i)^{-n}$$

Où R_n : revenus nets ; C_n : coûts nets ; i : taux d'actualisation ; et n : nombre d'années depuis l'année 0, correspondant à une période donnée.

Les analyses économiques ont été réalisées en comparant trois taux d'actualisation : 2 %, 4 % et 6 %.

Résultats et discussion

Conditions microclimatiques dans le SAI

De façon générale, la vitesse du vent dans le SAI à 4, 12 et 20 m de la rangée d'arbres était inférieure à celle dans le témoin (figure 5) pendant la saison de croissance en 2019, où les mesures microclimatiques en continu ont été réalisées. Les plus fortes réductions de la vitesse du vent ont été observées à 20 m de la rangée d'arbres et la dynamique de la direction des vents dans le SAI différait de celle dans le témoin (figure 6). Une étude récente en Allemagne a démontré le rôle positif que peut jouer la réduction de la vitesse du vent en SAI sur l'amélioration des rendements agricoles, notamment en diminuant le déficit de pression de vapeur de l'air et la demande évaporative de l'atmosphère (Kanzler et al. 2018). Dans une certaine mesure, ces effets peuvent s'apparenter à ceux qui ont été plus abondamment observés dans les systèmes avec haie brise-vent (Cleugh 1998). Une légère réduction de la température du sol en surface (0-10 cm) dans le SAI, de l'ordre de 1 à 2 °C selon les journées, a aussi été observée comparativement au témoin (figure 7). Des réductions similaires de température du sol ont été observées dans un autre SAI au Québec, mais avec des espacements d'arbres plus élevés (Cuellar et al. 2017). Même si cette réduction de température du sol dans le SAI apparaît légère, elle peut avoir des implications positives pour les cultures en diminuant leur stress thermique lors de canicules (Lawson et al. 2019) et pour la réduction des émissions de GES par les sols (Amadi et al. 2016; Cuellar et al. 2017).

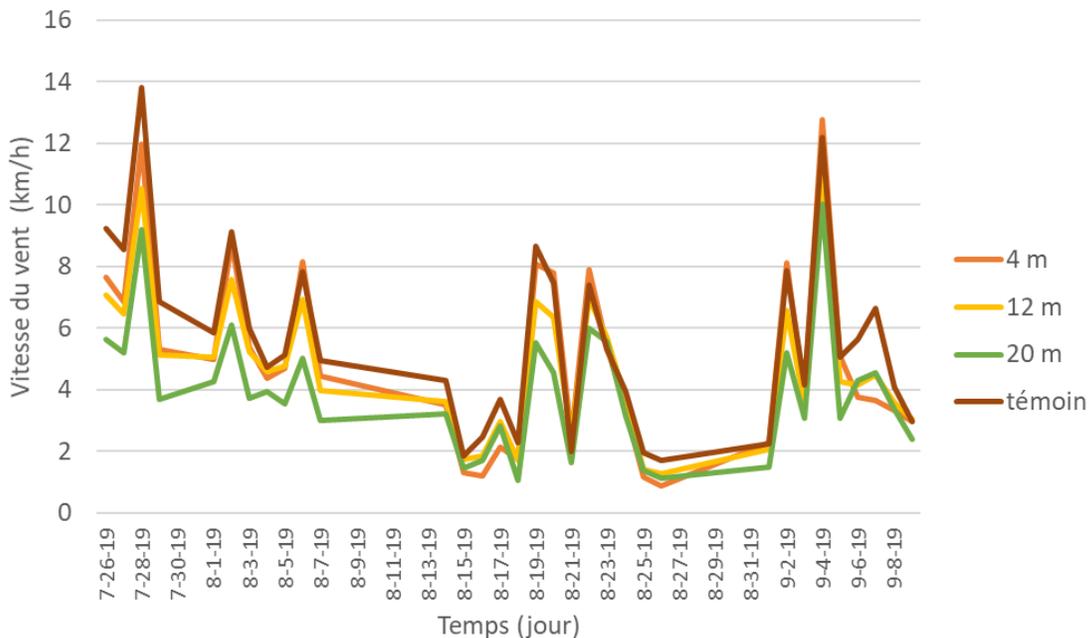


Figure 5. Variation de la moyenne journalière de la vitesse du vent entre le 26 juillet et le 9 septembre 2019 à différentes distances de la rangée d'arbres dans le système agroforestier intercalaire et dans le témoin agricole.

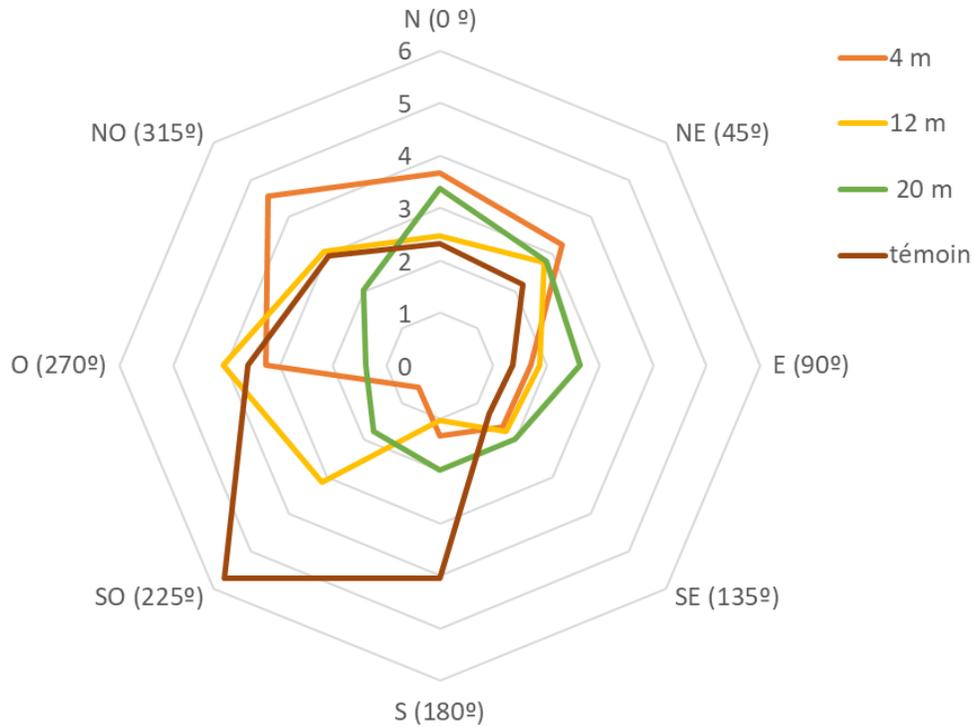


Figure 6. Variation de la direction des vents entre le 26 juillet et le 9 septembre 2019 selon l'intensité de la moyenne journalière de la vitesse du vent (0 à 6 km/h) à différentes distances de la rangée d'arbres dans le système agroforestier intercalaire (orientation NE-SO des rangées d'arbres) et dans le témoin agricole.

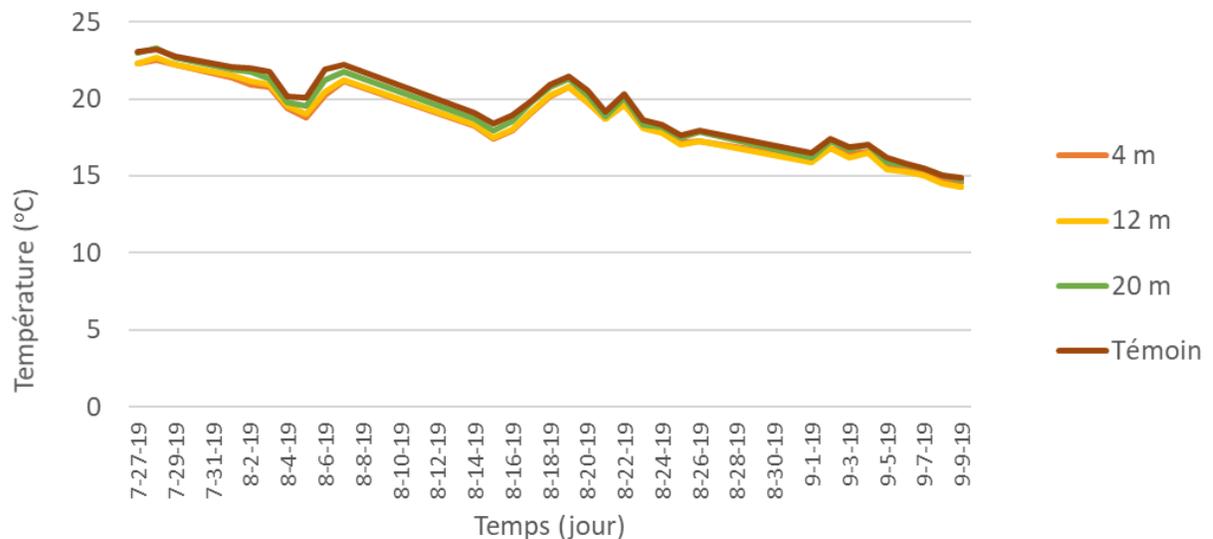


Figure 7. Variation de la moyenne journalière de la température du sol entre le 26 juillet et le 9 septembre 2019 à différentes distances de la rangée d'arbres dans le système agroforestier intercalaire et dans le témoin agricole.

La variation journalière du rayonnement photosynthétiquement actif (RPA) à 12 et 20 m de la rangée d'arbres était similaire à celle dans le témoin agricole avec des pics atteints vers 14 h (figure 8). Entre 10h et 16h, le RPA à 4 m de la rangée d'arbres était nettement inférieur à celui mesuré aux autres distances, avec une baisse plus marquée vers 14h. Le RPA journalier moyen à 4 m était de l'ordre de 26 % inférieur à celui dans le témoin.

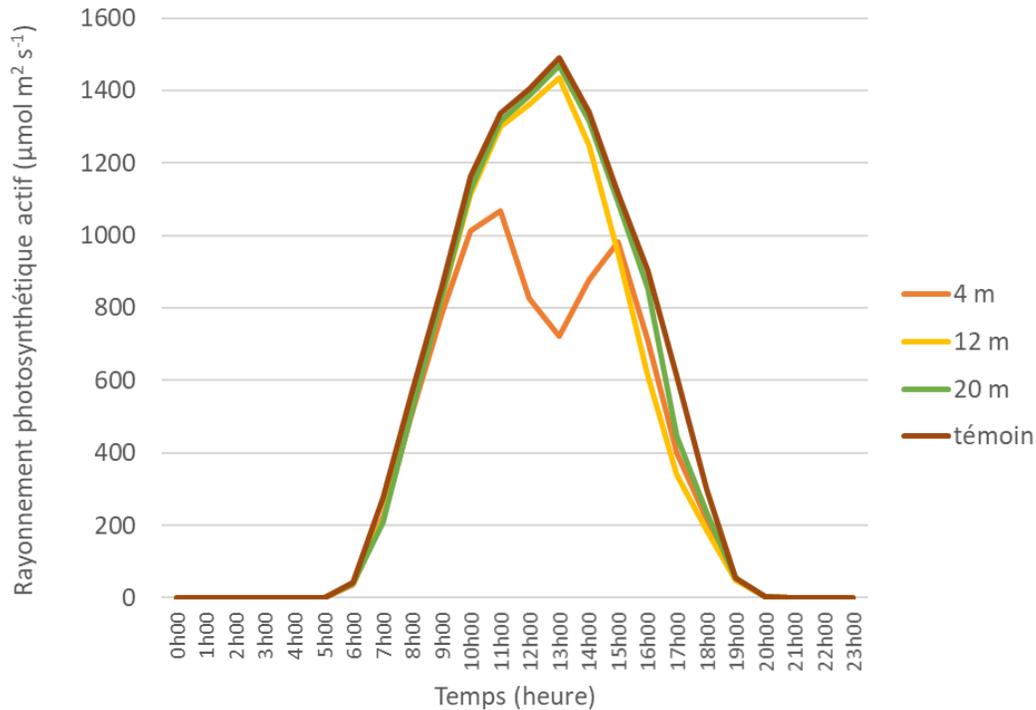


Figure 8. Variation de la moyenne journalière du rayonnement photosynthétiquement actif entre le 26 juillet et le 9 septembre 2019 à différentes distances de la rangée d'arbres dans le système agroforestier intercalaire et dans le témoin agricole.

La proportion de lumière totale transmise mesurée en 2019 à l'aide de photos hémisphériques était la plus élevée à 12 et 20 m de la rangée d'arbres et dans le témoin et la plus faible à 4 m de la rangée d'arbres, avec une diminution d'environ 12 % par rapport au témoin (tableaux 1 et 2). Les résultats de nos deux approches d'analyse de la disponibilité de la lumière suggèrent ainsi que celle-ci a pu être un facteur déterminant pour le rendement du soja, mais surtout dans la zone à proximité de la rangée d'arbres.

Lors de l'une des trois dates d'échantillonnage (13 août 2019, dispositif 1 et 2), l'humidité du sol mesurée en surface à l'aide d'une sonde TDR dans le traitement avec interception de la pluie (AIP) était significativement inférieure à celle dans le traitement sans interception de la pluie (SIP) (tableau 1 et 2). Une tendance similaire ($P= 0,053$) a été mesurée dans le dispositif 1 le 24 juillet 2019. Ces résultats, combinés à ceux concernant les rendements présentés plus bas, suggèrent que l'approche d'exclusion artificielle de la pluie développée à faible coût dans cette étude s'est avérée efficace pour simuler expérimentalement au champs, dans un nombre important de parcelles, un stress

Tableau 1. Valeurs de P de l'ANOVA pour les effets de la distance par rapport à la rangée d'arbres, du traitement d'interception de la pluie et du traitement de cernage des racines des arbres sur le rendement du soya, le poids de 100 grains, la proportion de lumière totale transmise (PLTT) et l'humidité du sol dans deux dispositifs expérimentaux implantés dans le système agroforestier intercalaire en 2018 et 2019.

		Rendement	Poids 100 grains	PLTT	Humidité sol (31/08)	Humidité sol (24/07)	Humidité sol (13/08)
Dispositif 1	2018						
	Distance (D)	0,0012	0,4806		0,0197		
	Interception (I)	0,0002	0,0027		0,1527		
	D x I	0,5593	0,9954		0,1589		
	2019						
	Distance (D)	0,2823	0,0030	<,0001		0,0062	0,0322
	Interception (I)	0,0044	0,0014	0,9826		0,0533	0,0004
	D x I	0,9577	0,5812	0,9977		0,9131	0,2760
	Dispositif 2	2018					
Distance (D)		0,0007	0,9088		0,6768		
Interception (I)		0,0040	0,0396		0,4661		
Cernage (C)		0,0011	0,0998		0,0714		
D x I		0,3460	0,8489		0,2458		
D x C		0,0044	0,0142		0,2493		
I x C		0,0544	0,7699		0,0479		
D x I x C		0,8620	0,8940		0,1905		
2019							
Distance (D)		0,2127	0,0014			0,1281	0,6842
Interception (I)		0,0006	0,0025			0,4981	0,0001
Cernage (C)		0,0055	0,8849			0,2442	0,5131
D x I		0,4170	0,8599			0,9256	0,6671
D x C		0,1673	0,5724			0,3255	0,8652
I x C		0,5310	0,3911			0,6697	0,8024
D x I x C	0,9863	0,3527			0,7912	0,9844	

Tableau 2. Effets de la distance par rapport à la rangée d'arbres et du traitement d'interception de la pluie (dispositif 1) sur le rendement du soya, le poids de 100 grains, la proportion de lumière totale transmise (PLTT) et l'humidité du sol dans le système agroforestier intercalaire en 2018 et 2019.

	Sans interception de la pluie				Avec interception de la pluie			
	4 m	12 m	20 m	Témoin	4 m	12 m	20 m	Témoin
2018								
Rendement (g/m ²)	281 (53) b	370 (22) a	377 (49) a	279 (84) ab	212 (29) b	313 (47) a	319 (38) a	302 (49) ab
Poids 100 grains (g)	16,6 (0,6)	17,2 (1,0)	17,2 (0,7)	16,0 (0,6)	15,9 (1,2)	16,5 (1,3)	16,3 (0,6)	16,8 (0,5)
Humidité sol (31/08) (%)	15,2 (1,9) ab	14,9 (2,2) b	17,7 (1,4) ab	17,8 (2,8) a	17,8 (2,7) ab	16,9 (2,2) b	16,8 (2,7) ab	19,5 (3,9) a
2019								
Rendement (g/m ²)	229 (34)	265 (42)	274 (37)	265 (39)	186 (73)	226 (31)	229 (45)	231 (48)
Poids 100 grains (g)	16,1 (0,5) a	15,4 (0,7) bc	15,0 (0,5) c	15,9 (0,4) ab	15,1 (0,8) a	14,5 (0,7) bc	14,6 (0,6) c	15,1 (0,3) ab
PLTT	88,03 (0,50) b	98,4 (0,60) a	99,52 (0,20) a	99,96 (0,03) a				
Humidité sol (24/07) (%)	20,4 (1,4) b	21,7 (1,0) b	22,6 (2,0) ab	26,1 (3,4) a	19,2 (2,6) b	20,6 (3,5) b	21,4 (3,6) ab	23,7 (4,7) a
Humidité sol (13/08) (%)	16,8 (3,6) b	16,9 (3,3) ab	17,6 (3,5) ab	18,2 (4,1) a	13,1 (3,3) b	13,3 (2,9) ab	13,1 (1,6) ab	16,3 (4,5) a

Les valeurs entre parenthèses indiquent l'écart-type. Pour chacun des deux traitements d'interception de la pluie, les moyennes avec des lettres différentes sont significativement différentes à $P < 0,05$ (test de Tukey).

Tableau 3. Effets de la distance par rapport à la rangée d'arbres, du traitement d'interception de la pluie et du cernage racinaire (dispositif 2) sur le rendement du soya, le poids de 100 grain et l'humidité du sol dans le système agroforestier intercalaire en 2018 et 2019.

	Sans cernage des racines						Avec cernage des racines					
	Sans interception de la pluie			Avec interception de la pluie			Sans interception de la pluie			Avec interception de la pluie		
	4 m	12 m	20 m	4 m	12 m	20 m	4 m	12 m	20 m	4 m	12 m	20 m
2018												
Rendement (g/m ²)	278 (56) b	378 (30) a	380 (49) a	212 (29) b	310 (45) a	330 (46) a	260 (53) a	278 (43) a	311 (36) a	222 (32) a	256 (40) a	304 (56) a
Poids 100 grains (g)	16,7 (0,6) a	17,2 (0,9) a	17,1 (0,6) a	15,9 (1,2) a	16,3 (1,3) a	16,4 (0,6) a	16,7 (1,3) a	16,2 (1,1) a	16,0 (1,0) a	16,2 (1,4) a	15,4 (1,7) a	15,6 (1,6) a
Humidité sol (31/08) (%)	15,2 (1,9)	15,1 (2,1)	17,6 (1,3)	17,9 (2,7)	18,3 (3,5)	16,4 (3,5)	16,1 (4,1)	15,5 (1,7)	16,1 (2,4)	16,2 (4,1)	15,0 (2,1)	14,6 (2,5)
2019												
Rendement (g/m ²)	230 (34)	253 (50)	274 (34)	186 (73)	227 (21)	232 (42)	203 (57)	185 (60)	225 (67)	169 (48)	142 (35)	169 (41)
Poids 100 grains (g)	16,1 (0,5) a	15,3 (0,7) b	15,1 (0,5) b	15,1 (0,8) a	14,9 (1,1) b	14,8 (0,7) b	16,2 (1,0) a	15,2 (1,0) b	15,7 (0,8) b	15,6 (0,8) a	14,4 (1,1) b	14,4 (1,2) b
Humidité sol (24/07) (%)	20,4 (1,4)	21,2 (1,5)	22,9 (2,1)	19,2 (2,6)	21,2 (3,1)	21,3 (3,6)	21,4 (3,1)	23,2 (4,3)	22,6 (3,3)	21,2 (3,2)	22,3 (4,2)	21,8 (6,4)
Humidité sol (13/08) (%)	16,8 (3,6)	17,5 (3,4)	17,8 (3,3)	13,1 (3,3)	13,6 (3,0)	13,2 (1,8)	17,3 (2,1)	19,1 (2,4)	18,1 (2,5)	17,9 (1,9)	14,6 (2,3)	13,8 (4,5)

Les valeurs entre parenthèses indiquent l'écart-type. Pour chacune des combinaisons de traitements de cernage des racines et d'interception de la pluie, les moyennes avec des lettres différentes sont significativement différentes à $P < 0,05$ (test de Tukey).

hydrique modéré de longue durée. Dans le dispositif 1, aux trois dates d'échantillonnage, indépendamment du traitement d'interception de la pluie, l'humidité du sol variait significativement en fonction de la distance par rapport à la rangée d'arbres. Le 31 août 2018, l'humidité du sol à 12 m était inférieure à celle dans le témoin agricole. Le 24 juillet et le 13 août 2019, l'humidité du sol à 4 m était inférieure à celle dans le témoin. L'humidité du sol le 31 août 2018 a été affectée par une interaction significative entre le traitement de cernage et celui d'interception de la pluie. Par contre, le test de comparaison multiple des moyennes de Tukey n'a révélé aucune différence significative entre les quatre combinaisons de traitements. Outre cette interaction, le cernage n'a eu aucun effet significatif sur l'humidité du sol.

Rendement du soya dans le SAI

En 2018 et 2019, dans les deux dispositifs, le rendement du soya et le poids de 100 grains dans le traitement SIP était supérieur à celui dans le traitement AIP (tableaux 1, 2 et 3). En 2018, indépendamment du traitement d'interception de la pluie, le rendement à 4 m de la rangée d'arbres (247 g/m²) était inférieur à celui à 12 m (342 g/m²) et 20 m (348 g/m²), mais ne différait pas de celui dans le témoin (291 g/m²). Ces résultats suggèrent deux zones distinctes dans les allées du SAI en 2018, qui a été marquée par un printemps et un été relativement secs. La première zone (~25% de l'allée) était située à l'interface arbre-culture avec un effet net relativement neutre de la rangée d'arbres (i.e. ni compétition ni facilitation). La deuxième zone (~75% de l'allée) correspondait à une large zone avec un effet net positif (i.e. facilitation) de la rangée d'arbres qui était possiblement attribuable à une amélioration des conditions microclimatiques et à une diminution du stress hydrique du soya. Le rendement différait aussi significativement selon une interaction entre la distance et le traitement de cernage et selon une interaction entre le traitement d'interception de la pluie et le traitement de cernage (tableau 1). Sans cernage, le rendement à 4 m (245 g/m²) était inférieur à celui à 12 m (344 g/m²) et 20 m (355 g/m²) (tableau 3). Avec cernage, le rendement près des arbres, à 4 m, ne différait pas de celui à 12 et 20 m. À 12 m, le rendement sans cernage (344 g/m²) était supérieur à celui avec cernage (267 g/m²). De plus, indépendamment de la distance, le rendement dans le traitement sans cernage était supérieur à celui dans le traitement avec cernage, mais seulement sans l'interception de la pluie. Ces résultats suggèrent un effet négatif du cernage racinaire sur le rendement du soya en 2018, ce qui est contraire à notre prédiction initiale et à ce que d'autres chercheurs ont observé dans des conditions de limitation en eau (Miller et Pallardy 2001). Il est possible que le traitement de cernage racinaire ait eu des impacts négatifs sur les propriétés biochimiques du sol. Par exemple, certains auteurs ont observé qu'un cernage racinaire sévère de peupliers s'est traduit par une diminution à court terme de l'activité et de la biomasse microbienne ainsi que de la disponibilité de l'azote, du phosphore et du potassium dans le sol (Jing et al. 2017). Aux États-Unis, dans un SAI avec pacanier, Allen et al. (2005) ont observé une réduction significative de la minéralisation de l'azote du sol suite à un cernage des arbres. Les auteurs ont argué que cette diminution de minéralisation de l'azote dans le traitement de cernage des arbres a pu être causé par une augmentation de l'immobilisation en N suite à la mort d'une biomasse racinaire importante et passablement récalcitrante.

En 2019, une année normale sur le plan des précipitations, le rendement aux trois distances dans le SAI ne différait pas de celui dans le témoin (tableau 2). Le poids de 100 grains à 4 m était supérieur à celui à 12 et 20 m, mais ne différait pas de celui dans le témoin. Dans une autre étude, nous avons observé un phénomène similaire de compensation du rendement du soya en conditions d'ombrage modéré en SAI par une augmentation du poids des grains (Rivest et al. 2009). Indépendamment de la distance et du traitement d'interception de la pluie, le rendement dans le traitement sans cernage (234 g/m²) était supérieur à celui dans le traitement avec cernage (182 g/m²) (tableau 3). Ainsi, l'effet négatif du cernage sur le rendement observé en 2018 a été maintenu en 2019.

En 2018, indépendamment du traitement d'interception de la pluie, le rendement dans les allées cultivées du SAI (moyenne pondérée) était supérieur de 18,5% à celui dans le système agricole témoin (tableau 5). Cette tendance n'était toutefois pas statistiquement significative (tableau 4), possiblement en raison d'un nombre limité de données. En 2019, le rendement moyen dans l'allée était équivalent à celui dans le témoin agricole. Indépendamment des deux systèmes de production comparés, le traitement AIP a significativement réduit le rendement du soya de 14 %, autant en 2018 que 2019. Contrairement à ce que nous avons prédit, l'écart de rendement du soya entre le traitement AIP et le traitement SIP dans le SAI ne différait pas de l'écart mesuré dans le témoin agricole (ce qui aurait correspondu à une interaction significative D x I au tableau 1 ou S x I au tableau 4). Autrement dit, l'expérience d'exclusion artificielle de la pluie n'a pas confirmé, ni en 2018 ni 2019, notre hypothèse que le SAI accentue la résilience des cultures face à une réduction de la disponibilité de l'eau. Par contre, l'importante variation interannuelle des précipitations entre 2018 (printemps et été secs) et 2019 (précipitations normales) a confirmé indirectement cette hypothèse. En effet, des augmentations de rendements ont été observées dans le SAI (12 et 20 m), mais seulement lors de la saison la plus sèche, en 2018. Ce résultat suggère que les effets microclimatiques positifs attendus des SAI sur les cultures se manifestent avec une magnitude accrue lors d'années plus sèches. Cette hypothèse a été confirmée dans d'autres systèmes agroforestiers et contextes climatiques (Thaler et al. 2012; Arenas-Corraliza et al. 2018).

Tableau 4. Valeurs de P de l'ANOVA pour les effets du système de production (système agroforestier intercalairel vs système agricole conventionnel) et du traitement d'interception de la pluie sur le rendement du soya en 2018 et 2019.

2018	
Système (S)	0,1311
Interception (I)	0,0089
S x I	0,5691
2019	
Distance (S)	0,6043
Interception (I)	0,0047
S x I	0,6521

Tableau 5. Effets du système agroforestier intercalaire (SAI) et du traitement d'interception de la pluie sur la moyenne pondérée du rendement du soya (g/m^2) dans les allées.

		Sans interception de la pluie	Avec interception de la pluie
2018	SAI	349 (11)	295 (17)
	Témoin agricole	302 (49)	265 (79)
2019	SAI	258 (19)	221 (17)
	Témoin agricole	265 (38)	231 (48)

Les valeurs entre parenthèses indiquent l'écart-type.

Rendement du maïs dans la parcelle avec haie brise-vent

En 2018 et 2019, l'humidité du sol en surface variait significativement selon la distance de la culture par rapport à la haie brise-vent (tableaux 6 et 7). Indépendamment du traitement d'interception de la pluie, l'humidité du sol était la plus élevée à la distance la plus rapprochée de la haie (0,5H). Ce résultat diffère de celui observé dans le SAI où l'humidité du sol était généralement la plus faible à la distance la proche de la rangée d'arbres. Il faut souligner que les espacements entre les arbres sur la rangée et la porosité étaient nettement plus faibles dans la haie brise-vent, comparativement aux rangées d'arbres feuillus dans le SAI. Ainsi, un ombrage important à 0,5H de la haie a possiblement contribué à réduire la température de l'air et l'évaporation de l'eau par les sols (Cleugh 1998). À toutes les dates d'échantillonnage, l'humidité du sol dans le traitement SIP était supérieure à celle dans le traitement AIP. En 2018, le rendement en grains du maïs à ensilage à 0,5H et 4H était inférieur à celui à 8H et 12H. En considérant les résultats d'humidité du sol, il est probable que la réduction du rendement à 0,5H soit principalement attribuable à la concurrence de la haie pour la lumière. En 2019, le rendement en grains du maïs ne différait pas selon la distance par rapport à la haie. Indépendamment de la distance, le rendement dans le traitement SIP (606 g/m^2) était supérieur de 12 % à celui dans le traitement AIP (540 g/m^2), ce qui représente un écart comparable à ceux mesurés dans le SAI.

Nos résultats suggèrent une certaine inconstance dans la variation spatiale et interannuelle du rendement du maïs dans la zone de protection des cultures selon la distance par rapport à la haie. En fait, la variation du rendement, notamment avec un creux à 4H en 2018, ne reflète pas bien la distribution attendue de la zone de protection contre les vents qui est généralement maximale entre 2H et 12H pour des brise-vent à porosité intermédiaire (~50%) comme celui de cette étude (Cleugh 1998). Une variation inconstante du rendement en grains de maïs selon la distance par rapport à la haie a aussi été observée sur d'autres sites dans les régions de la Montérégie et du Lac St-jean (Rivest et Vézina 2015). Il est possible que l'effet accru de protection attendue de la haie sur le rendement du maïs, sur l'ensemble de la zone située entre 2H et 12H, ait été masqué par une certaine hétérogénéité spatiale des propriétés du sol (e.g. texture) dans le champ sous étude. Cet effet confondant de l'hétérogénéité spatiale propriétés du sol a pu être accentué en 2018 par des conditions de faible disponibilité de l'eau.

Tableau 6. Valeurs de P de l'ANOVA pour les effets de la distance par rapport à la haie brise-vent et du traitement d'interception de la pluie sur le rendement en grains du maïs à ensilage, le poids de 100 grains et l'humidité du sol en 2018 et en 2019.

	Rendement	Poids 100 grains	Humidité sol (31/08)	Humidité sol (4/08)	Humidité sol (24/08)
2018					
Distance (D)	0,0009	0,0880	0,0081		
Interception (I)	0,7071	0,8056	0,0122		
D x I	0,4312	0,3770	0,5438		
2019					
Distance (D)	0,2906	0,1756		0,0004	0,1355
Interception (I)	0,0312	0,2627		0,0472	0,0449
D x I	0,1176	0,5581		0,0905	0,3199

Tableau 7. Effets de la distance par rapport à la haie brise-vent et du traitement d'interception de la pluie sur le rendement en grains du maïs à ensilage, le poids de 100 grains et l'humidité du sol en 2018 et en 2019.

	Sans interception de la pluie						Avec interception de la pluie					
	0,5H	2H	4H	8H	12H	20H	0,5H	2H	4H	8H	12H	20H
2018												
Rendement (g/m ²)	471 (42) b	541 (70) ab	370 (258) b	556 (58) a	696 (47) a	541 (60) ab	378 (40) b	541 (98) ab	446 (99) b	630 (39) a	601 (65) a	524 (109) ab
Poids 100 grains (g)	26,0 (2,3)	28,6 (1,4)	27,7 (0,8)	28,0 (1,7)	28,2 (2,82)	24,1 (1,6)	25,0 (2,4)	28,9 (4,7)	26,4 (3,3)	27,7 (1,4)	26,8 (0,7)	26,6 (0,9)
Humidité sol (31/08) (%)	21,1 (2,1) a	17,0 (2,1) b	16,3 (1,2) b	16,8 (1,0) ab			17,1 (2,8) a	15,5 (2,7) b	14,4 (0,8) b	16,8 (2,1) ab		
2019												
Rendement (g/m ²)	708 (123)	615 (200)	601 (405)	498 (236)			522 (30)	540 (122)	575 (41)	523 (164)		
Poids 100 grains (g)	16,7 (1,2)	19,4 (0,6)	18,2 (0,5)	17,0 (2,0)			15,6 (1,6)	17,6 (2,0)	17,2 (1,2)	16,4 (2,3)		
Humidité sol (04/08) (%)	15,4 (1,9) a	14,0 (2,5) ab	11,0 (0,7) bc	10,8 (1,5) c			12,5 (0,7) a	11,0 (1,3) ab	11,4 (1,0) bc	9,4 (1,3) c		
Humidité sol (24/08) (%)	18,2 (0,8)	16,8 (2,2)	15,0 (1,7)	14,1 (2,0)			14,2 (2,5)	13,9 (3,2)	13,3 (1,2)	12,1 (1,4)		

Les valeurs entre parenthèses indiquent l'écart-type. Pour chacun des deux traitements d'interception de la pluie, les moyennes avec des lettres différentes sont significativement différentes à P<0,05 (test de Tukey). H=hauteur de la haie brise-vent.

Propriétés des communautés microbiennes du sol dans le SAI

En 2019, dans le dispositif 1, aucun effet significatif de la distance et du traitement d'interception de la pluie n'a été mesuré sur les différentes propriétés des communautés microbiennes du sol (tableaux 8 et 9). Néanmoins, il faut noter que la biomasse totale des communautés de bactéries et la biomasse des bactéries Gram (-) (un groupe fonctionnel associé à l'utilisation de sources de carbone facilement disponibles) dans le témoin tendaient à être supérieures à celles à 4, 12 et 20 m de la rangée d'arbres dans le SAI ($P < 0,06$). Dans les témoins agricoles, les apports de matière organique fraîche proviennent principalement des résidus de cultures alors que ceux dans le SAI intègrent aussi des litières et des racines fines mortes des arbres qui ont une plus faible qualité que celle des résidus de cultures. Or, la matière organique fraîche de qualité élevée est reconnue pour faciliter la croissance des bactéries, en particulier les bactéries Gram (-) (Bastian et al. 2009).

Dans le dispositif 2, la biomasse de bactéries Gram (+) (un groupe fonctionnel associé à l'utilisation de sources de carbone récalcitrantes) dans le traitement avec cernage (1087 ng/g) était supérieure à celle (807 ng/g) dans le traitement sans cernage (tableaux 8 et 10). Des tendances similaires ($P < 0,1$) ont été observées pour la biomasse microbienne totale et la biomasse bactérienne totale. Ces résultats appuient notre hypothèse que le cernage des racines des arbres peut avoir accentué l'immobilisation de l'azote suite à la mise en disponibilité pour la décomposition d'une forte quantité de matière organique fraîche relativement récalcitrante. La biomasse de bactéries Gram (+) variait quant à elle significativement selon une interaction entre le traitement d'interception de la pluie et la distance. Bien que la biomasse de bactéries Gram (+) à 20 m dans le traitement SIP tendait à être supérieure à celle dans le traitement AIP, le test de Tukey n'a révélé aucune différence significative entre les différentes combinaisons entre la distance et le traitement d'interception de la pluie.

Il est possible que les faibles effets du SAI sur les propriétés des communautés microbiennes soient attribuables à son stade de maturité qui était relativement jeune au moment où les mesures ont été réalisées. Il serait intéressant que des recherches futures déterminent la structure des communautés microbiennes du sol à un stade de maturité plus avancé des arbres afin de vérifier si les SAI favorisent l'activité des communautés fongiques plutôt que celles des communautés de bactéries. Les champignons ont des métabolismes plus lents et peuvent donc favoriser une plus grande accumulation de C organique au sol, comparativement aux bactéries qui dégradent la matière organique plus rapidement pour soutenir leur métabolisme de base (Bailey et al. 2002; Six et al. 2006).

Tableau 8. Valeurs de P de l'ANOVA pour les effets de la distance par rapport à la rangée d'arbres, du traitement d'interception de la pluie et du traitement de cernage des racines des arbres sur différentes propriétés des communautés microbiennes du sol dans deux dispositifs expérimentaux implantés dans le système agroforestier intercalaire en 2019.

	Biomasse microbienne	Biomasse bactérienne (B)	Biomasse Gram (+)	Biomasse Gram (-)	Biomasse fongique (F)	Biom. CMA	Gram (+) : Gram (-)	F : B
Dispositif 1								
Distance (D)	0,1044	0,0579	0,0778	0,0566	0,3870	0,2872	0,3629	0,9813
Interception (I)	0,4988	0,8017	0,5017	0,8850	0,8309	0,9434	0,0986	0,7537
D x I	0,1914	0,3482	0,3931	0,3114	0,5411	0,4707	0,0434	0,8579
Dispositif 2								
Distance (D)	0,3963	0,3344	0,2233	0,5764	0,9563	0,6100	0,8616	0,8578
Interception (I)	0,1405	0,2082	0,1530	0,3100	0,4277	0,4902	0,8346	0,9343
Cernage (C)	0,0961	0,0804	0,0337	0,1815	0,2013	0,3759	0,5703	0,9519
D x I	0,1308	0,0840	0,0456	0,3318	0,5826	0,7536	0,6159	0,6873
D x C	0,5572	0,4224	0,3044	0,5417	0,9689	0,9959	0,5746	0,9634
I x C	0,5323	0,9518	0,8336	0,8825	0,7141	0,5474	0,5246	0,4075
D x I x C	0,3063	0,3113	0,1541	0,4520	0,2849	0,2617	0,8069	0,2231

CMA = champignon mycorhizien arbusculaire

Tableau 9. Effets de la distance par rapport à la rangée d'arbres et du traitement d'interception de la pluie (dispositif 1) sur différentes propriétés des communautés microbiennes du sol dans le système agroforestier intercalaire en 2019.

	Sans interception de la pluie				Avec interception de la pluie			
	4 m	12 m	20 m	Témoin	4 m	12 m	20 m	Témoin
Biomasse microbienne (ng/g)	4333 (1031)	3945 (719)	4611 (1403)	5153 (2225)	4261 (1184)	3456 (1380)	3219 (1545)	6618 (4151)
Biomasse bactérienne (B) (ng/g)	1938 (533)	1732 (376)	1984 (628)	2542 (1353)	2026 (760)	1590 (763)	1508 (828)	3232 (2212)
Biomasse Gram (+) (ng/g)	1109 (269)	1009 (151)	1151 (328)	1472 (827)	1189 (441)	931 (416)	843 (438)	1730 (1124)
Biomasse Gram (-) (ng/g)	829 (282)	723 (231)	833 (317)	1070 (581)	837 (320)	659 (369)	664 (393)	1502 (1100)
Biomasse fongique (F) (ng/g)	343 (253)	339 (173)	413 (299)	435 (202)	368 (131)	299 (196)	277 (198)	692 (657)
Biomasse CMA (ng/g)	106 (101)	113 (63)	121 (80)	147 (65)	135 (46)	97 (61)	88 (64)	222 (183)
Gram (+) : Gram (-)	1,32 (0,17)	1,48 (0,34)	1,45 (0,31)	1,53 (0,42)	1,44 (0,16)	1,61 (0,4)	1,26 (0,13)	1,18 (0,26)
F : B	0,17 (0,08)	0,19 (0,07)	0,19 (0,08)	0,18 (0,07)	0,18 (0,04)	0,17 (0,08)	0,16 (0,06)	0,18 (0,07)

Les valeurs entre parenthèses indiquent l'écart-type. CMA = champignon mycorhizien arbusculaire.

Tableau 10. Effets de la distance du soya par rapport à la rangée d'arbres, du traitement d'interception de la pluie et du traitement de cernage des racines des arbres (dispositif 2) sur différentes propriétés des communautés microbiennes du sol dans le système agroforestier intercalaire en 2019.

	Sans cernage des racines						Avec cernage des racines					
	Sans interception de la pluie			Avec interception de la pluie			Sans interception de la pluie			Avec interception de la pluie		
	4 m	12 m	20 m	4 m	12 m	20 m	4 m	12 m	20 m	4 m	12 m	20 m
Biomasse microbienne (ng/g)	4333 (1031)	4102 (799)	4688 (1316)	4261(1184)	3784 (1602)	3200 (1431)	3538 (1059)	3251 (1441)	3699 (914)	3101 (1065)	3328 (1118)	3143 (1016)
Biomasse bactérienne (B) (ng/g)	1938 (533)	1836 (457)	2056 (616)	2026 (760)	1744 (854)	1479 (770)	1525 (481)	1425 (718)	1631 (422)	1307 (512)	1378 (555)	1280 (441)
Biomasse Gram (+) (ng/g)	1109 (269)	1073 (231)	1163 (306)	1189 (441)	1006 (453)	842 (405)	875 (189)	785 (279)	965 (180)	752 (199)	766 (252)	697 (246)
Biomasse Gram (-) (ng/g)	829 (282)	763 (242)	893 (338)	837 (320)	738 (418)	637 (372)	650 (324)	640 (463)	666 (270)	555 (323)	612 (321)	583 (213)
Biomasse fongique (F) (ng/g)	343 (253)	343 (161)	435 (284)	368 (131)	351 (233)	263 (188)	313 (224)	285 (252)	249 (138)	216 (149)	265 (188)	261 (126)
Biomasse CMA (ng/g)	106 (101)	117 (60)	130 (77)	135 (46)	120 (81)	86 (59)	117 (82)	108 (92)	90 (51)	83 (66)	89 (68)	89 (41)
Gram (+):Gram (-)	1,32 (0,2)	1,47 (0,3)	1,39 (0,3)	1,39 (0,1)	1,55 (0,4)	1,34 (0,3)	1,48 (0,6)	1,52 (0,63)	1,55 (0,5)	1,63 (0,6)	1,40 (0,5)	1,46 (0,5)
F:B	0,17 (0,08)	0,18 (0,07)	0,20 (0,08)	0,18 (0,04)	0,18 (0,08)	0,16 (0,06)	0,19 (0,08)	0,18 (0,08)	0,15 (0,08)	0,15 (0,06)	0,17 (0,09)	0,2 (0,09)

Les valeurs entre parenthèses indiquent l'écart-type.

Valeur économique du système agroforestier intercalaire

La valeur actuelle nette (VAN) du SAI de base est inférieure à celle du système agricole témoin (tableau 11). Cet écart s'explique notamment par l'investissement important que doit déployer le producteur agricole à court terme (i.e. les 10 premières années) pour l'implantation et l'entretien du SAI, par la perte d'espace cultivable et par le fait que les revenus tirés du bois surviennent à moyen (15 ans pour les peupliers) et long terme (40 ans pour les feuillus nobles).

Tableau 11. Valeur actuelle nette (\$/ha) sur un horizon d'analyse de 40 ans du système agroforestier intercalaire (SAI) implanté à la Ferme Bertco en fonction du taux d'actualisation, de paiements pour séquestration de carbone (C) dans les arbres, d'une aide financière couvrant 70 % des coûts d'implantation et d'entretien des arbres et de la variation des rendements agricoles dans les allées.

	Taux d'actualisation		
	2 %	4 %	6 %
Système agricole témoin	15 020	11 090	8 580
SAI de base	12 320	8 240	5 700
SAI avec paiements pour séquestration de C	15 730	10 580	7 380
SAI avec aide à l'implantation et l'entretien	14 640	10 450	7 830
SAI avec augmentation des rendements de 5%	12 540	8 400	5 820
SAI avec augmentation des rendements de 10 %	12 760	8 550	5 940

Les paiements pour séquestration du carbone dans la biomasse des arbres augmentent de façon importante la VAN du SAI qui devient même supérieure à celle du système agricole témoin à un taux d'actualisation de 2 % (tableau 11). Ce résultat doit toutefois être considéré avec prudence compte tenu du fait qu'il n'existe pas encore de protocoles de quantification de crédits compensatoires permettant de reconnaître les projets de séquestration de carbone et de réduction d'émission de GES en systèmes agroforestiers. Bien que le carbone forestier ne soit pas reconnu encore dans le système de plafonnement et d'échange de droits d'émission de gaz à effet de serre du Gouvernement du Québec, il peut faire l'objet de processus de certifications et d'échanges privés dans le cadre d'ententes de gré à gré.

Malgré les limites concernant la concrétisation des valeurs estimées pour le carbone, nos résultats sont en accord avec ceux obtenus dans d'autres études (Alam et al. 2016; Key et al. 2019). Nos résultats soulignent le potentiel des paiements pour séquestration de carbone pour rendre la rentabilité des aménagements agroforestiers équivalente ou supérieure à celle des systèmes agricoles conventionnels. Par ailleurs, il est important de souligner que la prise en compte du potentiel des SAI à accroître la séquestration du carbone dans le sol aurait sans doute augmenté de façon significative la VAN du SAI avec

paiements pour séquestration de carbone. Par exemple, une méta-analyse globale récente intégrant plus de 220 observations a démontré une augmentation de près de 20 % des stocks de carbone dans les sols des SAI comparativement aux systèmes agricoles conventionnels (Shi et al. 2018).

L'aide financière couvrant 70 % des coûts d'implantation et d'entretien du SAI permet elle aussi d'augmenter significativement la VAN du SAI de base qui devient similaire à celle du système agricole témoin, peu importe le taux d'actualisation considéré (tableau 11). Des résultats similaires soulignant l'effet significatif de programmes d'aide à l'implantation de SAI sur leur rentabilité ont été obtenus dans d'autres régions tempérées en Europe (Graves et al. 2007). Au Québec, le programme d'appui financier Prime-Vert du MAPAQ, qui soutient l'adoption de pratiques agroenvironnementales, mentionne explicitement l'agroforesterie. Pour le MAPAQ, cette pratique comprend les bandes riveraines élargies, les haies brise-vent et les bandes ou îlots boisés favorisant la biodiversité, mais n'inclut pas formellement, pour le moment, les formes d'agroforesterie intraparcellaire comme les SAI. D'autres régions tempérées comme la France ont mis en place des programmes généreux d'appui financier qui ont contribué au déploiement à grande échelle des SAI (Hotelier et al. 2020).

L'analyse économique a aussi permis de déterminer qu'une augmentation de 5 ou 10 % des rendements de la culture dans les allées du SAI, une année sur trois, a un impact relativement limité sur la VAN du SAI de base comparativement aux deux autres variables étudiées (paiements pour séquestration du carbone et aides financières) (tableau 11). D'autres variables dans cette analyse n'ont pas été considérées dans l'analyse de sensibilité comme l'âge auquel les arbres sont récoltés, la productivité des arbres et la qualité et le prix de vente des produits agricoles et du bois. D'autres études ont montré que la VAN des SAI est peu sensible à ces variables qui demeurent difficilement prédictibles (Campbell et al. 1991; Benjamin et al. 2000).

Au-delà des biens marchands, les SAI peuvent fournir plusieurs services écosystémiques (e.g. amélioration de la pollinisation, de la qualité de l'air, de l'eau, des sols et des paysages, régulation du climat) dont la valeur marchande est difficilement quantifiable. Bien que le producteur agricole puisse en tirer avantage, il s'agit souvent de bénéfices publics plutôt que privés. La reconnaissance de la valeur de ces services écosystémiques peut avoir un impact considérable sur l'évaluation économique des systèmes agroforestiers qu'on peut faire (Key et al. 2019). Par exemple, une étude économique réalisée dans le contexte du Québec a estimé que la somme des bénéfices économiques privés (bois et produits agricoles) et de huit services écosystémiques non marchands d'un SAI avec grandes cultures était 2,4 fois plus élevée que celle d'un système agricole conventionnel de production de grandes cultures (Alam et al. 2014). En intégrant la valeur des services écosystémiques, les auteurs ont estimé la valeur des SAI à 5 milliards \$ par an au Québec si 20 % des surfaces consacrées aux grandes cultures étaient converties en parcelles agroforestières.

Dans cette perspective, des processus permettent d'internaliser la valeur de services écosystémiques non marchands, pensons par exemple aux marchés du phosphore qui permettent de financer des pratiques agroenvironnementales améliorant la qualité de l'eau (Tabaitchout et al., 2019). Dans le cas du Québec, ce type de paiements pour services écosystémiques peut être applicable pour des pratiques favorisant par exemple la qualité de l'eau, la conservation des sols ou les habitats pour la biodiversité. À ce titre, il est intéressant de considérer l'ensemble des pratiques admissibles dans les soutiens offerts par les programmes gouvernementaux (e.g. Prime-vert et Plan d'agriculture durable au MAPAQ) et privés (e.g. ALUS-Montérégie).

Applications possibles pour l'industrie

Il a été démontré que le système agroforestier intercalaire (SAI) peut diminuer la vitesse du vent et la température du sol dans les allées. Cette modification des conditions microclimatiques peut avoir des implications positives pour les cultures en diminuant leur stress thermique lors de canicules et leur stress hydrique pendant des épisodes de faible disponibilité de l'eau dans les sols. Lors de la saison de croissance 2018, qui a été marquée par un printemps et un été relativement secs, le rendement du soya dans les allées du SAI était supérieur de 18,5% à celui dans le système agricole témoin. En 2019, qui a été marquée par un printemps et un été avec des précipitations normales, le rendement du soya dans les allées cultivées était similaire à celui dans le système agricole témoin. Ces résultats suggèrent que des SAI bien conçus et entretenus peuvent contribuer à augmenter la résilience des cultures face à des stress hydriques lors des périodes de croissance les plus sèches. Il sera important dans le futur de continuer à évaluer la variation interannuelle du rendement de différentes cultures en SAI, à différents stades évolutifs des arbres, afin de mieux connaître le potentiel des SAI dans le contexte de l'adaptation des grandes cultures aux changements climatiques.

Contrairement à ce qui a été observé dans d'autres régions tempérées, la taille des racines provenant de la rangée d'arbres (ou cernage racinaire) a eu un impact négatif sur le rendement agricole. Davantage de connaissances seraient à développer pour mieux documenter les mécanismes possibles qui peuvent expliquer cet effet négatif du cernage racinaire. Il est possible que le cernage racinaire appliqué sur des arbres bien développés contribue à relâcher momentanément une quantité importante de matière organique récalcitrante favorisant à court terme l'immobilisation de l'azote par les communautés microbiennes du sol. Il nous apparaît important de continuer à mesurer les effets du cernage racinaire sur d'autres types de culture, sans oublier que ce traitement permet de comprendre les effets de l'ombrage des arbres en isolant les interactions aériennes et souterraines entre les arbres et les cultures.

Notre analyse économique a révélé que les investissements relativement importants que doivent faire les producteurs agricoles pour planter et entretenir les arbres dans les SAI défavorisent leur valeur économique. Par contre, nous avons estimé qu'une aide financière couvrant 70 % des coûts d'implantation et d'entretien des SAI permettrait

d'augmenter leur valeur économique à niveau comparable à celui des systèmes agricoles traditionnels. Une telle aide financière permettrait ainsi de reconnaître les nombreux bénéfices à la biodiversité et services écosystémiques (amélioration de la qualité de l'air, de l'eau, des sols et des paysages, régulation du climat) fournis par les SAI, mais dont la valeur économique est plus difficilement quantifiable. L'analyse économique a aussi révélé que des paiements aux producteurs agricoles pour séquestration du carbone peut rendre la valeur économique des SAI comparable, voire supérieure, à celle des systèmes agricoles traditionnels. Afin que ce potentiel économique puisse s'opérationnaliser, il faudra développer au Québec des protocoles de quantification de crédits compensatoires permettant de reconnaître les projets de séquestration de carbone et de réduction d'émission de GES en systèmes agroforestiers.

Références

Alam M, Olivier A, Paquette A, Dupras J, Revéret JP, Messier C. 2014. First general framework for the quantification and valuation of ecosystem services of temperate tree-based intercropping systems demonstrates substantial benefits for the provision of market and non-market services. *Agroforestry Systems* 88: 679-91.

Alam M, Olivier A, Paquette A. 2016. Measurements and economics of carbon sequestration in temperate tree-based intercropping systems. *International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology* 12: 125-136.

Allen SC, Jose S, Nair PKR, Brecke BJ, Nair VD, Graetz DA, Ramsey CL. 2005. Nitrogen mineralization in a pecan (*Carya illinoensis* K. Koch)–cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States. *Biology and Fertility of Soils* 41: 28-37.

Amadi CC, Van Rees KC, Farrell RE. 2016. Soil–atmosphere exchange of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in shelterbelts compared with adjacent cropped fields. *Agriculture Ecosystems and Environment* 223: 123-134.

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.

Arenas-Corraliza MG, López-Díaz ML, Moreno G. 2018. Winter cereal production in a Mediterranean silvoarable walnut system in the face of climate change. *Agriculture Ecosystems and Environment* 264: 111-118.

Bailey VL, Smith JL, Bolton Jr H. 2002. Fungal-to-bacterial ratios in soils investigated for enhanced C sequestration. *Soil Biology and Biochemistry* 34 997-1007.

Bastian F, Bouziri L, Nicolardot B, Ranjard L. 2009. Impact of wheat straw decomposition on successional patterns of soil microbial community structure. *Soil Biology Biochemistry* 41: 262–275.

Benjamin TJ, Hoover WL, Seifert JR, Gillespie AR 2000. Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the midwestern USA: 4. The economic return of ecological knowledge. *Agroforestry Systems* 48: 79-93.

Beuschel R, Piepho HP, Joergensen RG, Wachendorf C. 2019. Similar spatial patterns of soil quality indicators in three poplar-based silvo-arable alley cropping systems in Germany. *Biology and Fertility of Soils* 55: 1-14.

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: 693-706.

Brandle JR, Hodges L, Zhou XH. 2004. Windbreaks in North American agricultural systems. *Agroforestry Systems* 61: 65-78.

Bryant C, Singh B, Thomassin P, Baker L. 2007. Vulnérabilités et adaptation aux changements climatiques au Québec au niveau de la ferme: leçons tirées de la gestion du risque et de l'adaptation à la variabilité climatique par les agriculteurs. Rapport final-Ouranos. Disponible en ligne: http://www.ouranos.ca/media/publication/149_Bryant1.pdf

Campbell GE, Lottes GJ, Dawson JO. 1991. Design and development of agroforestry systems for Illinois, USA: silvicultural and economic considerations. *Agroforestry Systems* 13: 203-224.

Carrier M, Gonzalez FAR, Cogliastro A, Olivier A, Vanasse A, Rivest D. 2019. Light availability, weed cover and crop yields in second generation of temperate tree-based intercropping systems. *Field Crops Research* 239: 30-37.

Cleugh HA. 1998. Effects of windbreaks on airflow, microclimates and crop yields. *Agroforestry Systems* 41: 55-84.

CRAAQ. 2018a. Foin - Analyse comparative provinciale 2016 - Analyse de données Agritel - 2018 (AGDEX 120/891).

CRAAQ. 2018b. Blé fourrager de printemps - Budget à l'hectare - 2018 (AGDEX 112/821b).

CRAAQ. 2018c. Maïs fourrager - Budget à l'hectare - 2018 (AGDEX 111/821a).

CRAAQ. 2018d. Soya - Budget à l'hectare - 2018 (AGDEX 141/821).

Cuéllar, MA, Allaire SE, Lange SF, Bradley RL, Parsons WF, Rivest D, Cogliastro A. 2016. Greenhouse gas dynamics in a tree-based intercropping system compared with an organic conventional system. *Canadian Journal of Soil Science* 97: 382-393.

Easterling WE, Hays CJ, Easterling MM, Brandle JR. 1997. Modeling the effect of shelterbelts on maize productivity under climate change: an application of the EPIC model. *Agriculture Ecosystems and Environment* 61: 163-176.

Frazer GW, Canham CD, Lertzman KP. 1999. Gap Light Analyzer (GLA), Version 2.0: Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, users manual and program documentation. Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia, and the Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, New York, 36.

Frostegård Å, Tunlid A, Bååth E. 2011. Use and misuse of PLFA measurements in soils. *Soil Biology and Biochemistry* 43: 1621-1625.

Graves AR, Burgess PJ, Palma JHN, Herzog F, Moreno G, Bertomeu M, Dupraz C, Liagre F, Keesman K, van der Werf W, Koeffeman de Nooy A, van den Briel JP. 2007. Development and application of bio-economic modelling to compare silvoarable, arable, and forestry systems in three European countries. *Ecologica Engineering* 29: 434-449.

Hamel C, Hanson K, Selles F, Cruz AF, Lemke R, McConkey B, Zentner R. 2006. Seasonal and long-term resource-related variations in soil microbial communities in wheat-based rotations of the Canadian prairie. *Soil Biology and Biochemistry* 38: 2104-2116.

Hotelier-Rous N, Laroche G, Durocher È, Rivest D, Olivier A, Liagre F, Cogliastro A. 2020. Temperate Agroforestry Development: The Case of Québec and of France. *Sustainability* 12(17) : 7227.

Jing DW, Liu FC, Wang MY, Ma HL, Du ZY, Ma BY, Dong YF. 2017. Effects of root pruning on the physicochemical properties and microbial activities of poplar rhizosphere soil. *Plos one* 12(11): e0187685.

Jones HR, Sudmeyer RA. 2002. Economic assessment of windbreaks on the south-eastern coast of Western Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 42: 751-761.

Jose S, Gillespie AR, Pallardy SG. 2004. Interspecific interactions in temperate agroforestry. *Agroforestry Systems* 61: 237-255.

Kanzler M, Böhm C, Mirck J, Schmitt D, Veste M. 2019. Microclimate effects on evaporation and winter wheat (*Triticum aestivum* L.) yield within a temperate agroforestry system. *Agroforestry Systems* 93: 1821-1841.

Kay S, Graves A, Palma JH, Moreno G, Roces-Díaz JV, Aviron S, al. 2019. Agroforestry is paying off—Economic evaluation of ecosystem services in European landscapes with and without agroforestry systems. *Ecosystem Services* 36: 100896.

Kort J. 1988. Benefits of windbreaks to field and forage crops. *Agriculture Ecosystems and Environment* 22/23: 165–191.

Lawson G, Dupraz C, Watté J. 2019. Can silvoarable systems maintain yield, resilience, and diversity in the face of changing environments?. In *Agroecosystem Diversity* (pp. 145-168). Academic Press.

Lovell ST, Dupraz C, Gold M, Jose S, Revord R, Stanek E, Wolz KJ. 2018. Temperate agroforestry research: considering multifunctional woody polycultures and the design of long-term field trials. *Agroforestry Systems* 92: 1397-1415.

Link CM, Thevathasan NV, Gordon AM, Isaac ME. 2015. Determining tree water acquisition zones with stable isotopes in a temperate tree-based intercropping system. *Agroforestry Systems* 89: 611-620.

Macneil R. 2020. Is Canadian carbon pricing here to stay? The outlook after 14 elections. *Environmental Politics* 29: 354–359.

Miller AW, Pallardy SG. 2001. Resource competition across the crop-tree interface in a maize-silver maple temperate alley cropping stand in Missouri. *Agroforestry Systems* 53: 247-259.

Nasielski J, Furze JT, Bargaz A, Thevathasan NV, Isaac ME. 2015. Agroforestry promotes soybean yield stability and N₂-fixation under water stress. *Agronomy for Sustainable Development* 35: 1541-1549.

Nuberg IK. 1998. Effect of shelter on temperate crops: a review to define research for Australian conditions. *Agroforestry Systems* 41:3–34.

Perron J-Y. 2003. Tarif De Cubage Général – Volume marchand brut. <http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/tarif-de-cubage-64.pdf>.

Pipatti R, Wagner J, Alves S, Gao Q, Cabrera C, Mareckova K, Yamada M. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories-Volume 5 Chapter 4.

Rivest D, Vezina 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: 237-246.

Rivest D, Cogliastro A. 2019. Establishment success of seven hardwoods in a tree-based intercropping system in southern Quebec, Canada. *Agroforestry Systems* 93: 1073-1080.

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: 51-60.

Rivest D, Rolo V, López-Díaz L, Moreno G. 2011. Shrub encroachment in Mediterranean silvopastoral systems: *Retama sphaerocarpa* and *Cistus ladanifer* induce contrasting effects on pasture and *Quercus ilex* production. *Agriculture Ecosystems and Environment* 141: 447-454.

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 Total Environment* 463-464: 51-60.

Reynolds PE, Simpson JA, Thevathasan NV, Gordon AM. 2007. Effects of tree competition on corn and soybean photosynthesis, growth, and yield in a temperate tree-based agroforestry intercropping system in southern Ontario, Canada. *Ecological Engineering* 29: 362-371.

Sereke F, Graves AR, Dux D, Palma JHN, Herzog F. 2015. Innovative agroecosystem goods and services: key profitability drivers in Swiss agroforestry. *Agronomy for Sustainable Development* 35: 759–770.

Six J, Frey SD, Thiet RK, Batten KM. 2006. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal* 70: 555-569.

Shi L, Feng W, Xu J, Kuzyakov Y. 2018. Agroforestry systems: Meta-analysis of soil carbon stocks, sequestration processes, and future potentials. *Land Degradation and Development* 29: 3886-3897.

Tabaichount B, Wood SLR, Kermagoret C, Kolinjivadi V, Bissonnette JF, Zaga Mendez A, Dupras J (2019) Water quality trading schemes as a form of state intervention: Two case studies of state-market hybridization from Canada and New Zealand. *Ecosystem Services* 36: 100890.

Thaler S, Eitzinger J., Trnka M, Dubrovsky M. 2012. Impacts of climate change and alternative adaptation options on winter wheat yield and water productivity in a dry climate in Central Europe. *The Journal of Agricultural Science* 150: 537-555.

Thevathasan NV, Gordon AM, Bradley B, Cogliastro A, Folkard P, Grant R, et al., 2012. Agroforestry research and development in Canada: the way forward. *Advances in Agroforestry* 9: 247-283.

Toor IA, Smith EG, Whalen JK, Naseem A. 2012. Tree-based intercropping in southern Ontario, Canada. *Canadian Journal of Agriculture Economics* 60: 141-154.

Thivierge MN, Jégo G, Bélanger G, Bertrand A, Tremblay GF, Rotz CA, Qian B. 2016. Predicted yield and nutritive value of an alfalfa–timothy mixture under climate change and elevated atmospheric carbon dioxide. *Agronomy Journal* 108: 585-603.

Valdivia C, Barbieri C, Gold MA. 2012. Between forestry and farming: Policy and environmental implications of the barriers to agroforestry adoption. *Canadian Journal of Agricultural Economics* 60: 155-175.

Winans KS, Whalen JK, Rivest D, Cogliastro A, Bradley RL. 2016. Carbon sequestration and carbon markets for tree-based intercropping systems in Southern Quebec, Canada. *Atmosphere* 7(2): 17.

Wolz KJ, DeLucia EH. 2018. Alley cropping: Global patterns of species composition and function. *Agriculture Ecosystems and Environment* 252: 61-68.

Wolz KJ, DeLucia EH. 2019. Black walnut alley cropping is economically competitive with row crops in the Midwest USA. *Ecological Applications* 29: e01829.

Wolz KJ, Lovell ST, Branham BE, Eddy WC, Keeley K, Revord RS, et al. 2018. Frontiers in alley cropping: Transformative solutions for temperate agriculture. *Global Change Biology* 24: 883-894.

Zhao C, Liu B, Piao S, Wang X, Lobell DB, Huang Y, et al. 2017. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114: 9326-9331.