

Synthèse de la recherche sur les systèmes agroforestiers intercalaires à la Ferme Bertco

Document de transfert de connaissances

Juillet 2022

David Rivest, Ph. D.

Université du Québec en Outaouais



1. Introduction

Dans les régions agricoles tempérées, les systèmes agroforestiers les plus répandus sont les haies agroforestières. Elles couvriraient plusieurs milliers de km sur les terres agricoles du Québec. Un autre système agroforestier qui gagne en intérêt en régions tempérées, notamment aux États-Unis et en Europe, mais qui est beaucoup moins connu et adopté au Québec, est le système agroforestier intercalaire (SAI). Dans ce système, plusieurs rangées d'arbres sont disposées à l'intérieur même de la parcelle cultivée. Les rangées sont largement espacées, pouvant aller jusqu'à 40 m, voire 60 m (130 à 200 pi). L'espace entre les rangées d'arbres (appelé allées cultivées) doit être suffisant pour permettre le passage de la machinerie agricole, y compris de rampes d'épandage de grande dimension. L'idée est que les producteurs agricoles y produisent leurs cultures habituelles, sans apporter de modification particulière à leur plan de rotation et à leur régie culturale. Sur les rangées, les espacements entre les arbres sont plus importants que ceux dans les haies agroforestières. Ce modèle d'agroforesterie, adéquatement installé, permet que les effets des arbres profitent à l'ensemble de la parcelle en culture plutôt qu'uniquement en leur bordure.

La complémentarité des arbres et des cultures dans les SAI permet une utilisation plus efficace et une valorisation plus importante de l'eau, des éléments minéraux du sol et de la lumière. L'une des grandes forces des SAI est leur multifonctionnalité. Ce mode de production peut contribuer à améliorer la santé des sols, la qualité des eaux et la biodiversité. Les SAI sont aussi prometteurs pour faire progresser les efforts d'atténuation et d'adaptation aux changements climatiques et ils peuvent participer à la création de magnifiques paysages. La pratique cherche le meilleur compromis pour atteindre les objectifs de production agricole tout en bénéficiant des avantages environnementaux fournis par la présence des arbres. Aussi, l'entretien approprié des arbres largement espacés et les conditions de croissance particulières du SAI contribuent généralement à produire plus rapidement qu'en plantation traditionnelle des bois de haute valeur.

La majorité des études sur les SAI tempérés ont été réalisées en testant des espacements relativement faibles entre les rangées d'arbres (8-15 m). Bien que ces SAI de «1^{re} 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. Depuis le début des années 2010, nous avons installé au Québec plusieurs sites expérimentaux et de démonstration d'envergure testant différents SAI de «2^e génération», en partenariat avec divers producteurs agricoles. De plus larges écartements (ex. 40 m) entre les rangées d'arbres y sont adoptés pour optimiser les rendements des cultures et la rentabilité des systèmes. À ce jour, le site expérimental de la ferme Bertco, à Baie-du-Febvre, est sans doute le site qui a reçu le plus d'attention sur le plan de la recherche sur les SAI au Québec. Ce document vise à faire une brève synthèse des caractéristiques de ce SAI et des dispositifs expérimentaux qui ont été mis en place. Une sélection de quelques résultats est aussi présentée. Nous espérons que cette présentation permettra de faire naître un intérêt chez les producteurs et conseillers agricoles pour ces systèmes agroforestiers novateurs.

2. Site et dispositifs expérimentaux

Le site expérimental a été implanté à la ferme Bertco, à Baie-du-Febvre, sur une parcelle agricole d'environ 11 ha. La parcelle est dotée d'un système de drainage souterrain. Le sol est un loam sablo-argileux contenant 66 % de sable et 11% d'argile, avec un pH à l'eau de 6,4 et une capacité d'échange cationique de 8.5 cmol+ kg⁻¹. Selon l'étude pédologique de Laplante et Choinière (1954), le sol du site appartient aux séries Argile Rideau (avec taches de sable à la surface) et Sable de Grande-Ligne. Un brise-vent de mélèzes a été planté en 2007 à la bordure de la parcelle.

Le SAI expérimental, implanté en mai 2012, comprend trois rangées simples d'arbres (orientation nord-ouest – sud-est) de 480 m de longueur. Les rangées sont composées de feuillus à bois dur (érable à sucre (*Acer saccharum*), noyer noir (*Juglans nigra*), chêne rouge (*Quercus rubra*), chêne bicolor (*Quercus bicolor*), chêne à gros fruits (*Quercus macrocarpa*) et caryer ovale (*Carya ovata*) à croissance modérée, plantés en alternance avec des peupliers hybrides à croissance rapide. Quatre clones de peupliers hybrides sont comparés : DNxM 915508 (*Populus deltoides* x *P. nigra* x *P. maximowiczii*), DN 4813, DN 3570 et DN 3585. Les arbres ont été plantés selon des espacements de 5 m entre les arbres sur la rangée et de 40 m entre les rangées, ce qui correspond à une densité de 50 arbres/ha (figure 1).



Figure 1. Système agroforestier intercalaire (a) en août 2013 (culture fourragère, photo D. Rivest), (b) en juillet 2017 (maïs, photo Drone Deschamps), (c) en septembre 2019 (soya, photo Y. Rose)), et (d) en juillet 2020 (seigle, photo D. Rivest).

Depuis leur plantation, les peupliers et les feuillus durs ont été entretenus par des interventions annuelles de taille de formation et d'élagage (sur moins du tiers de la hauteur des arbres). Des bandes (environ 2 m de largeur) non cultivées et non fauchées ont été maintenues sous les rangées d'arbres. Ces bandes enherbées sont composées majoritairement par la luzerne (*Medicago sativa*), la verge d'or (*Solidago canadenses*), l'asclépiade (*Asclepias syriaca*) et la bardane (*Arctium lappa*). La surface non-cultivée couverte par les rangées d'arbres couvre environ 3,5 % de la surface totale de la parcelle cultivée.

La parcelle est cultivée selon un plan de rotation qui inclut le maïs, le soya, les céréales et la culture fourragère à base de luzerne. Les grandes cultures sont produites en semis direct et incluent depuis quelques années des associations avec des cultures de couverture.

Différentes variables concernant le microclimat, les propriétés du sol et les cultures sont mesurées dans des parcelles témoins (sans arbre) en culture (avec la même régie et le même historique agricole que ceux du SAI). Ces parcelles sont situées en périphérie des rangées d'arbres, à plus de 40 m du plus proche arbre. Selon les projets et les objectifs visés, les variables sont ainsi mesurées à différentes distances par rapport à la rangée d'arbres: 0 (bande non cultivée), 4, 12 et 20 m (centre des allées) ainsi que le témoin agricole (figure 2).

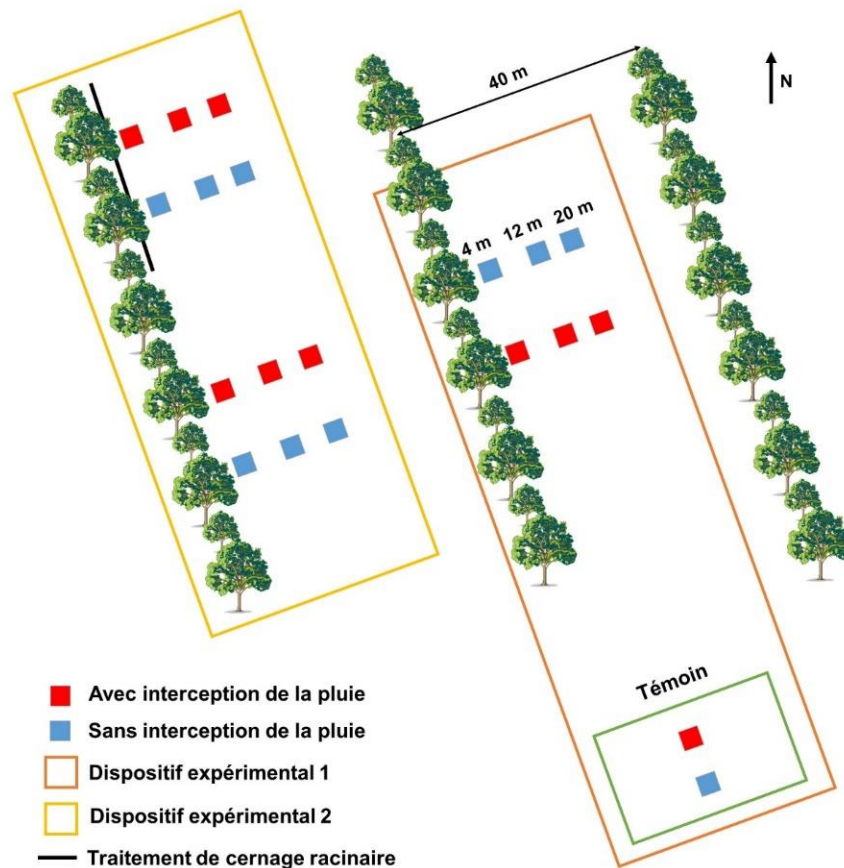


Figure 2. Exemple de blocs expérimentaux où des traitements de cernage racinaire et d'interception de la pluie ont été testés.

En 2018 et 2019 (culture de soya), un dispositif original d'interception partielle (50 % de la surface du sol) et prolongé de la pluie (stade R1 à R7 du soya) a été expérimenté pendant 2 ans dans le SAI et dans le témoin agricole. Notre hypothèse était que le SAI génère à la fois des effets positifs (près du centre de l'allée) et négatifs (près des arbres) sur la performance du soya et que ces effets sont accentués lorsque la disponibilité de l'eau diminue. Le traitement d'interception de la pluie a été conçu à l'aide d'un ensemble de gouttières de 3 m de long par 10 cm de large disposées à environ 10 cm du sol et légèrement inclinées vers des fosses de drainage (30 cm) creusées dans le sol (figure 3).



Figure 4. Traitement d'exclusion partielle de la pluie à l'aide de gouttières dans la culture de soya en 2019 (photos : Y. Rose).

En 2018 et 2019 (culture de soya) et en 2021-2022 (culture fourragère), deux traitements de cernage des racines des arbres (sans cernage et avec cernage) ont été testés dans plusieurs blocs expérimentaux. Le cernage des racines a eu lieu en avril ou mai à l'aide d'une sous-soleuse (60-70 cm de profondeur), à 2,5 m de la rangée d'arbres, parallèlement et des deux côtés de celles-ci, sur des tronçons d'une longueur de 30-40 m (selon les années) (figure 5).



Figure 5. Cernage des racines des arbres à l'aide d'une dent de sous-soleuse, fin avril 2021 (photo D. Rivest).

3. Variables mesurées

3.1 Rendement des cultures

Le rendement en grains du soya (2016, 2018, 2019), du maïs (2017) et de la culture fourragère (2021 et 2022) est déterminé dans des quadrats de 1 à 3 m², selon les cultures. Le rendement par espèce fourragère et la qualité nutritive fourragère seront déterminés lors de la saison de culture 2022.

3.2 Conditions microclimatiques

Différentes variables microclimatiques ont été mesurées dans les années passées ou seront mesurées lors de la saison de culture 2022. Les précipitations sont mesurées en continu à l'aide d'un pluviomètre enregistreur placé dans une parcelle témoin. L'humidité et la température du sol en surface (7,5 cm de profondeur) est déterminée lors de périodes spécifiques à l'aide d'une sonde Field Scout TDR 350. La proportion de lumière totale transmise à 1 m du sol pendant la période de pleine feuillaison des arbres est déterminée à l'aide de l'analyse de photos hémisphériques. La température et l'humidité relative de l'air sont déterminés en continu pendant toute la saison de croissance des cultures à l'aide de data logger Hobo MX2301A. La demande évaporative de l'atmosphère est déterminée à l'aide d'évaporimètres Piché lors de périodes spécifiques. Des stations météorologiques (Spectrum technologies) ont aussi été déployées et mesurent en continu le rayonnement photosynthétiquement actif, la vitesse et la direction du vent, et la température et l'humidité du sol à deux profondeurs (10 et 20 cm) (figure 6).



Figure 6. Centrale d'acquisition de données munie d'un capteur de rayonnement photosynthétiquement actif, d'un anémomètre, et de sondes d'humidité et de température du sol (photo Y. Rose).

3.3 Propriétés du sol

La disponibilité des éléments nutritifs en 2021 et 2022 est déterminée à l'aide de membranes d'échanges ioniques enfouies à 10 cm de profondeur. En 2022, nous mesurerons aussi la densité apparente, la teneur en matière organique et le taux d'infiltration de l'eau à l'aide d'un infiltromètre à mini-disque. Le taux de lessivage de l'azote inorganique est actuellement encore d'évaluation pour la période comprise entre mai 2021 et octobre 2022 en utilisant des lysimètres équipés de membranes de résine d'échange ionique enfouies à 40 cm de profondeur dans un sol non perturbé.

3.4. Taille des arbres et production de litières

La hauteur et le diamètre des arbres ont été mesurés à plusieurs reprises depuis leur plantation. Cinq ans après plantation, le taux de survie et les défauts des arbres ont été déterminés (voir Rivest et Cogliastro 2019 pour plus de détails). La distribution spatiale des litières de feuilles des arbres (2021 et 2022) est estimée en utilisant des trappes à litières.

3.5 Analyse économique

La rentabilité du SAI à l'étude a été estimée à l'aide de la méthode du budget partiel. Pour plus de détails sur la méthodologie, on peut consulter le rapport de Rivest et al. (2020). En bref, 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). 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 affichés en 2020 par le Syndicat des Producteurs forestiers du Sud du Québec. 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 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 à l'aide des budgets réalisés par le CRAAQ pour chacune des cultures de la rotation. 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 CO_2e^{-1} a été utilisé dans les calculs. 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).

4. Résultats

Cette section présente une sélection de quelques résultats obtenus au fil des années. Les résultats sont commentés dans les titres des figures. Il ne s'agit pas d'une présentation exhaustive de tous les résultats que nous avons obtenus. Plusieurs variables présentées à la section précédente sont en cours d'analyse ou seront mesurées à la saison 2022. Les résultats seront disponibles prochainement.

4.1 Rendement des cultures et conditions microclimatiques

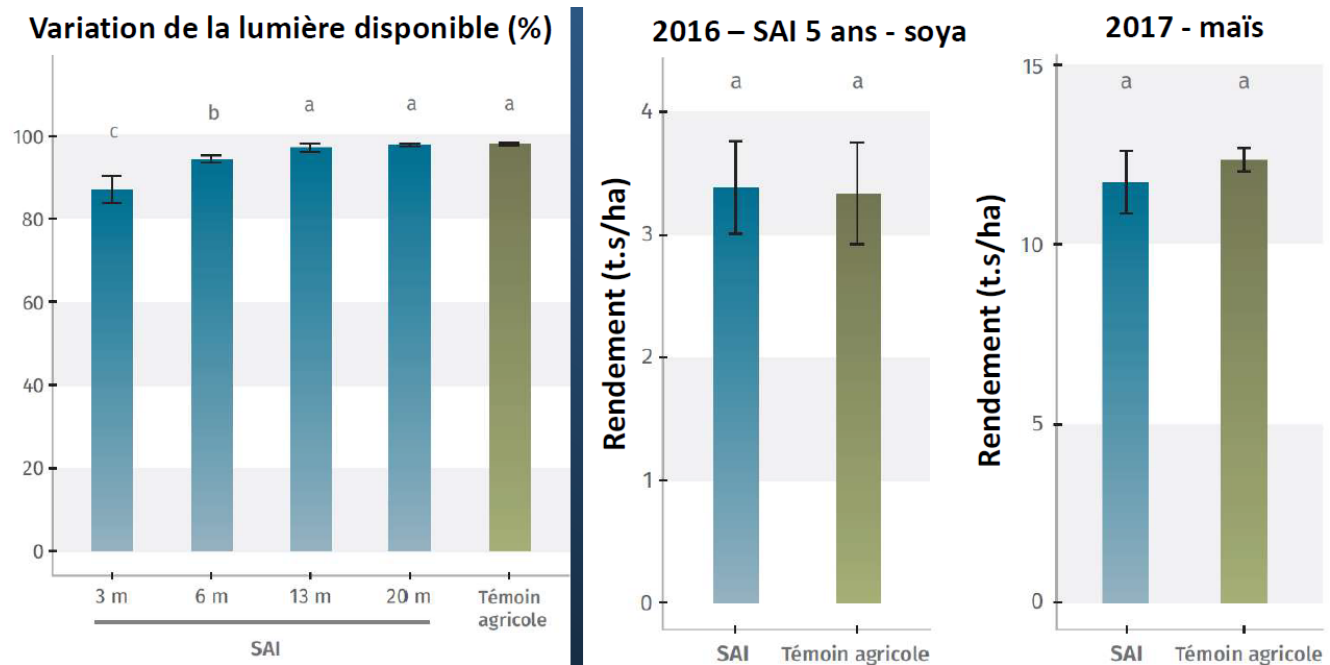


Figure 7. Variation de la disponibilité de la lumière en 2017 et du rendement en grains du soya (2016) et du maïs (2017) dans les allées cultivées du système agroforestier intercalaire (SAI) et dans le témoin agricole. Différentes lettres représentent une différence significative (test de Tukey, $p < 0.05$). Le rendement du SAI n'intègre pas la perte de rendement attribuable à la réduction de l'espace cultivable (environ 3,5%). Aucun effet (négatif ou positif) significatif des rangées d'arbres sur le rendement total de l'allée n'a été mesuré lors de ces années (5 et 6 ans après la plantation des arbres). Pour plus de détails consulter l'article scientifique de Carrier et al. (2019).

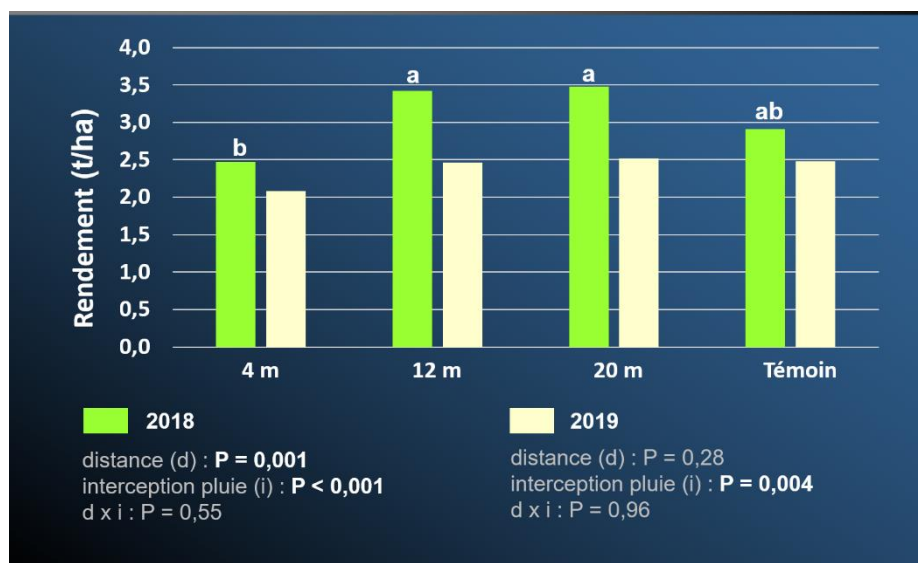


Figure 8. Variation du rendement en grains du soya en 2018 et 2019 à différentes distances de la rangée d'arbres dans le système agroforestier intercalaire et dans le témoin agricole. Différentes lettres représentent une différence significative (test de Tukey, $p < 0.05$). En 2018 (saison anormalement sèche et chaude), le rendement du soya à 12 et 20 m de la rangée d'arbres tendait à être supérieur à celui dans le témoin agricole, ce qui suggère un phénomène de facilitation des arbres sur la culture de soya. En 2019 (saison normale), le rendement du soya dans les allées du SAI, indépendamment de la distance de la rangée d'arbres, était similaire à celui dans le témoin indiquant des effets plutôt neutres des arbres sur la culture. Pour plus de détails consulter l'article scientifique de Gagné et al. (2022).

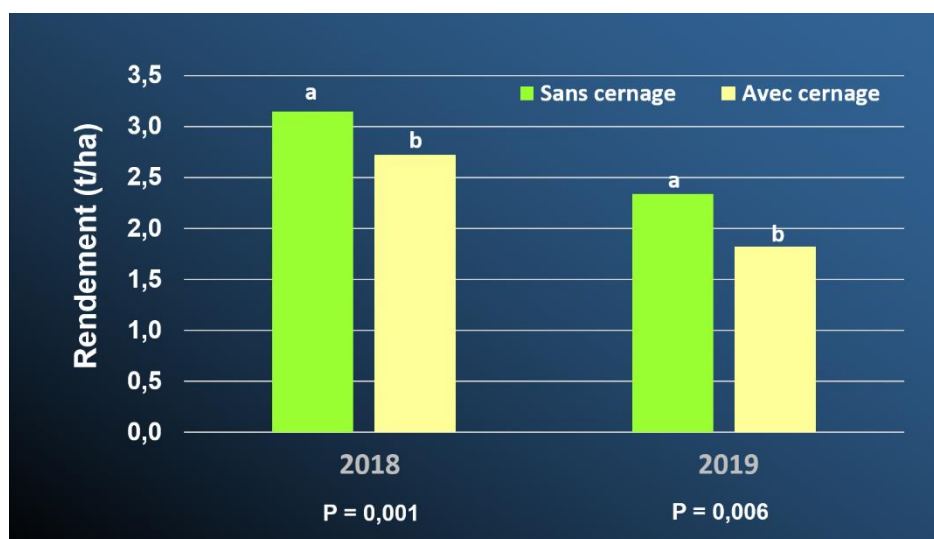


Figure 9. Variation du rendement en grains du soya en 2018 et 2019 dans le SAI en fonction du traitement de cernage des racines des arbres. Différentes lettres représentent une différence significative (test de Tukey, $p < 0.05$). Le cernage racinaire a eu un effet minime sur l'humidité du sol et un effet négatif sur le rendement du soya pendant les 2 années de l'étude, ce qui est contraire à notre hypothèse. Pour plus de détails consulter l'article scientifique de Gagné et al. (2022).

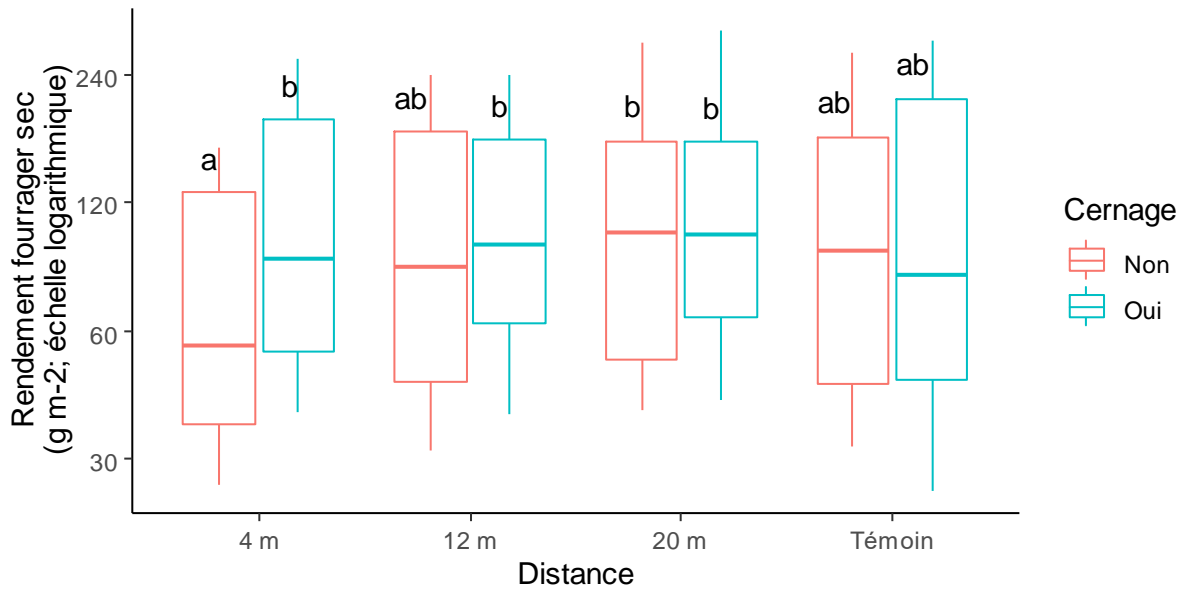


Figure 10. Variation du rendement de la culture fourragère en 2021 dans le système agroforestier intercalaire et dans le témoin agricole en fonction du traitement de cernage des racines des arbres. Différentes lettres représentent une différence significative (test de Tukey, $p < 0.05$). Une diminution significative du rendement fourrager a été observée dans les parcelles situées à 4 m des rangées d'arbres et sans cernage des racines, alors que les parcelles à 4 m avec cernage racinaire avaient un rendement équivalent aux autres distances et aux témoins. Ceci suggère que la compétition racinaire pourrait être déterminante pour les rendements fourragers en SAI. Considérant que la lumière était grandement réduite dans les parcelles situées à 4 m de 11 h à 17 h (jusqu'à 50 %, figure 11), il est possible que les deux aient agi de pair dans cette diminution du rendement.

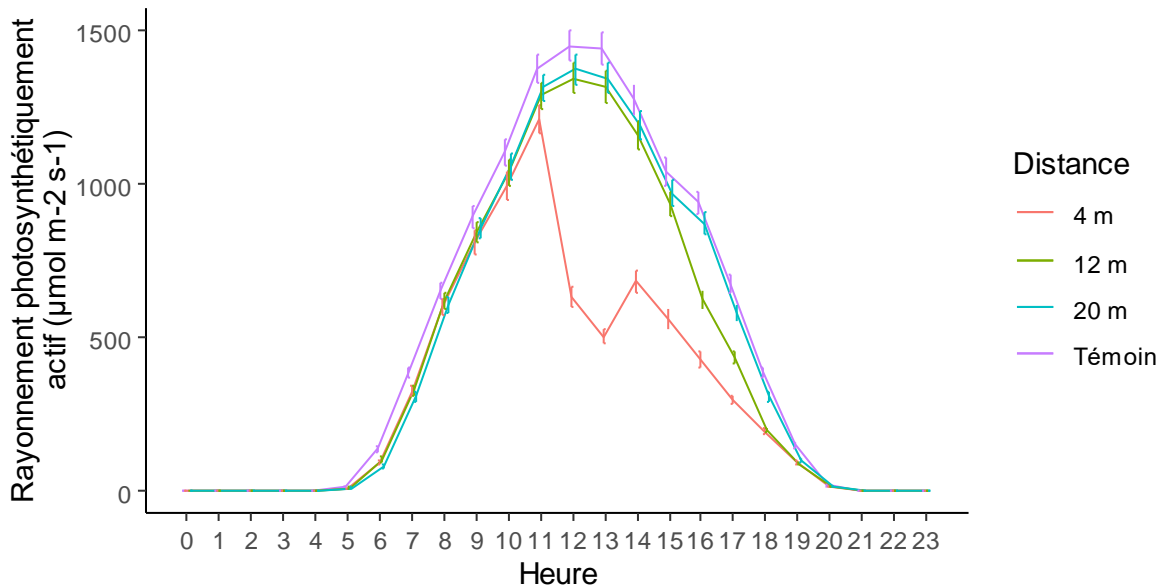


Figure 11. Rayonnement photosynthétiquement actif pour chaque heure de la journée à différentes distances de la rangée d'arbres dans le système agroforestier intercalaire à l'été 2021. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95 %.

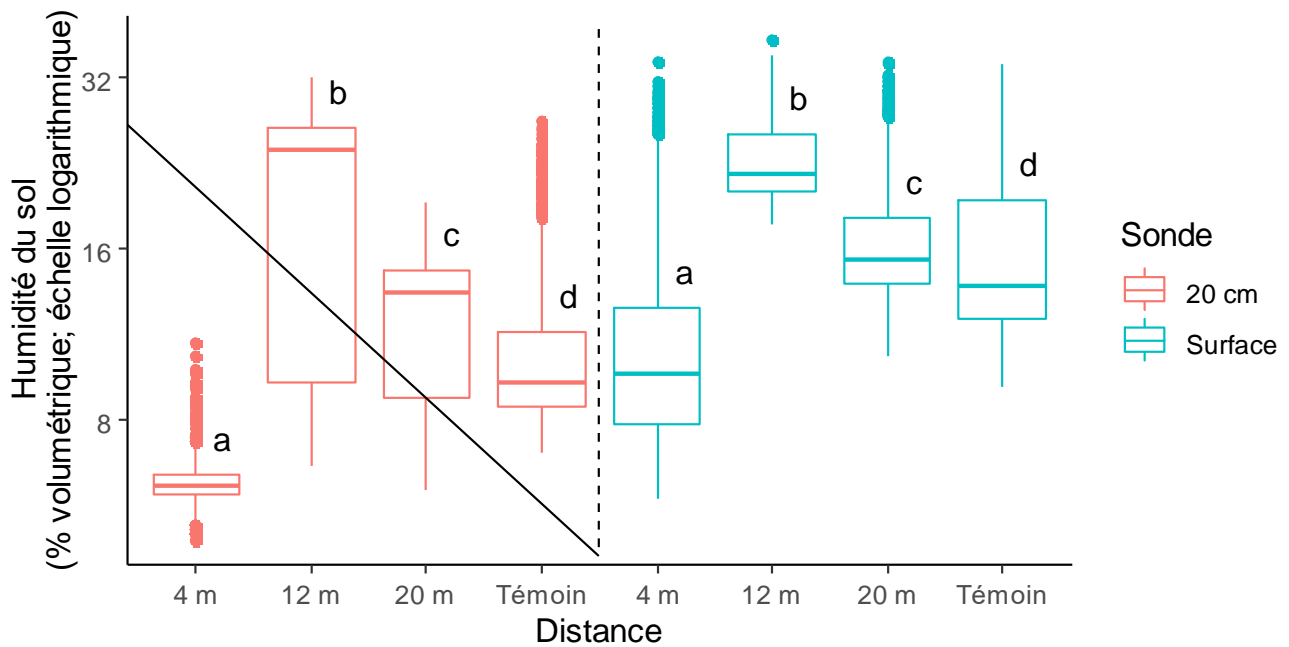


Figure 12. Humidité du sol en fonction de la distance pour la sonde à 20 cm de profondeur (rouge) et de surface (bleu) dans le système agroforestier intercalaire. Des tests de Welch ont été utilisés étant donné l'hétérogénéité des variances (pour chaque sonde : $p < 0,001$). Différentes lettres représentent une différence significative (test de Wilcoxon-Mann-Whitney avec correction de Bonferroni, $p < 0,001$). L'humidité mesurée était la plus basse à 4 m. Ceci suggère que les arbres, en 2021, ont exercé de la compétition pour l'eau en interceptant les précipitations à l'aide de leurs feuilles et/ou en absorbant l'eau directement avec leurs racines. Ce stress hydrique pourrait expliquer pourquoi la compétition racinaire est devenu un facteur limitant le rendement dans les parcelles sans cernage racinaire (figure 10). Cependant, l'humidité du sol était la plus élevée à 12 m des rangées d'arbres et même le sol des parcelles à 20 m était légèrement plus humide que celui des témoins. Ce résultat indique que près du centre des allées, l'eau est davantage conservée, probablement en raison d'une diminution de la vitesse du vent et de la température de l'air.

4.2 Croissance des arbres

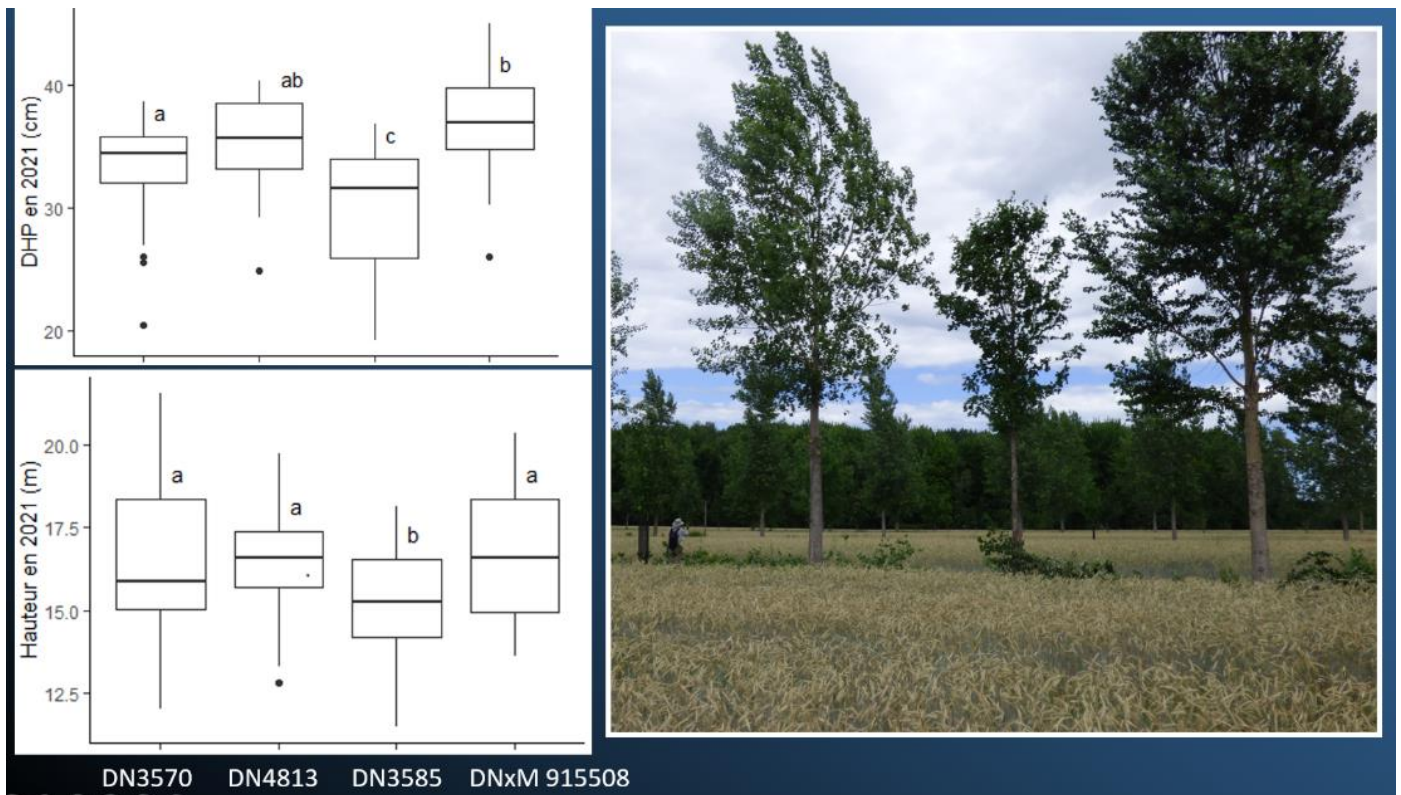


Figure 13. Diamètre à hauteur de poitrine (DHP, 1,3 m) et hauteur des peupliers hybrides 10 ans après plantation (2021) dans le système agroforestier intercalaire. Différentes lettres représentent une différence significative (test de Tukey, $p < 0.05$; $n = 24$ à 33 /clone). Le rythme de croissance en diamètre des peupliers (environ $3,5$ mm/an) permet d'anticiper une récolte à 13 ans pour billes de pieds d'environ 45 cm.

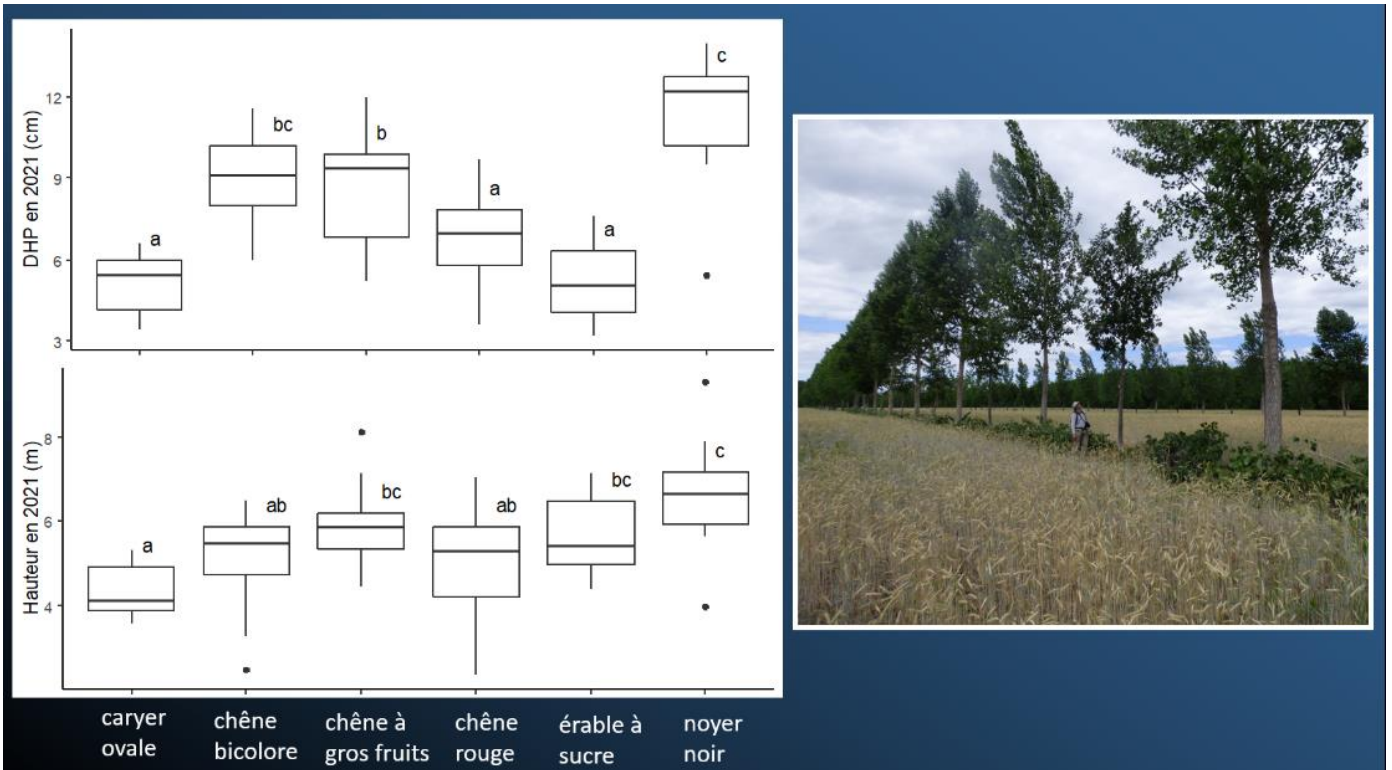


Figure 14. Diamètre à hauteur de poitrine (DHP, 1,3 m) et hauteur des feuillus nobles 10 ans après plantation (2021) dans le système agroforestier intercalaire. Différentes lettres représentent une différence significative (test de Tukey, $p < 0.05$; $n = 8$ à 16 /espèce). L'espèce ayant la croissance la plus rapide est le noyer noir et celle qui ayant la croissance la plus lente est le caryer ovale. Ces deux espèces produisent des noix comestibles. Un volume non négligeable pourra être généré dans quelques années.

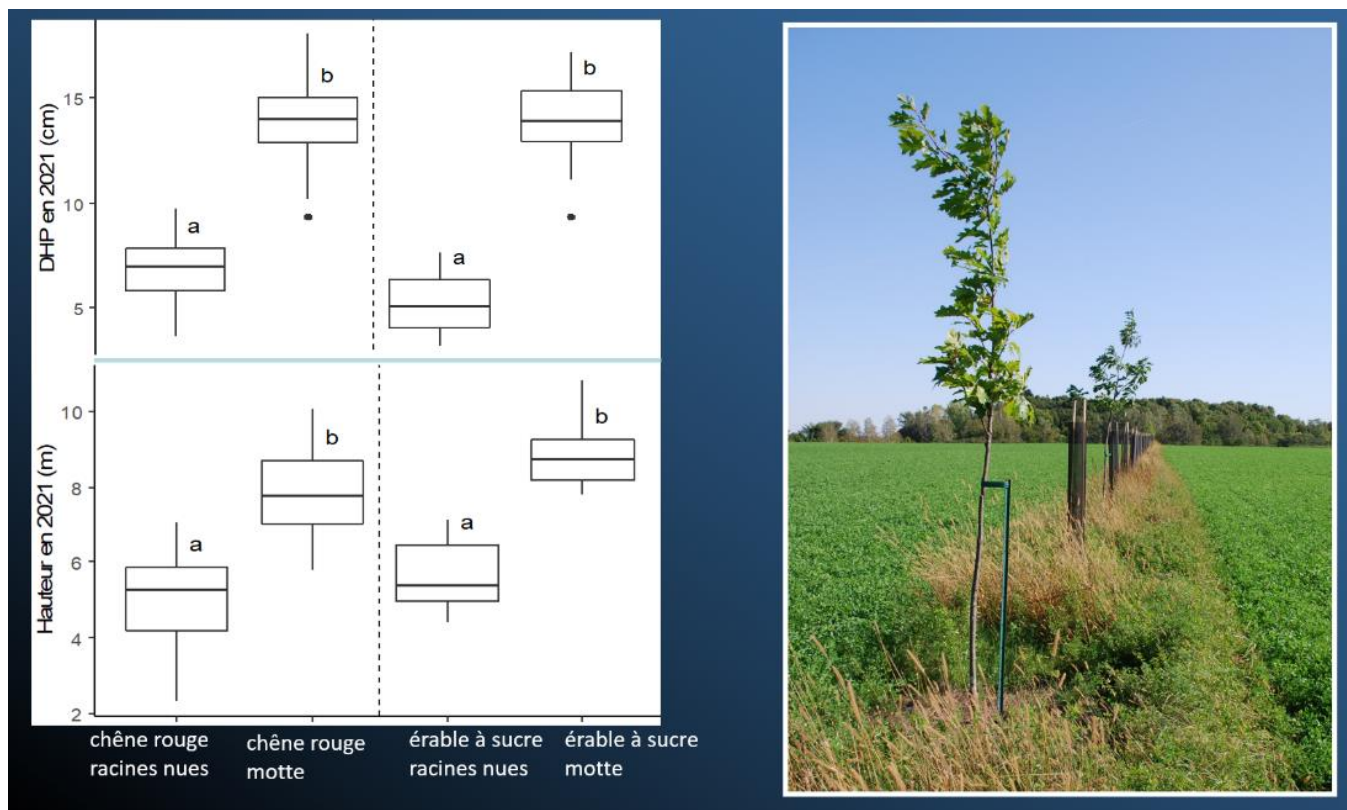


Figure 15. Diamètre à hauteur de poitrine (DHP, 1,3 m) et hauteur du chêne rouge et de l'érable à sucre 10 ans après plantation (2021) dans le système agroforestier intercalaire en fonction du type de plant utilisé à la plantation (motte - 300 cm vs racines nues - 125 cm). Différentes lettres représentent une différence significative (test de Tukey, $p < 0.05$; $n = 14$ à 18 /espèce). Les plants d'érable à sucre et de chêne rouge plantés en motte de terre ont aujourd'hui un diamètre qui est environ trois fois supérieur à celui des plants conventionnels. Les plants de très gros calibre coûtent plus chers, mais ils ne nécessitent pas de protecteurs contre les cerfs de Virginie, ce qui permet de faire des économies sur les coûts de protection des arbres.

4.3 Valeur économique du système agroforestier intercalaire (SAI)

Tableau 1. Valeur actuelle nette (VAN, \$/ha) sur un horizon d'analyse de 40 ans du SAI implanté à la ferme Bertco en fonction du taux d'actualisation, de paiements pour séquestration de carbone (C) dans les arbres et d'une aide financière couvrant 70 % des coûts d'implantation et d'entretien des arbres. La 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). La VAN du SAI est comparable ou supérieure à celle du système agricole témoin lorsque des paiements pour séquestration du carbone dans la biomasse des arbres et/ou des aides à l'implantation sont considérés.

	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 paiements de C et aide à l'implantation	18 050	12 790	9 510

Références pour en apprendre davantage sur les recherches à la ferme Bertco et sur les aspects techniques de l'aménagement des systèmes agroforestiers intercalaires

Anel, B., Cogliastro, A., Olivier, A., Rivest, D. 2017. Une agroforesterie pour le Québec. Document d'orientation et de réflexion, Comité agroforesterie du CRAAQ. CRAAQ, Québec. 73 p. <https://www.craaq.qc.ca/Publications-du-CRAAQ/une-agroforesterie-pour-le-quebec-document-de-reflexion-et-d-orientation/p/PAGF0102-PDF>

Carrier, M., Réhaume-Gonzalez, F.A., 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.

Cogliastro, A., Vézina, A., Rivest D. 2022. Guide d'aménagement de systèmes agroforestiers. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. 96 p.

Gagné, G., Lorenzetti, F., Cogliastro, A., Rivest, D. 2022. Soybean performance under moisture limitation in a temperate tree-based intercropping system. *Agricultural Systems* (en revision).

Rivest, D., Carrier, M., Gonzalez, F.-A., Olivier, A., Cogliastro, C. 2018. Développement de systèmes agroforestiers intercalaires de deuxième génération au Québec. Groupe interdisciplinaire de recherche en agroforesterie (GIRAF), Québec. <https://www.agrireseau.net/agroforesterie/documents/96790>

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., 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. <https://www.agrireseau.net/agroforesterie/documents/103985>

POINT DE CONTACT POUR INFORMATION

David Rivest, Ph.D., Université du Québec en Outaouais
david.rivest@uqo.ca 819-595-3900 Poste 2937

REMERCIEMENTS AUX COLLABORATEURS ET PARTENAIRES FINANCIERS

Nous remercions M. Jacques Côté (Ferme Bertco) pour son implication à toutes les étapes de ce projet. Nous remercions tous les chercheurs, professionnels de recherche et étudiants qui sont impliqués ou qui ont été impliqués dans les travaux de recherche : Alain Cogliastro, François Lorenzetti, Alain Olivier, Pierre-Luc Chagnon, Audrey Maheu, Marie-Noëlle Thivierge, Marc-Olivier Martin-Guay, Geneviève Gagné, Ève-Marie Hébert, Félix-Antoine Rhéaume Gonzalez, Maxime Carrier et Samuel Juneau.

Les recherches actuelles sur le site de la ferme Bertco sont réalisées en vertu du Programme d'appui à la lutte contre les changements climatiques en agriculture et elles ont bénéficié d'une aide financière du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation dans le cadre du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques.