
XIV^e CONGRES FORESTIER MONDIAL
Durban, Afrique du Sud, 7-11 septembre 2015

**Contribution de systèmes agroforestiers intercalaires à
l'adaptation aux changements climatiques des
agroécosystèmes**

A. Olivier¹, A. Paquette², A. Cogliastro³, A.N. Rousseau⁴, C. Messier^{2,5}, J.-P. Révéret², D. Rivest⁵, S.J. Gumiere¹, D.W. Hallema⁴, M. Alam¹, S. Domenicano², J. Dupras⁵, L. Bouttier³, E. Doblás-Miranda⁶, L.-M. Gagnon¹

¹ Université Laval, Québec, Canada, alain.olivier@fsaa.ulaval.ca

² Université du Québec à Montréal, Montréal, Canada

³ Institut de recherche en biologie végétale, Montréal, Canada

⁴ Institut national de la recherche scientifique, Québec, Canada

⁵ Université du Québec en Outaouais, Ripon, Canada

⁶ CREAM, Cerdanyola del Vallès, Espagne

Résumé

Un projet visant à déterminer la contribution potentielle de systèmes agroforestiers intercalaires à l'adaptation aux changements climatiques des agroécosystèmes du sud du Québec, au Canada, a été réalisé. Ce projet portait sur l'impact de ces systèmes sur la biodiversité, l'hydrologie, le microclimat, le rendement agricole et la rentabilité économique de l'agroécosystème en fonction de différents scénarios de changement climatique. Il comportait des expérimentations réalisées au champ, en serre et en laboratoire. Les variables mesurées portaient notamment sur le rendement de la culture, la croissance et les relations allométriques des arbres, la distribution racinaire, le rayonnement solaire, l'eau du sol, les propriétés biochimiques du sol, la résilience microbienne et la diversité des microarthropodes. Les services écosystémiques ont aussi été quantifiés et monétisés. Le développement et l'application de modèles ont permis de simuler l'évolution des systèmes agroforestiers selon divers scénarios de changement climatique. Les systèmes agroforestiers ont permis d'augmenter la résilience microbienne des sols et la productivité et la tolérance des cultures à la sécheresse. Bien que la production agricole soit plus élevée dans les systèmes conventionnels sous le climat actuel, la valeur économique totale des systèmes agroforestiers intercalaires est 2,4 fois plus élevée lorsqu'on tient compte des services écosystémiques qu'ils fournissent. La productivité relative totale (arbres et cultures) y est par ailleurs plus élevée que dans les monocultures agricoles et forestières séparées. Cet écart de productivité relative est accru avec les changements climatiques anticipés. Le rendement de la culture y est par ailleurs plus stable dans le système agroforestier. Les systèmes agroforestiers intercalaires présentent donc de grands avantages. Leur adoption à grande échelle pourrait limiter la dépendance des agriculteurs envers les programmes de gestion des risques.

Mots clés: agroécosystèmes, biodiversité, changements climatiques, distribution racinaire, hydrologie, productivité relative, résilience, systèmes agroforestiers intercalaires

Introduction, portée et principaux objectifs

Les changements climatiques pourraient avoir des conséquences considérables sur l'agriculture dans l'est du Canada. Parmi les impacts attendus de ces changements, on peut mentionner une élévation de la température, une modification du régime de précipitations (forme, fréquence et intensité) et diverses perturbations des écoulements (Quilbé *et al.* 2008; Rousseau *et al.* 2007) qui pourraient affecter négativement (mais parfois aussi positivement) le rendement des cultures et la rentabilité des exploitations agricoles (Bryant *et al.* 2007), sans compter une augmentation de la fréquence des événements météorologiques extrêmes (Shaver *et al.* 2000). Les changements climatiques pourraient aussi avoir des conséquences considérables sur le sol et les ressources hydriques. On s'attend notamment à une hausse du ruissellement et de l'érosion hydrique (Duchemin *et al.* 2004).

Or, les résultats d'études sur les effets des arbres en agriculture révèlent que les systèmes agroforestiers intercalaires pourraient être tout indiqués pour contribuer à l'adaptation des agroécosystèmes à ces changements. En effet, sous de tels systèmes, les arbres sont plantés en rangées largement espacées, ce qui permet la poursuite des activités agricoles intercalaires, tout en bénéficiant des produits sylvicoles (Rivest *et al.* 2009; Rivest *et al.* 2010). La diversification de l'agroécosystème entraîne des interactions complexes et variées qui permettent une meilleure productivité totale si la concurrence exercée par les arbres sur les cultures est bien gérée. Ce gain découle notamment de la complémentarité entre les arbres et les cultures pour l'utilisation de l'eau, des éléments minéraux et du rayonnement lumineux, ainsi que de leur impact bénéfique sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. Les bénéfices des systèmes agroforestiers intercalaires peuvent être encore plus importants si l'on tient compte de leurs divers services écosystémiques, par exemple la séquestration du carbone, le maintien de la biodiversité, l'amélioration de la qualité de l'eau et l'accroissement de la diversité des paysages ruraux. En fait, divers travaux ont montré que les systèmes agricoles ou forestiers diversifiés fournissent plus de services que ceux qui le sont moins (Duffy 2009; Paquette et Messier 2010, 2011), particulièrement dans les systèmes anthropiques, même les plus intensifs (Bennett et Balvanera 2007).

L'objectif du projet était de déterminer la contribution potentielle des systèmes agroforestiers intercalaires à la résistance et à la résilience des agroécosystèmes du sud du Québec face aux changements climatiques. Plus spécifiquement, il visait à déterminer l'impact de ces systèmes sur la biodiversité, l'hydrologie, le microclimat (eau, lumière, température), le rendement des cultures et la rentabilité économique de l'agroécosystème, en comparaison avec des systèmes agricoles conventionnels, sous le climat actuel et dans le contexte des changements climatiques anticipés. Il visait également à développer des outils d'aide à la décision et à élaborer des stratégies d'aménagement des agroécosystèmes qui soient appropriées face à différents scénarios de changements climatiques anticipés.

Méthodologie/approche

Le projet comportait des expérimentations réalisées principalement sur un site expérimental implanté en 2004 à Saint-Paulin, au Québec (Canada), combinant une culture intercalaire fourragère (*Phleum pratense* et *Trifolium pratense*) et des rangées de peupliers hybrides (*Populus deltoides x nigra*, DN 3570, arbres à croissance rapide) et de chênes rouges (*Quercus rubra*, feuillus nobles à croissance plus lente) espacées de 12 m (Rivest *et al.* 2009), ainsi que des expériences contrôlées en serre et en laboratoire.

Productivité des cultures et interactions avec les arbres

Dans ce premier volet, les variables mesurées, à différentes distances des rangées d'arbres et dans les témoins, portaient notamment sur : (i) la biomasse aérienne et la qualité de la culture (taux de protéines et taux de fibres aux détergents acide et neutre), (ii) la croissance et les relations

allométriques des arbres, (iii) la distribution racinaire (densité de longueur des racines fines des arbres et du fourrage à diverses profondeurs) et (iv) le rayonnement solaire (proportion de lumière disponible estimée à partir de photographies hémisphériques).

Hydrologie

Le contenu en eau dans le sol du même site a été mesuré à différentes profondeurs sur un transect perpendiculaire aux rangées d'arbres. Ces données ont été utilisées dans des modèles permettant de simuler le mouvement de l'eau dans le sol et le ruissellement de surface, sous le climat actuel et au cours de la période 2041-2070, selon divers scénarios de projections climatiques à l'échelle locale et ce à partir des échelles globales et régionales. On a notamment simulé l'écoulement variablement saturé, l'absorption d'eau par les racines et la transpiration à l'aide du modèle HYDRUS 2D (Šimůnek *et al.* 2011). L'érosion en nappe, l'érosion en rigoles et le piégeage des sédiments par les rangées d'arbres ont pour leur part été modélisés à l'échelle de la parcelle avec MHYDAS-Érosion (Gumiere *et al.* 2010).

Biodiversité

On a profité des tranchées creusées pour l'échantillonnage des racines pour procéder, en parallèle, à celui des microarthropodes, ce qui a permis de mettre en relation les données sur ces organismes, dénombrés et identifiés à l'espèce, avec celles des racines. La résilience microbienne à la sécheresse de sols provenant du même système agroforestier intercalaire et d'un site supplémentaire comportant une haie brise-vent implantée en 1994 à Rivière-Ouelle, au Québec, Canada, ainsi que de leurs témoins agricoles, a pour sa part été étudiée dans une expérience en laboratoire. Diverses variables biochimiques du sol (P extractible, N minéralisable, biomasse microbienne, respiration basale, qCO_2), ainsi que la réponse du blé (*Triticum aestivum*) cultivé en serre, dans des pots, dans des conditions de stress hydrique sur ces différents types de sols, ont été mesurées.

Services écosytémiques

Les services écosytémiques rendus par les systèmes agroforestiers intercalaires ont été quantifiés et monétisés à l'aide de divers modèles mathématiques. Pour le calage des modèles, des données provenant de systèmes agroforestiers intercalaires québécois, notamment celui de Saint-Paulin, ont été utilisées. Lorsque celles-ci étaient inexistantes, des données en provenance d'autres sites de climat tempéré situés le plus près possible de la réalité climatique et des pratiques culturelles québécoises, notamment de la station expérimentale de l'Université Guelph, en Ontario (Canada), ont été utilisées.

Modélisation biophysique

Dans ce dernier volet, le modèle Hi-sAFE, développé dans le cadre du projet européen SAFE (Dupraz *et al.* 2005), a été paramétré et validé pour le contexte québécois, à l'aide de données mesurées sur le site de Saint-Paulin. On a ensuite procédé à la simulation des agroécosystèmes à l'étude selon divers scénarios climatiques. Une centaine de simulations issues de modèles globaux et régionaux de climat ont fourni les données quotidiennes (température minimale et maximale de l'air, rayonnement global, précipitations, humidité relative minimale et maximale de l'air, vitesse du vent) nécessaires à Hi-sAFE. Ce modèle biophysique du fonctionnement des systèmes agroforestiers intercalaires permet le couplage, en trois dimensions et selon un pas de temps journalier, d'un modèle culture et d'un modèle arbre, en lien avec trois modules de répartition des ressources (lumière, eau et azote).

Résultats et discussion

Productivité des cultures et interactions avec les arbres

Les chênes et les peupliers ont développé des profils d'enracinement superficiels même en présence de la culture (Bouttier *et al.* 2014). Plus de 95% des racines fines se trouvent en effet dans les premiers 25 cm (chêne rouge), 45 cm (peuplier) et 35 cm (fourrage) du sol. La séparation spatiale des racines du chêne rouge et de la culture est cependant plus grande qu'avec le peuplier. La forte densité racinaire des arbres à proximité du tronc a réduit de 45 % celle de la culture fourragère dans les premiers cm du sol, entraînant une réduction de sa biomasse, particulièrement à proximité des peupliers.

L'analyse a néanmoins révélé que l'impact de la compétition racinaire sur le rendement agricole était mineur en comparaison avec la concurrence pour la lumière, ce qui est en accord avec les résultats d'autres études réalisées précédemment au Québec (Rivest *et al.* 2009). De meilleurs rendements agricoles ont ainsi été obtenus au centre des allées cultivées, malgré la présence des racines fines de peupliers. Alors que la diminution du rendement de la culture à 1,5 m de la rangée d'arbres (chênes rouges et peupliers confondus), par rapport au témoin, était de 42 et 60 %, en 2012 et 2011, respectivement, elle n'était que de 18 et 46 % à 3,5 m et de 5 et 23 % à 6 m. La gestion de la distribution (densité de plantation et éclaircie) et de la forme (taille et émondage) des arbres permettrait donc de maîtriser leur niveau de concurrence. De larges écartements entre les rangées (30 à 40 m), à l'image de ce qui se fait de plus en plus couramment en Europe, permettraient aussi de limiter la superficie où la culture est soumise à l'effet de la concurrence de l'arbre pour la lumière.

Les résultats ont par ailleurs montré que la qualité du fourrage était améliorée dans le système agroforestier intercalaire, par rapport au témoin sans arbre. Ainsi, la teneur en protéines du fourrage à 3,5 m de la rangée d'arbres y était significativement supérieure de 33 % à celle du témoin.

Hydrologie

L'analyse de la dynamique de l'eau dans les systèmes agroforestiers intercalaires indique que les différentes strates de végétation ont un impact significatif sur la circulation de l'eau du sol. Ainsi, l'eau qui coule le long du tronc des arbres sature le sol à leur base, puis trouve rapidement son chemin à travers les macropores qui sont situés à proximité. La dynamique de l'eau du sol est par ailleurs circonscrite principalement dans les 45 premiers cm du sol. Alors que l'humidité du sol s'est avérée limitante, en 2011, pendant 9 et 10 % du temps pour le chêne rouge et les plantes fourragères, respectivement, la capacité d'absorption d'eau du peuplier hybride lui a permis de maintenir en tout temps une pression permettant une extraction d'eau par son système racinaire. En 2012, le sol était plus humide et l'eau était disponible pour les plantes pendant toute la saison de croissance.

Cinq projections climatiques pour le Québec comprenant la période entre 2041 et 2070 indiquent un patron de changement dans les précipitations mensuelles et la température par rapport aux valeurs moyennes sur 30 ans pour la période 1970-2000. On pourrait assister à une diminution des précipitations (jusqu'à 15 %) en juillet et août, tandis que d'octobre à janvier, on assisterait à une augmentation comprise entre 1 et 25 %. Les températures quotidiennes pourraient augmenter de 0,8 à 5,2 °C de mars à mai.

En conséquence de ces changements climatiques, les simulations hydrologiques basées sur quatre scénarios climatiques (CGCM_3.1 A1b, CNRM-CM_3 A1b, MIROC_3.2-MEDRES et CRCM_4.2.3 A2) suggèrent que le sol deviendrait généralement plus sec alors qu'un cinquième scénario climatique (IRM-CGCM_2.3.2 A1b) induit des conditions généralement plus humides. Néanmoins, les variations simulées sont mineures, et l'eau est disponible 95 % du temps tant durant la période de mesure (2011-2012) que durant la période future simulée (2041-2070). Bien que le système agroforestier intercalaire pourrait subir des conditions plus sèches en réponse à des températures plus élevées et à une demande

accrue d'évaporation, ces changements n'entraîneraient pas nécessairement une augmentation du stress hydrique critique pour les arbres et la culture intercalaire au cours de la saison sans neige (Hallema *et al.* 2014).

Biodiversité

La distribution fine des microarthropodes du sol était fortement liée à la biomasse des racines des arbres et des cultures. Leur densité et leur diversité étaient particulièrement importantes avec le chêne rouge. Face à une augmentation des épisodes de sécheresse, les microarthropodes pourraient trouver dans les systèmes agroforestiers intercalaires davantage de ressources organiques nécessaires à leur survie et au maintien de leurs fonctions, très importantes pour l'agroécosystème (Doblas-Miranda *et al.* 2014).

Les systèmes agroforestiers ont par ailleurs montré une capacité à augmenter la résilience microbienne des sols. Comparativement aux sols des systèmes agricoles témoins, les sols des systèmes agroforestiers ont eu un effet favorable sur la productivité et la tolérance du blé à la sécheresse. Le sol sous les systèmes agroforestiers, en particulier à St-Paulin, a montré des quantités significativement plus élevées de phosphore extractible et d'azote minéralisable, par rapport au système agricole conventionnel (Rivest *et al.* 2013). Le quotient métabolique (qCO_2) y était quant à lui inférieur. Cela semble indiquer une plus grande efficacité d'utilisation du carbone disponible du sol par les communautés microbiennes (Anderson 2003) dans les systèmes agroforestiers, qui pourrait être attribuable à une plus grande diversité des communautés microbiennes qu'on y trouve (Lacombe *et al.* 2009). La biomasse aérienne et le nombre de grains par épi du blé étaient par ailleurs plus élevés dans les sols prélevés de systèmes agroforestiers que dans ceux prélevés de systèmes agricoles conventionnels lorsque les plants étaient soumis à une sécheresse (10 jours sans arrosage).

Services écosystémiques

Les systèmes agricoles conventionnels en climat actuel procurent un rendement agricole supérieur à celui des systèmes agroforestiers intercalaires (Alam *et al.* 2014). Cependant, la valeur économique totale des systèmes agroforestiers est 2,4 fois plus élevée lorsqu'on tient compte des services écosystémiques qu'ils fournissent. Leur marge annuelle totale (en moyenne sur 40 ans) a été évaluée à 2 645 \$ ha⁻¹ an⁻¹. Les services non marchands constituent plus de 60 % de cette valeur, avec 1 634 \$ ha⁻¹ an⁻¹, ce qui est plus élevé que la valeur des produits agricoles et du bois réunis. La valeur actuelle nette des produits agricoles était la plus élevée des services étudiés, suivie de celles de la qualité de l'eau, de la qualité de l'air, de la régulation du climat et du maintien de la qualité des sols. Bien que la valeur des services écosystémiques des systèmes agroforestiers intercalaires soit élevée, les agriculteurs ne bénéficient principalement eux-mêmes que des produits agricoles et du bois. Des mesures incitatives pourraient les aider à adopter ces systèmes qui offrent des bénéfices à toute la société.

Modélisation biophysique

L'analyse par simulation a permis de démontrer les effets positifs importants des systèmes agroforestiers intercalaires. La productivité relative totale (arbres et cultures) est plus grande dans ces systèmes que lorsque les monocultures agricoles et forestières sont cultivées de façon séparée. Cet écart de productivité relative est accru avec les changements climatiques anticipés. Les gains de productivité de l'arbre permettent en effet de compenser largement pour le rendement du blé qui, bien qu'il diminuerait globalement dans les scénarios de changements climatiques, est largement plus stable en système agroforestier.

Conclusion

Face aux conséquences considérables qu'entraîneront les changements climatiques pour le secteur agricole et considérant l'intérêt croissant manifesté envers les services écosystémiques, les systèmes agroforestiers intercalaires présentent de grands avantages dans le contexte québécois, notamment grâce à un rendement plus stable des cultures et à la résilience des processus écosystémiques mis en jeu dans ces systèmes. L'adoption à grande échelle de systèmes agroforestiers intercalaires dans le sud du Québec pourrait notamment permettre de limiter la dépendance des agriculteurs envers les programmes de gestion des risques.

Remerciements

Ces travaux ont été rendus possibles grâce à l'appui financier du Consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques (Ouranos), à travers le Fonds Vert Québec.

Les opinions exprimées dans ce produit d'information sont celles du/des auteur(s) et ne reflètent pas nécessairement les vues ou les politiques de la FAO.

Références

1. Alam M, Olivier A, Paquette A, Dupras J, Revéret J-P, Messier C. 2014. A general framework for the quantification and valuation of ecosystem services of tree-based intercropping systems. *Agroforestry Systems*, 88 (4): 679-691.
2. Anderson TH. 2003. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 98: 285-293.
3. Bennett EM., Balvanera P. 2007. The future of production systems in a globalized world. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(4): 191-198.
4. Bouttier L, Paquette A, Messier C, Rivest D, Olivier A, Cogliastro A. 2014. Vertical root separation and light interception in a tree-based intercropping system of Eastern Canada. *Agroforestry Systems*, 88: 693-706.
5. 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*. Montréal : Ressources Naturelles Canada, Ouranos.
6. Doblás-Miranda E., Paquette A, Work TT. 2014. Intercropping trees' effects on soil oribatid diversity in agro-ecosystems. *Agroforestry Systems*, 88: 671-678.
7. Duchemin M, Rousseau AN, Majdoub R, Quilbé R. 2004. Impacts potentiels des changements climatiques sur l'érosion hydrique des sols. *Vecteur Environnement*, 37(4): 26-32.
8. Duffy JE. 2009. Why biodiversity is important to the functioning of real-world ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(8): 437-444.
9. Dupraz C, Burgess PJ, Gavaland A, Graves AR, Herzog F, Incoll LD, Jackson N, Keesman K, Lawson G, Lecomte I, Liagre F, Mantzanas K, Mayus M, Moreno G, Palma J, Papanastasis V, Paris P, Pilbeam D, Reisner Y, van Noordwijk M, Vincent G, van der Werf W. 2005. *Synthesis of the SAFE (Silvoarable Agroforestry for Europe) project*. Montpellier: SAFE.

10. Gumiere S, Raclot D, Cheviron B. 2010. MHYDAS-Erosion: a distributed single-storm water erosion model for agricultural catchments. *Hydrological Processes*, 25(11), pp.1717–1728.
11. Hallema DW, Rousseau AN, Gumiere SJ, Périard Y, Hiemstra PH, Bouttier L, Fossey M, Paquette A, Cogliastro A, Olivier A. 2014. Framework for studying the hydrological impact of climate change in an alley cropping system. *Journal of Hydrology*, 517: 547-556.
12. Lacombe S, Bradley RL, Hamel C, Beaulieu C. 2009. Do tree-based intercropping systems increase the diversity and stability of soil microbial communities? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 131(1-2): 25-31.
13. Paquette A, Messier C. 2010. The role of plantations in managing the world's forests in the Anthropocene. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 8(1): 27-34.
14. Paquette A, Messier C. 2011. The effect of biodiversity on tree productivity: from temperate to boreal forests. *Global Ecology & Biogeography*, 20: 170-180.
15. Quilbé R, Rousseau AN, Moquet J-S, Savary S, Ricard S, Garbouj MS. 2008. Hydrological response of a watershed to historical land use evolution and future land use scenarios under climate change conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12:101-110.
16. 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 & Environment*, 131(1-2): 51-60.
17. Rivest D, Olivier A, Gordon A. 2010. *Hardwood Intercropping Systems: Combining Wood and Agricultural Production While Delivering Environmental Services*. Québec: Agriculture and Agri-Food Canada.
18. Rivest D, Lorente M, Olivier A, Messier C. 2013. Soil biochemical properties and microbial resilience in agroforestry systems: effects on wheat growth under controlled drought and flooding conditions. *Science of the Total Environment*, 463-464: 51-60.
19. Rousseau A, Quilbé R, Savary S, Ricard S, Moquet J-S, Garbouj MS, Duchemin M. 2007. *Vulnérabilité de l'agriculture en réponse aux changements climatiques: étude de l'influence passée et future de l'occupation agricole du territoire sur le régime hydrologique et la qualité de l'eau d'un bassin versant, à l'aide d'un système de modélisation intégré*. Québec: INRS-ETE.
20. Shaver GR, Canadell J, III FSC, Gurevitch J, Harte J, Henry G, Ineson P, Jonasson S, Melillo J, Pitelka L, Rustad L. 2000. Global Warming and Terrestrial Ecosystems: A Conceptual Framework for Analysis. *BioScience*, 50(10): 871-882.
21. Šimůnek J, Van Genuchten MT, Šejna M. 2011. *The HYDRUS software package for simulating two- and three-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media. Technical manual, version 2.0*. Prague: PC Progress. 258 pp.