

Numéro de projet : 554012–111

Titre du projet : **Contribution de systèmes agroforestiers multifonctionnels à la capacité d'adaptation aux changements climatiques des agro-écosystèmes**

Nom du chercheur principal et affiliation : Alain Olivier / Université Laval

Rapport synthèse final

Juin 2013

Ce rapport est présenté en synthèse des rapports et publications scientifiques en annexes disponibles sur demande auprès du chercheur. Le lecteur pourra référer à ces différents documents pour plus de détails.

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas Ouranos ni ses membres.



Table des matières

1. Introduction	1
2. Contexte / objectifs	3
3. Méthodologie / données.....	9
4. Résultats et discussion	15
5. Conclusion et recommandations	27
6. Références	31
Annexes.....	34

1. Introduction

Les changements climatiques pourraient avoir des conséquences considérables sur les rendements des cultures et les pratiques agricoles québécoises. Il est de plus en plus reconnu à travers le monde que l'implantation d'arbres sur les terres agricoles au moyen de systèmes agroforestiers fournit des services écologiques diversifiés et peut atténuer les effets négatifs des changements climatiques appréhendés pour les prochaines décennies. Leur structure particulière, intermédiaire entre celles des monocultures agricoles et des écosystèmes naturels complexes, permet une meilleure exploitation des ressources du milieu en raison de l'effet de complémentarité entre l'arbre 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 modèles agroforestiers sont encore peu connus au Québec, mais sont bien établis en Europe, aux États-Unis et en Chine.

Le projet avait pour objectif général de déterminer la contribution potentielle de systèmes agroforestiers multifonctionnels à la tolérance des agroécosystèmes du sud du Québec face aux changements climatiques. Plus spécifiquement, il visait à déterminer l'impact de systèmes agroforestiers sur la biodiversité, sur le microclimat (eau, lumière, température), sur le rendement agricole et sur la rentabilité économique de l'agroécosystème, en comparaison avec des systèmes agricoles conventionnels, aujourd'hui 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. La multifonctionnalité anticipée de tels systèmes réfère aux nouvelles fonctions attendues de la présence des arbres, notamment : économique, par la production ligneuse (diversification de la production); écologique, par la diversité spécifique et d'occupation de l'espace aérien et souterrain (diversité de structure) qui auraient des impacts environnementaux favorables ; et sociale, par exemple par le rehaussement de la qualité esthétique du paysage.

Il est de plus en plus reconnu à travers le monde que l'implantation d'arbres sur les terres agricoles au moyen de systèmes agroforestiers fournit des services écologiques diversifiés et peut atténuer les effets négatifs d'événements climatiques extrêmes (Limoges 2009). Elle permet de lutter contre les effets néfastes du vent, notamment l'érosion éolienne des sols, de réduire l'amplitude thermique, d'augmenter l'infiltration de l'eau dans le sol, de favoriser les

insectes pollinisateurs et prédateurs et d'augmenter la biodiversité comparativement à des systèmes agricoles conventionnels.

Or, parmi les impacts attendus des changements climatiques, on retrouve une élévation de la température, une modification du régime de précipitations et diverses perturbations qui pourraient affecter négativement (mais parfois aussi positivement) le rendement des cultures et la rentabilité des exploitations agricoles (Bryant et al. 2007, Rousseau 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 ainsi à une hausse du ruissellement et de l'érosion hydrique (Duchemin et al. 2004). Des changements surviendraient aussi dans la forme (pluies, neiges), la fréquence et l'intensité des précipitations, ce qui pourrait avoir une influence déterminante sur le milieu agricole, les pluies diluviennes pouvant entraîner des problèmes récurrents de ruissellement et d'érosion hydrique des sols. Parallèlement, divers travaux ont mis en évidence 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).

Parmi les systèmes agroforestiers des régions tempérées, les systèmes de cultures intercalaires sont sans doute ceux qui représentent le mieux ce que peut être une combinaison arbre - culture en agroforesterie. Dans ces systèmes, les arbres sont implantés en rangées largement espacées, permettant la poursuite des activités agricoles tout en bénéficiant des services écologiques des arbres et d'une production de bois (Rivest et Olivier 2007, Rivest et al. 2009, Rivest et al. 2010). Ces modèles agroforestiers sont encore peu connus au Québec, mais sont de plus en plus adoptés dans certains pays d'Europe comme en France. Les haies brise-vent, quant à elles, sont des systèmes agroforestiers plus répandus au Québec et, de par leur fréquence, elles présentent un grand potentiel pour mesurer et comprendre l'effet de la présence des arbres en paysage agricole.

2. Contexte / objectifs

La diversification de l'agrosystème entraîne des interactions complexes et variées (compétition, complémentarité, facilitation...) entre ses composantes aux niveaux aérien et souterrain. Théoriquement, les systèmes de culture intercalaire (SCI) bénéficieront d'une productivité totale améliorée si les arbres ont la capacité de capter leurs ressources dans d'autres horizons du sol que ceux utilisés par les cultures intercalaires. En science de la biodiversité, cet effet est appelé "complémentarité de niche" (ou partition de niche), par lequel des espèces contrastées arrivent ensemble à mieux exploiter les ressources d'un milieu par rapport à leurs monocultures respectives.

Bien que l'agroforesterie dans les régions tempérées ait pris de l'ampleur dans les dernières décennies (Likens et al. 1994, Graves et al. 2007), nous trouvons toujours des lacunes importantes dans la littérature scientifique sur les techniques agroforestières relatives à notre région tempérée québécoise. Étant donné que l'agroforesterie n'est pas une pratique courante au Québec et que les expérimentations sur le terrain sont rares et limitées par la lente maturation des arbres, la modélisation apparaît d'autant plus nécessaire. Le développement de modèles mécanistes est considéré comme un point clé pour intégrer des connaissances propres à un site ou un climat en particulier, pour améliorer la compréhension des interactions arbres/cultures, et pour concevoir des systèmes agroforestiers productifs (Likens et al. 1994, Muetzelfeldt 1995, Ellis et al. 2004). Ainsi le projet comportait l'adaptation au Québec d'un modèle agroforestier développé en Europe. Les objectifs du présent projet s'articulaient autour de cinq thèmes (volets) correspondant aux différentes sphères d'interaction entre les arbres et les cultures, de même qu'à la phase de simulation considérant différents scénarios de changements climatiques.

Un premier volet a donc cherché à documenter les effets réels des arbres sur les cultures avec comme site d'étude le seul dispositif expérimental au Québec d'âge assez avancé pour mesurer de tels effets (St-Paulin - détails suivent). La proportion de lumière transmise aux cultures ainsi que le rendement et la qualité des cultures y ont été évalués. Ce volet s'est aussi, et surtout, intéressé à évaluer les interactions racinaires entre les arbres et les cultures. La structure particulière des systèmes de cultures intercalaires, intermédiaire entre celles des monocultures agricoles et des écosystèmes naturels complexes, permet une meilleure

exploitation des ressources du milieu en raison de l'effet de complémentarité entre l'arbre et les cultures pour l'utilisation de l'eau, des éléments minéraux et du rayonnement lumineux, ainsi que de leurs impacts bénéfiques sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. La connaissance et la maîtrise des interactions racinaires entre les arbres et les cultures sont fondamentales au succès de tout projet en agroforesterie et de son adoption par les producteurs agricoles. En effet, ces derniers perçoivent souvent négativement les racines des arbres qui peuvent interférer avec celles des cultures agricoles. L'hypothèse testée est que les arbres et les cultures occupent des niches racinaires différentes, et donc complémentaires.

L'évolution temporelle d'un peuplement fourrager en système agroforestier détermine à la fois sa qualité nutritive, sa productivité et ses fonctions écologiques. La colonisation des peuplements fourragers par les mauvaises herbes, bien que peu désirable dans plusieurs situations, est une fin inévitable de toute prairie renouvelée peu fréquemment ou incorrectement. L'effet des arbres sur le rendement et la qualité fourragère est dépendant de l'environnement dans lequel la prairie évolue. Le système agroforestier en tant que milieu d'évolution d'un peuplement fourrager peut se traduire par une certaine compétition des ressources au fur et à mesure que les arbres gagnent en maturité (e.g. Benavides et al. 2009). Il est probable que l'évolution du peuplement fourrager se dirige donc vers une composition plus tolérante à cette compétition et donc mieux adaptée pour produire de façon acceptable dans ces conditions. Ces constatations ont été faites ailleurs auparavant et sont à l'origine de programmes de sélection d'espèces fourragères tolérantes à la compétition des arbres en système agroforestier (Buergler et al. 2005). Par ailleurs, le milieu agroforestier induit une réponse physiologique des cultures qui diffère spatialement à l'intérieur des allées cultivées. Cette réponse est différente d'une espèce à l'autre et même d'une variété à l'autre au sein de la même espèce.

L'hypothèse proposée peut donc être divisée en deux points. Le premier est que le milieu agroforestier est à même de guider l'évolution d'un peuplement fourrager vers un équilibre plus productif malgré le manque de lumière, de même que plus résistant et résilient aux aléas climatiques. Le second est que le milieu agroforestier offre des conditions environnementales poussant les plantes vers un état physiologique où leur qualité nutritive est plus élevée que lorsque ces mêmes plantes se développent en milieu ouvert.

Nous nous sommes aussi intéressé à faire une méta-analyse des données tirées de 27 études publiées entre 1989 et 2011 et menées dans d'autres biomes à travers le monde, où on a mesuré l'impact des arbres matures isolés en systèmes sylvopastoraux sur le rendement des plantes herbacées en prairie pâturée. Nous avons émis l'hypothèse que la direction et la magnitude de l'effet des arbres isolés dépendent du groupe fonctionnel d'arbre et varie le long d'un gradient de précipitations.

Les systèmes de cultures intercalaires influencent les variables météorologiques locales ainsi que la distribution de l'eau dans le sol et à la surface du sol, ce qui est un facteur clé dans la croissance et la survie des arbres et des cultures et a donc fait l'objet d'un **second volet** de l'étude. Si les arbres sont en mesure de redistribuer l'eau à partir de couches avec une faible disponibilité en eau (en dessous du point de flétrissement) dans les couches supérieures du sol où les arbres et les cultures absorbent l'eau, les deux sont plus susceptibles de survivre et de maintenir des taux de croissance élevés au cours de la période sèche (Plamboeck et al. 1999). La culture intercalaire a également un effet sur l'érosion, en fonction de son type. La culture de plantes annuelles diminue la quantité de matière organique du sol, et peut conduire à une érosion accrue, en particulier sur les pentes avec un gradient élevé (Kremer et Kussman 2011). Les cultures pérennes permettent d'autre part de maintenir une couverture continue tout au long de l'année, ce qui diminue le détachement des particules du sol lors des pluies et une maximisation de l'infiltration. À l'échelle du champ, les rangées d'arbres peuvent se comporter de la même manière que les filtres de végétation le long des cours d'eau, le piégeage des sédiments et la prévention de l'évacuation de la charge en suspension (Gumiere et Rousseau 2011). En bref, il est fort probable que les systèmes de cultures intercalaires dans les basses terres du Saint-Laurent permettent un certain niveau de résistance à la sécheresse et à l'augmentation de l'intensité des pluies attendues pour cette région (Mailhot et al. 2007), tout en réduisant le risque d'érosion par l'eau et les dégâts aux cultures.

À la lumière de l'évolution des conditions environnementales causées par un changement du climat local, la présente étude visait à caractériser et évaluer l'hydrologie locale et la connectivité sédimentologique pour les conditions climatiques actuelles et les conditions simulées pour la période 2041-2070. Nos hypothèses sont les suivantes:

1. Les systèmes racinaires d'arbres dans un système de culture intercalaire améliorent la résilience des cultures entre les rangées d'arbres; et,
2. Les systèmes de culture intercalaire réduisent le risque d'érosion hydrique à l'échelle du champ.

Un troisième volet de l'étude visait à tester l'hypothèse d'une augmentation de la biodiversité dans les systèmes de cultures intercalaires, et de ses effets bénéfiques sur l'agroécosystème. Ce volet c'est effectué à deux niveaux. Dans un premier temps nous avons utilisé les microarthropodes du sol comme témoins d'une biodiversité qui pourrait varier selon la présence ou l'absence des arbres, et même selon leur distance, le tout étant relié à la litière des feuilles mais surtout aux racines. Les microarthropodes sont très liés à la rhizosphère et se déplacent peu, constituant un excellent témoin aux échelles temporelle et spatiale considérées dans cette étude. Par contre, ils sont habituellement étudiés dans les litières et il nous a donc fallu développer des méthodes particulières pour les extraire des sols minéraux.

Comparativement aux systèmes agricoles conventionnels, les systèmes de cultures intercalaires peuvent contribuer à augmenter les retours de matière organique au sol, grâce aux résidus de la biomasse aérienne des arbres et à la rhizodéposition, ce qui se traduit généralement par une augmentation de la biomasse microbienne et une activation de la minéralisation de l'azote (Kaur et al. 2000, Wojewoda et Russel 2003). Les systèmes de cultures intercalaires peuvent aussi augmenter la diversité des communautés microbiennes et des champignons mycorhiziens arbusculaires, comme l'ont révélé certaines études récentes réalisées au Québec et en Ontario (Lacombe et al. 2009, Bainard et al. 2012). Or, une amélioration des propriétés biochimiques et de la diversité microbienne du sol peut accroître sa résilience microbienne, c'est-à-dire la capacité de la biomasse microbienne à rétablir un fonctionnement ou un développement normal après une perturbation ou un stress sévère. Notre étude a vérifié l'hypothèse que les systèmes agroforestiers peuvent augmenter la résilience microbienne des sols comparativement aux systèmes agricoles conventionnels.

En agroforesterie, la productivité des cultures dépend d'une foule d'interactions complexes entre les arbres et les cultures. Par exemple, les arbres peuvent avoir un effet positif sur les cultures grâce à l'effet brise-vent qui permet notamment de diminuer la température du sol et de l'air, et d'augmenter l'efficacité d'utilisation de l'eau par les cultures agricoles (Brandle et al.

2004). Les arbres peuvent aussi améliorer la fertilité du sol (Scholes et Archer 1997). En revanche, les arbres peuvent entrer en concurrence pour la lumière et l'eau, ce qui peut être défavorable pour la croissance des cultures (Miller et Pallardy 2001, Rivist et al. 2009). En fait, toutes ces interactions surviennent probablement simultanément et, à notre connaissance, très peu d'études ont tenté d'isoler l'effet des propriétés biochimiques du sol sur la productivité des cultures. Nous avons émis l'hypothèse que les sols des systèmes agroforestiers peuvent avoir un effet positif sur la productivité des cultures comparativement aux sols de systèmes agricoles conventionnels. Il est aussi bien connu que la magnitude de l'effet du type d'utilisation de la terre sur la productivité agricole peut varier selon différentes perturbations ou stress affectant le sol (Banning et Murphy 2008, Unger et al. 2009). Nous avons donc posé la question suivante : l'effet du sol agroforestier sur la productivité des cultures peut-il varier en présence de stress hydriques sévères dans le sol?

Un quatrième volet de l'étude portait sur la quantification et, lorsque possible, la monétisation des biens et services écologiques privés et publics rendus par les systèmes de cultures intercalaires. Dix services écosystémiques des systèmes de cultures intercalaires au Québec ont été abordés. Les objectifs généraux comprenaient une analyse marginale de la valeur économique des services écosystémiques ainsi qu'une évaluation de la valeur actualisée de la prestation future des services pour une période de rotation de 40 ans. Nous avons utilisé un cadre analytique en quatre étapes. Dans la première nous avons identifié les services écosystémiques significatifs dans le contexte de notre étude. Pour ce faire nous avons fait un inventaire de tous les services possibles. Nous avons ensuite soumis cette liste à des experts pour en présélectionner 10 sur un total initial de 23. À titre d'exemple, bien que le bois de chauffage soit un service d'approvisionnement important dans plusieurs pays tropicaux, il l'est moins au Québec. Il a donc été retiré. Ainsi, cette liste finale de dix services écosystémiques était composée : de la régulation de la qualité des sols, de la qualité de l'eau, du climat, du maintien de la qualité de l'air, de la pollinisation, de la minéralisation des éléments nutritifs, de l'effet de brise-vent, du contrôle biologique, de la production agricole et de la production de bois d'œuvre. En deuxième lieu, nous avons quantifié les unités de production et leurs relations avec la fourniture de services. Dans la troisième étape, nous avons procédé à l'évaluation économique de chacun des services écosystémiques et de la somme de ceux-ci pour la durée d'une rotation (coupe finale des arbres). L'étape finale

consistait en l'extrapolation des résultats, l'examen des compromis et la formulation d'options de gestion.

Le dernier volet de l'étude s'est déroulé en parallèle mais devait aussi intégrer une partie des résultats précédents. Il s'agissait du calage d'un modèle informatique en agroforesterie, déjà bien implanté et validé en Europe, pour le sud québécois. Le volet avait pour objectif général de déterminer la contribution potentielle de systèmes agroforestiers à la résistance des agroécosystèmes du sud du Québec face aux changements climatiques à l'aide de modèles (systèmes experts).

Le premier objectif était de paramétrer et de valider, pour le Québec, le modèle Hi-SAFE (Dupraz et al. 2005) du projet SAFE (Silvoarable Agroforestry for Europe), essentiellement européen pour le moment. Une fois validé pour le Québec, le modèle a servi à tester divers scénarios d'implantation des systèmes de cultures intercalaires selon différentes hypothèses de changements climatiques. Le modèle nous permet aussi de contribuer au dialogue théorique sur les thèmes de complémentarité, de facilitation et de compétition dans les communautés de plantes. Mais l'intérêt principal de ce volet demeure la capacité de projection dans le futur selon différents scénarios de changements climatiques, afin d'observer l'influence de ces changements sur les interactions arbre/culture, et de tester l'hypothèse centrale à toute notre démarche, que la culture intercalaire pourrait dans un avenir rapproché contribuer positivement à la résilience et au maintien de la productivité des grandes cultures face aux changements climatiques anticipés au Québec.

3. Méthodologie / données

Pour faciliter cette partie plus technique du rapport nous reprenons la division par volet, chacun ayant procédé avec sa propre méthode.

Volet 1 - Racines et effets réels

Cette section portait sur la distribution des racines fines et les interactions entre la culture et les arbres, de même que sur la disponibilité de la lumière et le rendement et la qualité des cultures. Ces travaux ont été effectués sur le site expérimental de St-Paulin.

Le système de culture intercalaire à l'étude a été mis en place en 2004 et combine une culture intercalaire pérenne (fourrage composé de *Phleum pratens* et *Trifolium pratens*) à des rangées de peupliers hybrides (*Populus deltoides x nigra*, DN 3570, arbres à croissance rapide) alternées avec des rangées de chênes rouges et cerisiers tardifs (*Quercus rubra*; *Prunus serotina*, feuillus nobles à croissance plus lente) et espacées de 12 m. Le tout est répliqué quatre fois et inclut dans chaque cas un témoin sans arbres. La biomasse aérienne du fourrage (2011 et 2012), la composition floristique (2011 et 2012), ainsi que le taux de protéines, de fibres au détergent acide et de fibres au détergent neutre (2012) ont été mesurées à différentes distances des rangées d'arbres et dans les témoins. La proportion de lumière disponible pour la croissance du fourrage a été estimée à partir de photographies hémisphériques dans ces mêmes parcelles. Les densités de longueur des racines fines des arbres et du fourrage, combinés ou séparés, ont été déterminées avec la méthode par comptages d'impacts de racines sur un profil de sol (*Trench Profile Technique*). Des tranchées de 1,2 m de largeur par 1,3 m de profondeur ont été creusées à différents endroits dans chacun des blocs, de longueurs variables mais allant jusqu'à 12 m dans le cas des tranchées perpendiculaires aux rangées d'arbres. Pour déterminer l'effet de l'association arbre-culture sur les profils racinaires des deux espèces d'arbre (peuplier hybride et chêne rouge) et de la culture fourragère, les valeurs de densité de racines fines ont été comparées à différentes tranches de profondeur et à différentes distances des arbres.

Volet 2 - Hydrologie

À l'aide du même dispositif expérimental (St-Paulin), nous avons mesuré durant deux étés le contenu en eau dans le sol selon deux gradients de profondeur et de distance aux arbres (deux espèces). Ces données ont été utilisées dans des modèles pour comprendre et simuler le mouvement de l'eau dans le sol en agroforesterie, de même que le ruissellement de surface. L'approche a été divisée en cinq étapes :

1. Le travail de terrain: collecte de données météorologiques, des échantillons de sol et données d'humidité du sol au cours de deux campagnes de terrain en 2011 et 2012. L'humidité du sol a été mesurée avec 45 réflectomètres de fréquence (capteurs FDR) installés jusqu'à une profondeur d'un mètre le long d'un transect de 25 m perpendiculaire à deux rangées d'arbres.
2. L'analyse de la répartition spatiale des mouvements de l'eau dans le sol en utilisant l'interpolation.
3. L'analyse des données météorologiques et de la simulation du changement climatique pour 2041-2070 à St-Paulin.
4. Simulation de l'écoulement variablement saturé, absorption d'eau des racines et de la transpiration avec HYDRUS 2D/3D, selon trois scénarios:
 - i. Situation sur le terrain observée au cours de l'été et de l'automne de 2011;
 - ii. Situation sur le terrain observée durant l'été et l'automne de 2012, et :
 - iii. Scénario de changement climatique pour 2041-2070.
5. Simulation de l'influence des processus d'érosion hydrique à l'échelle de la parcelle avec MHYDAS-érosion: l'érosion en nappe, l'érosion en rigoles et le piégeage des sédiments par des rangées d'arbres dans les systèmes de culture intercalaire. L'approche de modélisation a été divisée en deux étapes:
 - a. Calage de MHYDAS-érosion sur les 2,5 km² du micro-bassin du Bras d'Henri représentatif de l'agriculture intensive dans la région de la Beauce au Québec,
 - b. Simulation de l'impact du système de culture intercalaire sur le piégeage des sédiments dans ce bassin versant en utilisant les valeurs des paramètres trouvées après calage. Deux scénarios ont été évalués pour le piégeage des sédiments:
 - i. Bras d'Henri sans système de culture intercalaire (situation actuelle du terrain),

- ii. Bras d'Henri avec système de culture intercalaire (scénario hypothétique).

Volet 3 - Biodiversité

Toujours à St-Paulin, nous avons profité des tranchées créées pour l'échantillonnage des racines pour procéder, en parallèle, à celui des microarthropodes. Cette approche présente l'avantage de pouvoir mettre en relation les données des microarthropodes avec celles des racines. L'extraction des organismes s'est fait par la technique de flottaison basée sur l'affinité des cuticules de microarthropode pour l'huile d'olive. Les organismes ont ensuite été prélevés, dénombrés et identifiés à l'espèce.

Pour l'objectif portant sur la résilience microbienne, nous avons récolté en juin 2012 des sols en systèmes agroforestiers et en systèmes agricoles conventionnels sur deux sites, l'un situé à Rivière-Ouelle (Bas-St-Laurent) et l'autre à St-Paulin (Mauricie). Le site de Rivière-Ouelle intègre un système de haie brise-vent mature de 19 ans implanté sur une argile limoneuse. Le site de St-Paulin intègre quant à lui un système de culture intercalaire de 9 ans implanté sur un loam sableux. La qualité biochimique des sols échantillonnés a été analysée à l'aide d'un nombre minimal de variables (P extractible, N minéralisable, pH, biomasse microbienne, respiration basale et qCO_2). Nous avons aussi évalué la capacité de résilience microbienne des sols grâce à une expérience en laboratoire, où les sols ont été soumis à différents stress hydriques. Parallèlement, une proportion de chaque échantillon de sol récolté sur les deux sites a été utilisée comme substrat de production pour une expérience de culture de blé en serre. Le blé a été cultivé jusqu'à sa pleine maturité. Dans cette expérience en serre, nous avons soumis les pots de blé à trois traitements d'irrigation initiés au stade de la floraison du blé : 1) irrigation optimale du blé, 2) arrêt de l'irrigation pendant 10 jours (sécheresse), 3) inondation du pot en continu pendant 10 jours.

Volet 4 - Services écosystémiques

Plusieurs méthodes existent pour déterminer la valeur économique de la biodiversité et des biens et services écologiques qu'elle permet de générer (Revéret et Webster 2002, Christie et al. 2006). Il existe actuellement, chez les décideurs, un intérêt marqué pour l'utilisation de méthodes fondées sur le transfert de résultats d'une zone à l'autre pour des problématiques comparables. Celle que nous avons retenue considère la valeur recherchée soit comme étant déjà révélée sur un marché réel (les dépenses de protection, d'entretien, de restauration d'un milieu, de transport, le prix des maisons, etc.) ou soit exprimée par des personnes dans le cadre d'un marché fictif auquel est soumis le service que l'on cherche à évaluer (Bateman et al. 2002). La méthode la plus connue dans cette catégorie est la « méthode contingente » dans laquelle on cherche à évaluer « globalement » la valeur des changements d'un écosystème par le biais d'une dimension la plus intégratrice possible. Malgré les nombreuses limites liées à certains biais qui ont été tous très bien analysés, la méthode est reconnue comme crédible par les tribunaux américains pour fournir des valeurs liés par exemple aux dégâts environnementaux. La méthode a été utilisée avec succès ici, par exemple dans un projet évaluant la variation de la valeur économique des services provenant de l'adoption de meilleures pratiques agricoles dans un bassin versant de Lanaudière (Revéret et al. 2009).

L'autre approche retenue est la méthode des « choix d'options répétés » (Adamowicz et al. 1998). Cette méthode décompose les changements que l'on doit analyser en attributs (qualité de l'eau selon une gradation des divers usages que l'on peut en faire; biodiversité des oiseaux selon des niveaux d'intérêts pour les ornithologues; biodiversité des poissons selon l'intérêt pour la pêche sportive, etc.). Cette technique d'expression des préférences de la population permet d'établir la hiérarchie des éléments naturels les plus valorisés.

Nous avons donc ici utilisé une variété de modèles mathématiques pour la quantification et la monétisation des différents services. Dans certains cas, des modèles existants ont pu être utilisés directement. Néanmoins, dans la plupart des cas, nous avons dû adapter des méthodes existantes à nos besoins. Pour le calage des modèles, nous avons utilisé le plus souvent possible des données en provenance de systèmes agroforestiers réels, comme celui de St-Paulin, le plus près possible de notre réalité climatique et de nos pratiques culturelles. Les nombreux travaux réalisés à la station expérimentale d'agroforesterie de l'Université Guelph ont aussi été forts utiles. Dans certains cas, nous avons par contre dû adapter des

données en provenance d'autres sites de climat tempéré pour combler l'absence d'information pour la région de l'est du Canada.

Volet 5 - Modélisation

Pour nous permettre de mieux comprendre la contribution potentielle de systèmes agroforestiers (systèmes de cultures intercalaires) à la résistance des agroécosystèmes du sud du Québec face aux changements climatiques, nous avons adapté le modèle Hi-sAFé, développé essentiellement dans le cadre du projet européen SAFE (Dupraz et al. 2005). Hi-sAFé est un modèle biophysique du fonctionnement de systèmes agroforestiers tempérés, associant arbres et grandes cultures, conçu avec l'hypothèse que le partage des ressources (lumière, eau et azote) au sein d'un système agroforestier est le déterminant majeur de sa productivité. Il propose un couplage en 3-D et au pas de temps journalier, par des modules de répartition de ces trois ressources, entre un modèle de culture et un modèle d'arbre.

Avant de soumettre le modèle Hi-sAFé à des scénarios de climat futur, il était impératif dans un premier temps de paramétrer et de valider le modèle pour le Québec. Pour ce faire, des données ont été mesurées sur le site de St-Paulin, le plus ancien site agroforestier expérimental au Québec. Des données extraites de la littérature ont aussi été utilisées pour bonifier le paramétrage étant donné un manque de sites expérimentaux. Une fois validé, le modèle nous permet d'effectuer des simulations en utilisant différents scénarios de climats (climat actuel versus climat futur) pour déterminer l'impact du climat sur l'évolution et la productivité du système agroforestier québécois.

La participation d'Ouranos a été ici essentielle pour la production des différents scénarios climatiques. Un total de 102 simulations issues de modèles globaux et régionaux de climat étaient disponibles pour fournir les données quotidiennes nécessaires au modèle Hi-sAFé : la température de l'air (minimum et maximum en degré C), le rayonnement global (MJ.m^{-1}), les précipitations (mm), les minimums et maximums d'humidité relative de l'air (%) et la vitesse du vent. Afin de maximiser l'étendue des réponses possibles, tout en minimisant la quantité de simulations nécessaires pour représenter la variabilité, une analyse par grappe a été effectuée. Notre analyse par grappe regroupe les simulations disponibles par famille (résultats similaires), sur la base de 4 critères choisis et pondérés (poids entre parenthèses) selon leur impact sur les rendements : 90^e percentile de la température maximale d'avril à octobre (40),

90^e percentile de la température minimale de mars à mai (40), le nombre d'épisodes de précipitations de plus de 25 mm en 24 heures (10), le nombre d'épisodes de précipitations consécutives de moins de 2 mm en 24 heures (10). Les résultats d'analyse par grappes ont révélé que 5 simulations climatiques couvriraient 74,5 % de la variance totale des résultats de l'ensemble des 102 simulations, selon les 4 critères choisis. Notez que les 4 critères analysés par grappe sont en fait les changements des résultats entre les 2 périodes simulées (1971-2000 et 2041-2070). En raison de contraintes de temps, nous avons fusionné les cinq simulations climatiques en une seule, faisant la moyenne des valeurs delta pour chaque entrée météorologique qui sera dorénavant appelée climat futur.

En outre, nous avons également décidé de faire des simulations de systèmes agroforestiers futurs en utilisant des scénarios climatiques plus « extrêmes ». Quatre autres scénarios climatiques ont été testés. À la différence des cinq scénarios précédents qui ont été choisis pour couvrir la variance autant que possible, ces simulations climatiques « extrêmes » ont été choisies pour tester les extrêmes des changements de certaines variables climatiques, de façon indépendante. Ces scénarios sont : 1) augmentation de la température maximale, 2) augmentation de la température minimum, 3) augmentation maximale du nombre de sécheresses, et 4) augmentation maximale de ces trois facteurs (changement climatique extrême). Cela nous permettra d'évaluer comment le modèle Hi-sAFé répond à chacune des variables climatiques (analyse de sensibilité) et donc de comprendre plus en détail l'impact de chaque variable climatique sur les systèmes agroforestiers. Nous appelons ces scénarios « extrêmes », parce que même s'ils sont parmi les scénarios climatiques possibles, ils sont choisis en raison du fort écart entre les valeurs météorologiques du présent et celles du futur.

4. Résultats et discussion

Productivité et qualité des cultures, et interactions avec les arbres

L'étude n'a pas démontré d'enracinement plus profond des arbres en présence de la culture intercalaire, mais plutôt des profils superficiels à l'instar de nombreuses espèces d'arbres en plantations conventionnelles, ou même en milieu naturel. Plus de 95% des racines fines sont en effet accumulées dans les premiers 25 cm (chêne rouge), 45 cm (peupliers hybrides) et 35 cm (fourrage) de sol. Une séparation spatiale existe tout de même entre les systèmes racinaires des chênes rouges et de la culture intercalaire, laquelle alloue 17% plus de racines fines que les arbres entre 0 et 10 cm, et 22% moins entre 10 et 20 cm. Le peuplier hybride ne présentait pas de plasticité racinaire à l'effet de compétition apporté par la culture intercalaire comme nous l'avions anticipée. La forte densité racinaire de surface à proximité du tronc a entraîné une diminution de 45% de la densité racinaire de surface du fourrage, suggérant une forte compétition pour les ressources du sol. L'étude du rendement agricole a d'ailleurs révélé des réductions de biomasse fourragère, particulièrement à proximité des peupliers hybrides. Cependant, les résultats d'une analyse en composantes principales suggèrent un impact secondaire de la compétition racinaire sur le rendement agricole, et une plus grande importance de la compétition pour la lumière. Ceci explique les meilleurs rendements agricoles obtenus au centre des allées cultivées, malgré la présence des racines fines de peupliers hybrides.

L'impact des peupliers à croissance rapide sur la culture est plus grand que celui des chênes rouges, tant au niveau aérien qu'au niveau souterrain. Cependant, leur réseau racinaire plus dense et plus large peut être considéré comme un atout sur le plan environnemental en séquestrant plus de carbone et pouvant mieux accomplir les fonctions de filets de sécurité et de pompes hydrauliques. Aussi, ils seront récoltés plus rapidement et l'espace libéré favorisera la croissance de la culture intercalaire. Cet aspect dynamique des systèmes agroforestiers les rapprochent des écosystèmes naturels et devrait être pris en compte et approfondi pour leur succès futur.

Un sujet récurrent lors de discussions concernant la culture intercalaire agroforestière et les systèmes silvopastoraux est la réduction de la productivité des cultures. La réponse tirée de la littérature favorise généralement les systèmes agroforestiers pour la performance en

production totale de biomasse. Toutefois, dans les systèmes de cultures intercalaires intégrant des arbres matures, il est bien rare que les résultats ne montrent pas une baisse de rendements des cultures sur les surfaces cultivées entre les arbres. Cette perte de rendement s'ajoute à la perte d'espace cultivé que représentent la rangée d'arbres et sa bande non cultivée. Dans le système de culture intercalaire de St-Paulin, les arbres ont atteint une taille où ils ont un effet considérable sur la culture fourragère. Il est important de considérer la variabilité dans la production d'année en année. Celle-ci est d'une importance particulière en élevage. Il pourrait s'avérer une manœuvre prudente pour l'agriculteur d'augmenter ses superficies cultivées pour compenser la perte de rendements associée aux arbres si ces derniers permettent de stabiliser la récolte d'année en année (voir à ce sujet les résultats probants en simulation ci-bas).

Une diminution significative de 42 et 60 %, pour 2012 et 2011 respectivement, du rendement a été observée à 1,5 m de la rangée d'arbres (chênes rouges et peupliers hybrides confondus). Cette diminution est toutefois attribuable au fait que cette zone (1,5 m) empiétait souvent dans la bande non cultivée. Ainsi, nous jugeons que les valeurs de rendement à 3,5 et 6 m de la rangée d'arbres sont plus fiables que celles à 1,5 m. Nous avons mesuré une diminution du rendement de 18 et 46 % à 3,5 m de la rangée d'arbres et de 5 et 23 % à 6 m, en 2012 et 2011 respectivement. Ainsi, l'augmentation des rendements à mesure que l'on s'éloigne de la rangée d'arbres est considérable. Puisque l'écartement entre les rangées d'arbres ne fait que 12 m sur le site de St-Paulin, ce qui est nettement inférieur aux écartements utilisés dans les plus récents systèmes implantés au Québec (30 à 40 m), il a été impossible de déterminer à partir de quelle largeur les pleins rendements peuvent être obtenus pour cette culture fourragère.

L'effet de l'arbre sur la culture ne se limite pas aux différences de productivité. La plante fourragère réagit à la présence des arbres, principalement à la diminution de la lumière et de la température. Cette réponse, différente pour chaque espèce et chaque culture, modifie la qualité de la plante cultivée. L'analyse des différents indicateurs de qualité fourragère suggère une meilleure qualité de fourrage produite en système de culture intercalaire comparativement au témoin sans arbres. Par exemple, la teneur en protéines du fourrage à 3,5 m de la rangée d'arbres était significativement supérieure de 33 % à celle dans le témoin. L'augmentation de la concentration de protéines serait majoritairement le résultat d'un retard dans la maturation

des plantes poussant près des arbres. Une autre réponse physiologique susceptible d'augmenter la concentration en protéines serait un investissement plus important de la plante dans une machinerie photosynthétique plus efficace, en réaction à la disponibilité plus faible de lumière.

La baisse de rendements en masse sèche observée est donc associée à une augmentation comparable de la concentration en protéines, peu importe la distance de la rangée d'arbres, de même que dans le témoin sans arbres. On observe même une tendance vers l'augmentation de la quantité de protéines fourragères produites par unité de surface en système agroforestier.

Un autre aspect intéressant est la dynamique des populations herbacées au sein de la communauté fourragère. Par exemple, le chiendent (*Elytrigia repens*) couvrait de 50 à 75 % de la surface fourragère du témoin en 2012, alors qu'à 3,5 m de la rangée de peupliers, cette proportion était réduite de 25 à 50 %, et ce, sans réduction du recouvrement de fléole. Cette réduction du chiendent semblait plutôt se faire au profit du trèfle blanc. Ceci pourrait en partie expliquer pourquoi la distance de 3,5 m correspond également au point où la qualité fourragère est la plus élevée parmi les distances échantillonnées.

Les résultats de la méta-analyse (Rivest et al. 2013b) ont révélé que, globalement, les arbres matures isolés des systèmes silvopastoraux (10 à 60 arbres par ha) ne réduisent pas les rendements des prairies pâturées, ce qui va à l'encontre de la perception négative qu'ont généralement les agriculteurs vis-à-vis des arbres en milieu agricole. Par contre, cet effet varie lorsqu'on tient compte du groupe fonctionnel d'arbre. Par exemple le groupe des eucalyptus a un effet de compétition sur les rendements, alors que le groupe des arbres fixateurs de l'azote atmosphérique tend à avoir un effet positif sur les rendements. Nous avons également observé que l'effet de facilitation du groupe des arbres fixateurs d'azote et l'effet de compétition du groupe d'eucalyptus est accentué avec la diminution des précipitations annuelles. Nous avons émis l'hypothèse que ce résultat est attribuable aux traits racinaires propres à chaque groupe fonctionnel d'arbre. Les acacias, prédominant dans le groupe de fixateurs de notre méta-analyse, sont reconnus pour le potentiel à ségréger leur système racinaire par rapport aux herbacées en pâturage pour éviter la compétition pour l'eau en surface. À l'opposé, les eucalyptus sont reconnus pour investir dans le développement de

leur système racinaire superficiel en situation de fort stress hydrique. Bref ces résultats ont une implication importante dans le contexte des changements climatiques puisqu'ils indiquent que les interactions arbre-culture (compétition et facilitation) peuvent être accentuées lors des années les plus sèches.

2. Processus hydriques

La combinaison des événements météorologiques et de l'humidité du sol mesurées en continu à différentes profondeurs a permis d'établir une relation entre les deux. Un événement typique de 71 mm de pluie enregistré en août 2011 a servi d'exemple avec une évolution correspondante de la teneur en eau volumique du sol à 75 cm du chêne rouge dans les 24 heures qui ont suivi l'apparition de la pluie. La réponse a pu être divisée en trois étapes: (1) l'infiltration directement à la suite des premières pluies, et le mouillage de bas en haut, (2) la saturation des couches inférieures au bout de 3 heures, pendant le second pic de précipitations, et (3) la prise en charge du drainage qui devient le processus hydrologique dominant au bout de 4 heures. Une tendance observée pour de nombreux événements se manifeste par une réponse rapide des couches inférieures du sol (à une profondeur de 50 cm) à une distance horizontale de 75 cm du chêne, tandis que la couche arable (au-dessus d'une profondeur de 25 cm) réagit plus vite directement au-dessous de l'arbre.

Les analyses de l'évolution de l'eau du sol en plusieurs points ont permis d'obtenir une image des processus hydrologiques qui caractérisent le système de culture intercalaire. Nous avons ensuite effectué une interpolation spatiale des données aux 15 minutes des sondes FDR pour générer une image spatiale de la répartition de l'humidité des sols et de l'évolution au cours des saisons 2011 et 2012. La carte de l'humidité des sols interpolée comble les lacunes dans les données observées et permet d'observer plus clairement que l'écoulement préférentiel est une cause plausible de l'infiltration rapide. L'eau qui coule le long du tronc de l'arbre sature le sol à sa base et retrouve rapidement son chemin à travers les macropores à proximité. Les données observées indiquent différents modes d'humidité du sol sous la culture intercalaire où la dynamique de l'eau du sol est circonscrite principalement dans les 45 premiers centimètres. Ces résultats suggèrent que les différentes strates de végétation ont un impact significatif sur la circulation de l'eau du sol.

L'interpolation statistique de la teneur en eau volumétrique est un outil puissant pour la reconstruction de l'humidité du sol observée, mais elle ne permet pas d'extrapoler dans le futur. Pour cela nous avons utilisé le logiciel HYDRUS2D pour simuler la charge hydraulique (pression en hauteur d'eau), la teneur en eau, les vitesses d'écoulement et les flux aux frontières, d'abord pour les saisons d'été et d'automne 2011 et 2012 à intervalles de temps d'une heure, puis pour le scénario climatique 2041-2070.

La teneur en eau initiale a été obtenue après interpolation linéaire des données des sondes FDR localisées à différents endroits le long du transect. Nous avons appliqué la série temporelle des précipitations mesurées sur le site expérimental en 2011 et 2012, et utilisé le rayonnement net, la température, la vitesse du vent et l'humidité relative pour déterminer l'évapotranspiration potentielle. Nous observons que le sol sous l'allée cultivée et le chêne rouge est trop sec pendant près de 10% en 2011 alors que la capacité d'absorption de l'eau du peuplier hybride lui a permis de maintenir en tout temps une pression extractible autour de son système racinaire. En 2012, le sol était plus humide et l'eau était disponible pour les plantes pendant tout l'été et à l'automne, en dépit du fait qu'il y avait moins de précipitations: 580 mm en 2012 contre 672 mm en 2011. Durant l'été et l'automne de 2011 l'évapotranspiration potentielle étaient beaucoup plus élevée que la quantité de précipitation (ETP de 634 mm contre 577 mm de précipitation), alors que l'inverse était observé en 2012 (ETP de 479 mm contre 525 mm de précipitation).

Après avoir obtenu les variables climatiques pour St-Paulin pour 2041 - 2070, nous avons simulé l'évolution de la charge hydraulique, la teneur en eau, les vitesses d'écoulement et les flux aux frontières pour l'été et l'automne de 2041 et 2070 au pas de temps journalier. Dans la simulation pour 2041, le peuplier a accès à l'eau en tout temps comme ce fut le cas en 2011 et 2012, tandis que la disponibilité de l'eau augmente considérablement pour le foin (de 90% à 96% de la période simulée) et pour le chêne (de 91% à 96%). Cette disponibilité accrue de l'eau ne peut être attribuée à une augmentation des précipitations (635 mm au cours des étés et des automnes de la période simulée 2041 contre 637 mm en 2011), cependant, il se produit simultanément une augmentation de la transpiration: 610 mm au cours des étés et des automnes de 2041 contre 477 mm en 2011. La simulation suggère que, en 2041, les racines des plantes puisent l'eau près de la surface, ce qui aura un effet positif sur la disponibilité de l'eau pour les cultures intercalaires.

Pour l'été et l'automne de 2070, nous voyons une situation différente: la disponibilité de l'eau à une profondeur de 25 cm sous la culture intercalaire diminue à 86%, ce qui est inférieur de 4% à celle simulée pour 2011 et 10% inférieur à celle simulée pour 2041. Cependant, le peuplier a une disponibilité de l'eau presque continue avec un profil plus humide par rapport à 2041, tandis que le chêne a accès à l'eau 68% du temps avec un profil plus sec qu'en 2041. Nous avons simulé 717 mm de précipitations, ce qui est plus que la quantité simulée pour 2041, tandis que la transpiration est inférieure à 595 mm. L'augmentation des précipitations ajoute plus d'eau dans le sol, mais cette eau s'infiltré dans les couches profondes et ne peut pas être conservée dans la couche arable en raison de la diminution de la transpiration.

Enfin, les simulations distribuées que nous avons effectuées avec MHYDAS-érosion montrent que pour une forte intensité de pluie, la culture intercalaire réduit l'exportation totale de sédiments allant jusqu'à 20,8% pour un événement de 6 heures avec une période de retour de 10 ans, et de 16,7% pour un événement de 24 heures avec période de retour de 100 ans. Les pluies triangulaires utilisées permettent une graduation au fil du temps avec une intensité maximale inférieure. En raison de cela, il y a moins d'érosion et l'efficacité du système de culture intercalaire pour la réduction de l'exportation des sédiments est également moindre: entre 1,7% et 6,0% pour des périodes de retour de 10 et 100 ans, respectivement.

Notre étude hydrologique a fourni des réponses sur la dynamique de l'eau du sol dans un contexte de changement climatique. Les simulations climatiques pour St-Paulin pour la période 2041-2070 indiquent une augmentation possible de la température de 2.2 à 3.7 °C en fonction de la saison, ce qui entraîne une augmentation de la transpiration. Nos simulations hydrologiques suggèrent une plus grande disponibilité de l'eau pour les cultures en 2041 (une augmentation de 6% par rapport à 2011), mais une diminution en 2070 (4%).

L'amplitude de la variation dans le système de culture intercalaire est considérable, mais il faut noter que les simulations hydrologiques sont sujettes à des incertitudes liées aux simulations climatiques qui ont été utilisées comme entrées du modèle et des processus tels que l'écoulement préférentiel et l'écoulement latéral entre les systèmes racinaires. Par conséquent, nous recommandons ce qui suit à l'égard de l'étude hydrologique du système de culture intercalaire:

- Mettre en œuvre un modèle de multi-végétation qui permet de simuler l'interaction entre les différents systèmes racinaires (échange latéral) et une meilleure représentation des macropores;
- Inclure les modèles qui représentent la croissance des plantes, afin d'intégrer les effets d'une augmentation progressive de l'absorption de l'eau par le système racinaire;
- Définir et régionaliser la relation statistique entre les variables climatiques et la disponibilité en eau pour les cultures.

Nos résultats de simulation d'érosion suggèrent que le système de culture intercalaire donnerait des résultats similaires aux simulations des distributions triangulaires des précipitations. En plus des études antérieures qui ont montré que MHYDAS-érosion est capable de simuler les bassins versants spatialement complexes notre étude démontre que MHYDAS-érosion est également très approprié pour simuler des systèmes de culture complexes. Une étude plus poussée sur les effets des distributions des différentes techniques culturales antiérosives nous permettrait d'identifier les zones critiques et les secteurs qui bénéficieraient le plus de ces pratiques.

Les implications de l'étude hydrologique peuvent être encadrées dans le contexte économique et agricole comme suit:

- Nous avons observé de plus longues et plus fréquentes périodes de sécheresse pour le peuplier hybride que pour le chêne rouge, étant donné les taux d'extraction d'eau déclarés dans la littérature pour ces arbres.
- Nos simulations indiquent que les périodes de sécheresse peuvent avoir un impact plus important dans l'avenir pour les cultures fourragères intercalaires. Elles suggèrent également que les problèmes de sécheresse seraient moins fréquents pour la végétation avec une plus grande profondeur d'enracinement, qui peut bénéficier d'un approvisionnement en eau plus continu.

3. Biodiversité et résilience microbienne

La diversité des microarthropodes du sol supporte un large éventail de services écologiques qui peuvent être modifiés par la dessiccation des sols due au changement climatique. La densité des microarthropodes était affectée par le mode de culture (système de culture

intercalaire vs système agricole conventionnel), la profondeur, et l'interaction entre ces facteurs. Une plus grande diversité d'organismes a été trouvée dans le système agricole conventionnel, mais la distribution verticale des espèces était plus homogène dans le système de culture intercalaire, grâce à la présence des racines d'arbre. La distribution fine des microarthropodes était fortement liée à la biomasse des racines des arbres et des cultures, mais pas à l'humidité du sol, et plus fortement encore aux racines du chêne rouge (en diversité). Les résultats sont très importants compte tenu que les microarthropodes dépendent des ressources en matières organiques pour s'acquitter de leurs rôles écologiques. Si la sécheresse croissante associée aux changements climatiques dessèche les niveaux superficiels des sols agroforestiers, des sources plus profondes de nourriture, associées à la présence des arbres, devraient entraîner le maintien crucial des communautés de microarthropodes et les services écosystémiques qui leur sont associés.

L'étude portant sur les propriétés biochimiques du sol, la résilience microbienne et la productivité du blé en sols agroforestiers soumis à des stress hydriques sévères a elle aussi révélé des résultats forts intéressants (Rivest et al. 2013a). Les propriétés du sol étaient significativement différentes entre les deux types de système, dans chacun des deux sites. À Rivière-Ouelle (haie brise-vent), le P extractible dans le système agroforestier était supérieur à celui dans le système agricole conventionnel, bien que la différence était marginale ($p < 0.1$). Cette tendance d'accroissement du P extractible dans le système agroforestier était beaucoup plus marquée sur le site de St-Paulin (système de culture intercalaire, $p < 0.006$). De plus, sur le site de St-Paulin, le N minéralisable était significativement supérieur dans le système agroforestier ($p < 0.05$). Cette minéralisation accrue du N dans le système agroforestier a peut-être cependant contribué à réduire le pH ($p < 0.02$). L'augmentation de la disponibilité du P et du N en système agroforestier est d'un grand intérêt dans le contexte de la régie des cultures agricoles. En effet, les humus provenant des litières d'arbres feuillus sont souvent d'excellente qualité et peuvent donc être gérés comme une véritable fertilisation, ce qui peut se traduire par une diminution des engrais inorganiques. Ce potentiel d'optimisation des intrants agricoles par les systèmes agroforestiers, et par conséquent d'atténuation aux changements climatiques, mériterait d'être exploré davantage par des travaux de recherche supplémentaires.

Par ailleurs, le quotient métabolique (qCO_2) dans le système agroforestier était inférieur à celui dans le système agricole conventionnel, autant sur le site de St-Paulin ($p < 0.03$) que sur celui de Rivière-Ouelle ($p < 0.08$). Cette diminution du quotient métabolique dans le système agroforestier indique une plus grande efficacité d'utilisation du C disponible du sol par les communautés microbiennes (Anderson 2003). Nous émettons l'hypothèse que cette plus grande efficacité d'utilisation du C est attribuable à une plus grande diversité des communautés microbiennes dans les systèmes agroforestiers (Lacombe et al. 2009).

Sur le site de Rivière-Ouelle, la résilience de la biomasse microbienne à une perturbation de déshydratation des sols (suivi d'une ré-humectation) dans le système agroforestier était significativement supérieure à celle dans le système agricole conventionnel. Nous attribuons cette plus grande résilience microbienne à une plus grande diversité des communautés microbiennes en système agroforestier. L'hypothèse concernant la relation diversité-résilience est supportée par d'autres études ayant montré qu'une plus grande diversité spécifique et fonctionnelle végétale dans un système de production se traduit généralement par une augmentation de la diversité et de la résilience microbienne du sol (Chaer et al. 2009). Sur le site de St-Paulin, nous n'avons toutefois pas observé de différence significative de résilience microbienne entre les deux systèmes. Notre étude indique ainsi que les systèmes agroforestiers peuvent augmenter la résilience microbienne des sols, en particulier dans les sols lourds (qui permettent une plus grande rétention de la matière organique) et avec des arbres matures (site de Rivière-Ouelle). Notre étude a ainsi révélé que les relations entre les propriétés biochimiques et la résilience du sol sont complexes et dépendent beaucoup du contexte.

Sur le site de Rivière-Ouelle, la biomasse aérienne du blé cultivé sur le sol du système agroforestier était significativement supérieure à celle du blé cultivé sur le sol du système agricole conventionnel, dans les trois traitements d'irrigation, ce qui indique une rétroaction positive des propriétés du sol en système agroforestier sur la productivité de la plante agricole. Sur le site de St-Paulin, une augmentation significative de la biomasse aérienne et du rendement en grain du blé a été mesurée dans les pots intégrant le sol du système agroforestier, mais seulement dans le traitement de sécheresse. Nos résultats indiquent ainsi que l'impact positif de l'arbre sur certaines propriétés du sol peut avoir un effet favorable sur

la productivité des cultures et leur tolérance à la sécheresse. Des travaux de recherches futures sur une plus grande variété de sites permettraient de vérifier l'hypothèse que la magnitude de l'effet des arbres agroforestiers sur la résilience des sols et sur la tolérance des cultures à certains changements climatiques anticipés est conditionnée par la richesse intrinsèque des sites, les espèces d'arbres (et leur traits fonctionnels) et leur stade évolutif.

4. Services écosystémiques

L'analyse marginale a révélé un total annuel des services produits en systèmes de cultures intercalaires de 2 725 \$ ha⁻¹. La valeur combinée des services non marchands était de 1 800 \$ ha⁻¹an⁻¹, ce qui est supérieur à celle des biens marchands (culture et arbre). Le rendement des cultures en monoculture est de 1 110 \$ ha⁻¹an⁻¹, alors que le retour est de 785 \$ ha⁻¹an⁻¹ en systèmes de cultures intercalaires. Une analyse de la valeur des bénéfices futurs en services pour la rotation complète (40 ans) a aussi été menée et les résultats placent les produits agricoles (culture et arbre) au premier rang en terme de valeur (16 287 \$ ha⁻¹), suivi de la qualité de l'eau (11 581 \$ ha⁻¹), de l'air (9 510 \$ ha⁻¹), du sol (3 631 \$ ha⁻¹), le contrôle biologique (1 556 \$ ha⁻¹), et la pollinisation (500 \$ ha⁻¹). La valeur totale pour la rotation est de 56 411 \$ ha⁻¹. Les services non marchands constituent les deux tiers de cette valeur.

Lorsqu'on considère seulement les produits agricoles, l'agriculture conventionnelle offre des avantages supérieurs à ceux des systèmes de cultures intercalaires. Toutefois, le rendement économique marginal des systèmes de cultures intercalaires est beaucoup plus élevé que celui des systèmes agricoles conventionnels lorsque les services écosystémiques sont pris en compte dans l'analyse économique. Une évaluation de la valeur actuelle nette de la prestation future des services écosystémiques a donné des conclusions similaires. Il y a plusieurs implications à ces résultats. Par exemple, l'implantation des systèmes de cultures intercalaires entraîne des coûts additionnels pour l'agriculteur qui doit, parallèlement, assumer de plus une diminution de la fourniture de produits agricoles. Or, les services écosystémiques qui sont des biens publics ne peuvent pas compenser les pertes de bénéfices privés attribuables à ce changement d'utilisation des terres. En outre, les agriculteurs préfèrent généralement un rendement rapide sur leur investissement. Ainsi, même si les systèmes de cultures intercalaires peuvent apporter une valeur actualisée nette plus élevée par rapport à l'agriculture conventionnelle à la fin d'une longue rotation (p. ex. : 40 ans), ce pourrait être insuffisant pour motiver les producteurs agricoles à adopter massivement les systèmes de

cultures intercalaires. Ainsi, la mise en place d'incitatifs reconnaissant les biens et services publics des systèmes agroforestiers permettrait de rendre de tels systèmes plus attractifs aux yeux des agriculteurs intéressés à les adopter, tout en stimulant leurs bienfaits environnementaux pour le bénéfice de la société dans son ensemble.

5. Modélisation

Afin de tester nos hypothèses sur les processus d'interaction qui stimuleront la productivité des systèmes agroforestiers, nous devons adopter un outil pour mesurer et comparer la productivité. En agroforesterie, la productivité est habituellement mesurée en utilisant le *Land Equivalent Ratio* (LER). Le LER est un indice qui mesure l'efficacité de l'utilisation de l'espace, il s'interprète comme la surface qu'il faudrait cultiver avec un assolement des cultures pures pour produire autant (et dans les mêmes proportions) que ce qui est produit par un hectare de plantation agroforestière. Une association est donc considérée comme avantageuse du point de vue de la production si son LER est supérieur à 1. Dans un tel cas, l'association produit davantage que les cultures pures correspondantes.

Le LER du système agroforestier avec le climat actuel varie d'un maximum de 1,68 la deuxième année après la plantation et par la suite oscille autour d'une moyenne de 1,12. Pour le climat futur, le LER varie d'un maximum de 3,13 la première année, en grande partie par la grande contribution du rendement relatif du peuplier hybride, pour diminuer dramatiquement par la suite et se stabiliser autour d'une moyenne de 1,08. Malgré une valeur moins élevée dans le scénario de climat futur, le LER futur fait preuve de stabilité (variabilité significativement moins grande) comparativement au LER du climat actuel quand on compare les rendements.

Pour tous les climats simulés dans notre étude - d'autres résultats suivront - (actuels, futurs et futur extrêmes), nos résultats montrent donc un *Land Equivalent Ratio* (LER) supérieur à 1. Les LER des simulations utilisant des scénarios de climats futurs (incluant des variations extrêmes) démontrent que les systèmes agroforestiers avec le blé d'hiver et les peupliers seraient plus productifs que les systèmes agroforestiers cultivés dans des conditions climatiques actuelles. Les LER des simulations futures et futures extrêmes sont très élevés les cinq premières années. Bien que ces données ne soient pas incluses dans ce rapport, les peupliers cultivés en association avec le blé ont une croissance supérieure à ceux cultivés

sans culture pendant les 5 premières années. Ainsi, le rendement relatif des peupliers est nettement plus élevé pour les scénarios climatiques futurs et encore plus marqué pour les scénarios de climats futurs extrêmes. Alors que d'autres analyses sont nécessaires pour comprendre les mécanismes, il est probable que les arbres profitent d'un sol fertilisé et de conditions climatiques favorables pour croître rapidement dans les premières années jusqu'à ce qu'ils se nuisent eux-mêmes, ralentissant donc à la fois leur croissance et celle du blé. La baisse de la productivité agricole s'explique par une diminution du rayonnement solaire incident en raison de l'ombrage produit par des arbres grandissants, tel que confirmé précédemment dans l'analyse des rendements de la culture fourragère à St-Paulin.

En ce qui concerne les simulations avec le climat du futur extrême, nous apercevons que la contribution relative du blé au LER est minime après les cinq premières années. Le peuplier contribue presque entièrement à la productivité du site et profite des conditions climatiques qui semblent nuire à la croissance du blé. La différence dans les rendements du blé entre le climat actuel et le climat futur est significative, de même que pour le peuplier. La différence relative entre le rendement du blé et le rendement du peuplier semble s'amplifier sous l'effet de conditions climatiques extrêmes. Le rendement du blé dans le climat actuel est supérieur à celui dans le climat du futur extrême. On observe l'inverse pour le peuplier. Une hypothèse est que les arbres sont moins sensibles au changement climatique que les cultures. Du moins, dans nos scénarios, les peupliers sont capables d'augmenter leur croissance avec des conditions climatiques favorables. Les cultures seraient donc forcément plus sensibles aux changements climatiques.

Après une inspection plus minutieuse des données climatiques, une autre hypothèse se forme. Il semble que les cultures ne performant pas bien lorsqu'une augmentation draconienne des températures minimales est suivie par un gel en début de saison. Les cultures sont plus sensibles aux gels et dégelés qui caractérisent les conditions météorologiques associées à une augmentation de la température minimale en début d'année. Le rendement des cultures quasi nul dans le scénario climatique extrême soutient la possibilité que cette hypothèse soit vérifiée. Une analyse plus poussée est nécessaire pour comprendre pourquoi certaines cultures connaissent de mauvais rendements certaines années et pas d'autres.

Mais probablement l'un des résultats les plus intéressants à ce stade-ci de nos travaux est l'observation que malgré un rendement de la culture agricole moins élevé dans le scénario de climat futur, il fait preuve de plus de stabilité (variabilité des rendements significativement moins grande comparativement au climat actuel). Cela pourrait être dû à l'effet escompté de protection des arbres, mais doit être confirmé.

5. Conclusion et recommandations

À la lumière des principaux résultats de ce projet nous pouvons dégager un certain nombre de constats. Tel qu'attendu, en situation expérimentale de forte densité d'arbres (347 arbres par ha), le rendement des cultures fourragères est diminué, en particulier dans le climat actuel. La forte concurrence pour la lumière s'est avérée un facteur déterminant du rendement de la culture fourragère. Or, il est assez aisé de maîtriser la concurrence pour la lumière, en optant par exemple pour de faibles densités initiales de plantation. Toutes les nouvelles parcelles expérimentales et de démonstration implantées chez des producteurs agricoles du Québec au cours des dernières années utilisent de très faibles densités initiales de plantation (50 à 65 arbres par ha). Il y a tout lieu de croire que les effets positifs anticipés des arbres, en particulier par le biais de l'amélioration des propriétés biochimiques des sols, pourront davantage être dévoilés sur ces nouveaux sites comparativement à ce que nous avons observé sur le site de St-Paulin, où la croissance de la culture était limitée par le fort ombrage des arbres. Les simulations futures nous permettront d'identifier les combinaisons optimales permettant à la fois une compétition minimale et une protection maximale des cultures contre des événements climatiques extrêmes, tout en maximisant les services écosystémiques.

En ce qui concerne la modélisation, nous avons fait des progrès importants en montrant plusieurs bénéfices des systèmes de cultures intercalaires, notamment en ce qui a trait à leur contribution potentielle à la résistance aux changements climatiques anticipés. Par ailleurs, des bénéfices importants ont été soulignés concernant la biodiversité des sols (microbes et microarthropodes), avec des impacts très importants pour la résilience des sols et des cultures face aux changements climatiques, notamment des sécheresses prolongées (épisodes de 10 jours et plus avec moins de 2mm de précipitations par 24h).

Nous tirons aussi trois conclusions très importantes suite à nos travaux en simulation, même partiels :

1. L'association blé d'hiver et peuplier hybride est intéressante du point de vue de la productivité, autant dans le climat d'aujourd'hui que dans celui du futur. Son LER est supérieur à 1, indiquant que 1 ha de l'association en système de culture intercalaire produit davantage de biomasse que 1 ha où les peupliers et le blé seraient produits séparément.
2. L'augmentation de la productivité (LER) pour une association blé d'hiver et peuplier hybride pour le climat futur est due surtout à l'augmentation du rendement du peuplier hybride plutôt qu'à celle du rendement des cultures. L'augmentation des températures minimales plus tôt en saison qui caractérise les scénarios de climat futur pourrait être la cause d'une forte mortalité de la culture agricole (cycle de gel et de dégel modifié).
3. Après une période de décroissance rapide due fort probablement à la compétition pour la lumière, les cultures dans le système agroforestier en climat futur ont un rendement plus stable que celui des cultures dans un système agroforestier sous le climat actuel.

Il reste plusieurs pistes intéressantes à explorer maintenant que nous avons un modèle qui nous permet de tester des hypothèses sur le fonctionnement écologique des systèmes agroforestiers. La contribution de chaque variable climatique est un aspect qui mérite plus d'attention. Plus particulièrement, il est important de comprendre quelle variable du climat (température, précipitation) joue un rôle primordial dans la productivité d'un système agroforestier, surtout pour le blé. Ce genre d'information peut nous permettre de choisir des associations arbre-culture qui feront preuve de plus de complémentarité et donc de productivité plus élevée. Le type de culture peut bien-sûr aussi être adapté avec l'évolution dans le temps des arbres. Voici quelques éléments qui méritent d'être étudiés de façon plus approfondie :

1. L'effet de la fertilisation sur l'évolution et la productivité du système agroforestier québécois d'aujourd'hui et avec des scénarios de changements climatiques;

2. Poursuivre des simulations permettant de mieux comprendre les interactions arbre-culture en utilisant une culture d'été (exemple : maïs) peu sensible aux effets du gel/dégel;
3. L'effet des changements climatiques sur la phénologie des cultures d'été et d'hiver en association avec différentes espèces d'arbres;
4. Évaluer les interactions au niveau des racines pour mieux comprendre l'effet des changements climatiques sur celles-ci.
5. Utilisation dynamique de pratiques sylvicoles (éclaircie, élagage) pour gérer la lumière disponible, de même que les espacements et le choix des espèces.

Nous notons enfin une production totale plus élevée dans les systèmes de cultures intercalaires, et ce particulièrement dans les scénarios de changements climatiques. Outre une production plus stable et un net avantage face aux aléas climatiques, nous notons que ce gain est, selon les simulations faites jusqu'à maintenant, largement attribuable aux arbres.

Il reste du travail à faire pour bien montrer, et éventuellement expliquer, la protection potentielle des cultures par les rangées d'arbres en système de culture intercalaire dans un climat futur, tout en identifiant les conditions favorisant un tel effet positif des arbres. Néanmoins, notre étude a permis de mettre en évidence des gains économiques très importants en système de culture intercalaire, qui sont le résultat de divers biens et services écologiques non marchands dont peut profiter la société, mais pour lesquels les producteurs agricoles ne tirent peu ou pas de gain directement. Pour avoir un effet bénéfique futur il faudrait dès aujourd'hui que plus de systèmes de cultures intercalaires soient mis en place, étant donnée la croissance relativement lente des arbres. L'établissement d'un réseau de parcelles de démonstration et d'expérimentation chez des producteurs agricoles est un moyen tout indiqué pour juger de la faisabilité des diverses pratiques agroforestières dans les conditions locales et intéresser un plus grand nombre de producteurs agricoles à les adopter. Ce réseau se développe progressivement au Québec et plusieurs nouveaux sites devraient s'y greffer dans les années à venir. Dans ce contexte, il serait pertinent d'allouer des ressources afin de bien identifier les zones et régions problématiques où l'on devrait prioriser l'implantation de ces nouveaux sites. Ce travail de diagnostic de terrain et de priorisation

pourrait être fait de concert avec les organismes de bassin-versant qui ont une connaissance approfondie des enjeux de leur territoire, en particulier sur le plan agroenvironnemental (érosion des sols, pollution diffuse, etc.). Il serait souhaitable que les décideurs se penchent plus attentivement sur la mise en place d'un système de rétribution au producteur agricole pour des services écosystémiques rendus par l'adoption de systèmes agroforestiers dont la valeur fait de plus en plus consensus. Une piste supplémentaire de solution a peut-être été mise en évidence par nos travaux (en plus de la documentation de ces services bien-sûr). En effet, notre étude a révélé que sous un climat futur, les systèmes agroforestiers présentent un rendement agricole plus stable et une meilleure assurance de conservation des processus importants comme le recyclage des nutriments comparativement aux systèmes agricoles conventionnels. Ces résultats suggèrent que l'adoption à grande échelle de systèmes agroforestiers performants pourrait limiter, dans le futur, la dépendance des producteurs agricoles aux différents programmes gouvernementaux de gestion des risques. Cela pourrait générer des économies substantielles pour la société qui finance en bonne partie ces programmes. Des travaux de recherche futurs sont nécessaires pour mieux quantifier ce potentiel.

6. Références

- Adamowicz, W., P. Boxall, M. Williams et J. Louviere. 1998. Stated preference approaches for measuring passive use values: choice experiments and contingent valuation. *American Journal of Agricultural Economics* 80(1): 64-75.
- Anderson, T. H. 2003. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 98: 285-293.
- Bainard, L. D., A. M. Koch, A. M. Gordon et J. N. Klironomos. 2012. Temporal and compositional differences of arbuscular mycorrhizal fungal communities in conventional monocropping and tree-based intercropping systems. *Soil Biology & Biochemistry* 45: 172-180.
- Banning, N. C. et D. V. Murphy. 2008. Effect of heat-induced disturbance on microbial biomass and activity in forest soil and the relationship between disturbance effects and microbial community structure. *Applied Soil Ecology* 40(1): 109-119.
- Bateman, I. J., R. T. Carson, B. Day, M. Hanemann, N. Hanley, T. Hett, M. Jones-Lee, G. Loomes, S. Mourato, E. Özdemiroglu, D. W. Pearce, R. Sugden et J. Swanson. 2002. *Economic Valuation with Stated Preference Techniques: a manual*. Edward Elgar, Chentelham, UK. p.
- Benavides, R., G. B. Douglas et K. Osoro. 2009. Silvopastoralism in New Zealand: review of effects of evergreen and deciduous trees on pasture dynamics. *Agroforestry Systems* 76: 327-350.
- Bennett, E. M. et P. Balvanera. 2007. The future of production systems in a globalized world. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5(4): 191-198.
- Brandle, J. R., L. Hodges et X. H. Zhou. 2004. Windbreaks in North American agricultural systems. *Agroforestry Systems* 61: 65-78.
- Bryant, C., B. Singh, P. Thomassin et L. Baker. 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. *Ressources Naturelles Canada, Ouranos, Montréal*.
- Buergler, A. L., J. H. Fike, A. Burger, C. R. Feldhake, J. A. McKenna et C. D. Teutsch. 2005. Botanical composition and forage production in an emulated silvopasture. *Agronomy Journal* 97: 1141-1147.
- Chaer, G., M. Fernandes, D. Myrold et P. Bottomley. 2009. Comparative resistance and resilience of soil microbial communities and enzyme activities in adjacent native forest and agricultural soils. *Microb Ecol* 58: 414-424.
- Christie, M., N. Hanley, J. Warren, K. Murphy, R. Wright et T. Hyde. 2006. Valuing the diversity of biodiversity. *Ecological Economics* 58(2): 304-317.
- Duchemin, M., A. N. Rousseau, R. Majdoub et R. Quilbé. 2004. Impacts potentiels des changements climatiques sur l'érosion hydrique des sols. *Vecteur Environnement* 37(4): 26-32.
- Duffy, J. E. 2009. Why biodiversity is important to the functioning of real-world ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment* 7(8): 437-444.
- Dupraz, C., P. J. Burgess, A. Gavaland, A. R. Graves, F. Herzog, L. D. Incoll, N. Jackson, K. Keesman, G. Lawson, I. Lecomte, F. Liagre, K. Mantzanas, M. Mayus, G. Moreno, J. Palma, V. Papanastasis, P. Paris, D. Pilbeam, Y. Reisner, M. van Noordwijk, G. Vincent et W. van der Werf. 2005. Synthesis of the SAFE (Silvoarable Agroforestry for Europe) project.

- Ellis, E. A., G. Bentrup et M. M. Schoeneberger. 2004. Computer-based tools for decision support in agroforestry: Current state and future needs. *Agroforestry Systems* 61(1-3): 401-421.
- Graves, A. R., P. J. Burgess, J. H. N. Palma, F. Herzog, G. Moreno, M. Bertomeu, C. Dupraz, F. Liagre, K. Keesman, W. van der Werf, A. K. de Nooy et J. P. van den Briel. 2007. Development and application of bio-economic modelling to compare silvoarable, arable, and forestry systems in three European countries. *Ecological Engineering* 29(4): 434-449.
- Gumiere, S. J. et A. N. Rousseau. 2011. Development of VFDM: A riparian vegetated filter dimensioning model. American Society of Agricultural and Biological Engineers, Anchorage, AK, 18 September, 2011.
- Kaur, B., S. R. Gupta et G. Singh. 2000. Soil carbon, microbial activity and nitrogen availability in agroforestry systems on moderately alkaline soils in northern India. *Applied Soil Ecology* 15: 283-294.
- Kremer, R. J. et R. B. Kussman. 2011. Soil quality in a pecan-kura clover alley cropping system in the Midwestern USA. *Agroforestry Systems* 83: 213-223.
- Lacombe, S., R. L. Bradley, C. Hamel et C. Beaulieu. 2009. Do tree-based intercropping systems increase the diversity and stability of soil microbial communities? *Agriculture, Ecosystems & Environment* 131(1-2): 25-31.
- Likens, G. E., C. T. Dirscoll, D. C. Buso, T. G. Siccama, C. E. Johnson, G. M. Lovett, D. F. Ryan, T. Fahey et W. A. Reiners. 1994. The Biogeochemistry of Potassium at Hubbard Brook. *Biogeochemistry* 25(2): 61-125.
- Limoges, B. 2009. Biodiversité, services écologiques et bien-être humain. *Le naturaliste canadien* 133(2).
- Mailhot, A., S. Duchesne, D. Caya et G. Talbot. 2007. Assessment of future change in intensity-duration-frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model CRCM. *Journal of Hydrology* 347: 197-210.
- Miller, A. W. et S. G. Pallardy. 2001. Resource competition across the crop-tree interface in a maize-silver maple temperate alley cropping stand in Missouri. *Agroforestry Systems* 53(3): 247-259.
- Muetzelfeldt, R. 1995. A framework for a modular modelling approach for agroforestry. Pages 223-234 dans *Agroforestry: Science, Policy and Practice*. Springer.
- Paquette, A. et C. Messier. 2010. The role of plantations in managing the world's forests in the Anthropocene. *Frontiers in Ecology and the Environment* 8(1): 27-34.
- Paquette, A. et C. Messier. 2011. The effect of biodiversity on tree productivity: from temperate to boreal forests. *Global Ecology & Biogeography* 20: 170-180.
- Plamboeck, A. H., H. Grip et U. Nygren. 1999. A hydrological tracer study of water uptake depth in a Scots pine forest under two different water regimes. *Oecologia* 119: 452-460.
- Revéret, J. P. et al. 2009. Étude pilote de l'évaluation agroenvironnementale. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Groupe AGEKO, Québec
- Revéret, J. P. et A. Webster. 2002. Economics and Biodiversity Management. Pages 450 dans P. Le Prestre, éditeur. *Governing global biodiversity: The evolution and implementation of the convention on biological biodiversity*. Ashgate Publishing, Brookfield
- Rivest, D., A. Cogliastro, A. Vanasse et A. Olivier. 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.

- Rivest, D., M. Lorente, A. Olivier et C. Messier. 2013a. Soil biochemical properties and microbial resilience in agroforestry systems: Effects on wheat growth under controlled drought and flooding conditions. *Science of the Total Environment* in press.
- Rivest, D. et A. Olivier. 2007. Cultures intercalaires avec arbres feuillus : quel potentiel pour le Québec? *The Forestry Chronicle* 83(4): 526-538.
- Rivest, D., A. Olivier et A. Gordon. 2010. Hardwood Intercropping Systems: Combining Wood and Agricultural Production While Delivering Environmental Services. Agriculture and Agri-Food Canada, Québec.
- Rivest, D., A. Paquette, G. Moreno et C. Messier. 2013b. A Meta-analysis reveals mostly neutral influence of scattered trees on pasture yield along with some contrasted effects depending on functional groups and rainfall conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 165: 74-79.
- Rousseau, A., R. Quilbé, S. Savary, S. Ricard, J.-S. Moquet, M. S. Garbouj et M. Duchemin. 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. INRS-ETE, Québec.
- Scholes, R. et S. Archer. 1997. Tree-grass interactions in savannas. *Annual Review of Ecology and Systematics* 28: 517-544.
- Shaver, G. R., J. Canadell, F. S. C. III, J. Gurevitch, J. Harte, G. Henry, P. Ineson, S. Jonasson, J. Melillo, L. Pitelka et L. Rustad. 2000. Global Warming and Terrestrial Ecosystems: A Conceptual Framework for Analysis. *BioScience* 50(10): 871-882.
- Unger, I. M., A. C. Kennedy et R.-M. Muzika. 2009. Flooding effects on soil microbial communities. *Applied Soil Ecology* 42(1): 1-8.
- Wojewoda, D. et S. Russel. 2003. The impact of a shelterbelt on soil properties and microbial activity in an adjacent crop field. *Polish Journal of Ecology* 51: 291-307.

Annexes

Nous avons regroupé ici toutes les annexes à notre rapport (manuscrits soumis, publiés, rapports scientifiques), ordonnées selon les différents volets. La présente synthèse a été construite sur la base de ces différents documents et le lecteur aura donc avantage à s'y référer pour de plus amples informations. Pour faciliter leur consultation, un guide est ici proposé.

Volet 1 - Racines et effets réels

Cette section présente les résultats d'une étude portant sur la distribution des racines fines et les interactions entre la culture et les arbres, de même que sur la disponibilité de la lumière et le rendement des cultures. Ces travaux ont été effectués sur notre site expérimental à St-Paulin selon des gradients de distances aux arbres (deux espèces) et de profondeur dans le sol.

Bouttier, Léa. 2013. Distribution spatiale des racines fines, disponibilité de la lumière et rendement dans un système de culture intercalaire avec arbres feuillus en zone tempérée. Rapport final - thèse de MSc. Université de Montréal (IRBV) (acceptée).

Un rapport sur le rendement et la qualité des fourrages en fonction des mêmes gradients à St-Paulin a aussi été produit.

Gagnon, Louis-Mathieu. 2013. Performance des fourrages en systèmes de culture intercalaire au Québec. Pour l'essai de maîtrise en agroforesterie (en révision). Université Laval.

Enfin, nous présentons aussi le résultat d'une méta-analyse d'expériences mondiales dans des systèmes agroforestiers intégrant des plantes fourragères.

Rivest, D., A. Paquette, G. Moreno, et C. Messier. 2013. A Meta-analysis reveals mostly neutral influence of scattered trees on pasture yield along with some contrasted effects depending on functional groups and rainfall conditions. Agriculture, Ecosystems and Environment 165:74-79.

Volet 2 - Hydrologie

À l'aide d'un dispositif expérimental de mesure sur le terrain (St-Paulin), nous avons mesuré durant deux étés le contenu en eau dans le sol selon deux gradients de profondeur et de distance aux arbres (deux espèces). Ces données ont été utilisées dans des modèles pour comprendre et simuler le mouvement de l'eau dans le sol en agroforesterie, de même que le ruissellement de surface. À noter que seul un sommaire exécutif est inclus dans le présent rapport de projet mais qu'un rapport complet sera envoyé à Ouranos sous peu.

Alain N. Rousseau, Dennis W. Hallema, Silvio J. Gumiere et Gabriel Hould Gosselin. 2013. Impact des systèmes de cultures intercalaires sylvicoles-agricoles sur les processus hydrologiques et l'érosion des sols dans un contexte d'évolution du climat. Sommaire exécutif (pour distribution restreinte), INRS-ETE.

Volet 3 - Biodiversité et résilience

Sont regroupés ici nos travaux d'échantillonnage et d'analyse des microarthropodes du sol selon les mêmes gradients qu'aux volets précédents. Une nouvelle méthode d'échantillonnage a même dû être développée pour capter ces petits organismes des sols très importants pour l'agrosystème.

Enrique Doblas-Miranda, Alain Paquette, Timothy T. Work. 2013. Intercropping trees effect on soil oribatid diversity in agro-ecosystems: Implications in the face of climate change. Manuscrit pour soumission pour publication scientifique.

Nous avons ajouté à ces travaux l'étude des communautés microbiennes et de leur résilience face à des stress hydriques.

David Rivest, Miren Lorente, Alain Olivier, Christian Messier. 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. Sous presse.

Volet 4 - Économie

Sont présentés ici deux études sur la quantification et la monétisation des services écosystémiques rendus par les systèmes agroforestiers. Le carbone a été utilisé comme modèle pour la démonstration de la méthode, qui a ensuite été appliquée à une vaste gamme de services. Pour chaque service une méthode de quantification et enfin de monétisation appropriée est développée et appliquée.

Mahbubul Alam, Alain Olivier, Alain Paquette, Jean-Pierre Revéret. 2013. Valuing carbon sequestration in temperate tree-based intercropping systems. Soumis pour publication à Canadian Journal of Agricultural Economics.

Mahbubul Alam, Alain Olivier, Alain Paquette, Christian Messier, Jean-Pierre Revéret. Marginal analysis of TBI ecosystem services. Manuscrit en préparation pour soumission.

Volet 5 - Modélisation

C'est dans ce volet que nous présentons enfin le modèle de simulation de même que les scénarios climatiques utilisés pour répondre à la question centrale: l'agroforesterie peut-elle diminuer les effets appréhendés des changements climatiques sur les cultures au sud du Québec? Une espèce d'arbre (peuplier hybride) et une culture (blé d'hiver) ont pour l'instant été simulés selon trois scénarios climatiques.

Susy Domenicano, Alain Paquette et Christian Messier. 2013. Utiliser un modèle agroforestier pour produire des scénarios futurs : les changements climatiques vont-ils conduire les systèmes agroforestiers au Québec vers la complémentarité ou la compétition? Rapport final pour Ouranos. Ce manuscrit sera soumis pour publication au numéro spécial de Agroforestry Systems suivant la conférence NAAC de Charlottetown en juin.

Un guide d'utilisation du modèle a aussi été produit et fera l'objet d'une publication scientifique avec validation pour le sud du Québec (le simulateur n'est pour le moment utilisé que pour des systèmes agroforestiers du sud de la France). Celui-ci étant maintenant fonctionnel, de nombreux autres scénarios font maintenant l'objet d'analyses. L'un des intrants du modèle, la surface foliaire totale des arbres, prend un temps considérable à mesurer et caler. Nous avons produit un guide pour sa mesure dans lequel plusieurs techniques sont comparées.

Domenicano, Susy. 2012. Hi-sAFé: A biophysical, 3-dimensional mechanistic model for agroforestry. Manuscrit en préparation pour soumission.

Lucie Chaboisson. 2012. Méthodes d'estimation de l'indice de surface foliaire en milieu ouvert : Étude en système agroforestier. Rapport de stage - Recherche et Innovation. École supérieure d'agriculture, Angers, France.