CAPI
L'INSTITUT CANADIEN DES POLITIQUES AGROALIMENTAIRES

juin 2021

Des sols agricoles en santé : une solution simple aux changements climatiques et à la résilience des systèmes agroalimentaires?

RAPPORT DU BOURSIER DE L'ICPA 2020-2022 PAR MARIE-ÉLISE SAMSON, UNIVERSITÉ LAVAL

CAPI
L'INSTITUT CANADIEN DES POLITIQUES AGROALIMENTAIRES

Institut canadien des politiques agroalimentaires
960, avenue Carling
Ferme expérimentale centrale, immeuble 60
Ottawa, (Ontario) K1A 0C6
www.capi-icpa.ca/fr/

Canada

Les points de vue et les opinions exprimés dans ce document sont uniquement ceux de l'auteur et ne reflètent pas nécessairement ceux de l'ICPA.

Résumé

L'adoption de pratiques de conservation des sols en agriculture pourrait contribuer à assurer la productivité à long terme de nos terres et à accroître la résilience de nos systèmes agricoles, tout en aidant à atténuer les changements climatiques en favorisant la séquestration du carbone dans le sol. Cependant, une question demeure, soit celle de savoir si les pratiques de conservation des sols sont une solution miracle ou s'il y a des compromis à faire entre le rendement, la santé du sol et le stockage du carbone dans le sol. L'objectif de ce projet était de comparer le rendement des cultures (maïs, soya, blé) et l'impact environnemental (santé du sol et stockage du carbone dans le sol) de 20 combinaisons différentes de pratiques de gestion, comprenant l'intensité du travail du sol (travail minimal du sol, labour), la gestion des résidus des cultures (récoltés ou retournés au sol) et cinq sources différentes d'engrais (organiques et minéraux) sur deux sols à texture contrastée (loam sableux et argile limoneuse) sur une période de neuf ans dans l'est du Canada. Les résultats de cette étude ont mis en évidence le fait que l'optimisation des rendements des cultures, la santé du sol, et la séquestration du carbone dans le sol ne vont pas toujours de pair, et que les services agronomiques et environnementaux du sol peuvent être grandement influencés par les interactions entre les pratiques de gestion et/ou le contexte pédopclimatique. De plus, les résultats de cette étude ont démontré que le carbone profond (> 30 cm) peut être très réactif à certaines pratiques de gestion agricole et devrait être systématiquement pris en compte dans les stratégies d'atténuation et d'adaptation liées au sol. Ces résultats constituent un appel à reconnaître la complexité inhérente des agroécosystèmes et à investir dans la mise au point d'outils fiables pour mesurer et prédire les effets des pratiques de gestion sur la santé des sols et les changements des stocks de carbone dans le sol. Ils sont également un appel à reconnaître la véritable valeur de tous les services écosystémiques fournis par les sols agricoles. Bien que le rendement des cultures et la rentabilité de la ferme soient actuellement les principaux facteurs qui déterminent le marché et les décisions prises, les pays qui réussissent à investir dans la durabilité de leurs systèmes agroalimentaires en tireront nécessairement des avantages à long terme. S'il peut reconnaître cette valeur, e Canada investira dans la résilience de son système agroalimentaire et pourra compter sur le rendement de son investissement au cours des prochaines années.

Introduction

La matière organique des sols est considérée comme un des principaux indicateurs de la santé du sol. Un sol riche en matière organique est généralement plus productif et plus résilient. Or, depuis l'avènement de l'agriculture intensive, on estime que les sols ont perdu de 20 à 70 % de leur contenu initial en matière organique à l'échelle mondiale. Parallèlement, on a observé un déclin de la productivité sur environ 20 % des superficies arables. La nature globale de ces enjeux menace donc notre capacité à assurer la sécurité alimentaire des générations futures. Heureusement, l'adoption de pratiques de conservation des sols en agriculture pourrait permettre d'inverser ces tendances. Puisqu'elles visent notamment à rehausser le contenu en matière organique des sols, ces pratiques pourraient non seulement contribuer à assurer la productivité de nos terres à long terme (Oldfield et al., 2019) et augmenter la résilience de nos systèmes agricoles (UNCCD, 2017), mais également contribuer à la lutte aux changements climatiques en favorisant la séquestration de carbone dans les sols (Figure 1). En effet, l'adoption de simples pratiques de conservation, telles que la diminution du travail du sol et le retour au sol des résidus de culture au sol pourrait permettre de stocker de 2 à 3 GT de carbone par année dans les sols agricoles sous forme de matière organique et ainsi compenser de 20 à 35 % des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique à l'échelle planétaire (Minasny et al., 2017).

Lors de la Conférence des Parties de Paris (Accord de Paris) en décembre 2015, le Canada s'est fixé des objectifs ambitieux en s'engageant à une réduction de 30 % de ses émissions de gaz à effet de serre (GES) d'ici 2030 (par rapport aux niveaux de 2005). En adoptant certaines pratiques de conservation des sols, les producteurs agricoles canadiens pourraient ainsi contribuer aux objectifs du Canada, en plus d'accroître la résilience de leur exploitation agricole (gestion de l'eau, gestion des nutriments, etc.), ce qui permettrait de mieux répondre aux besoins urgents du secteur en matière d'adaptation aux changements climatiques et d'ainsi contribuer à assurer la pérennité du système agroalimentaire canadien.

Or, l'optimisation du rendement des cultures, de la santé du sol et de la séquestration de carbone dans le sol ne vont pas toujours de pair. En effet, le climat, le type de sol et les interactions entre les différentes pratiques agricoles peuvent avoir une influence considérable sur l'effet net de ces pratiques, et donc, sur les services écosystémiques rendus par les sols (Lal et al., 2011). Le développement de stratégies agricoles efficaces tant au niveau agronomique qu'environnemental nécessite donc une approche globale et systémique de l'agroécosystème.

Au Canada, par exemple, l'adoption massive du semis direct dans les provinces des prairies a permis d'améliorer les rendements, la qualité du sol et le stockage de carbone dans le sol en raison des conditions climatiques relativement arides. Sous des conditions plus froides et humides de l'Est du Canada, par contre, le semis direct peut parfois réduire les rendements (Pittlekow et al., 2015) et n'a généralement aucun effet sur les stocks totaux de carbone du sol (Angers et Eriksen-Hamel, 2008). À ce jour, les processus édaphiques qui sous-tendent ces différences sont encore mal connus. Le développement d'une compréhension intégrée des systèmes agricoles et des mécanismes physiques et biogéochimiques qui les sous-tendent est donc nécessaire afin d'identifier les combinaisons de pratiques à privilégier sous différentes conditions pédoclimatiques et culturales. L'objectif de cette étude était d'étudier l'effet de la combinaison de différentes pratiques de conservation des sols sur le rendement des cultures de maïs, de blé et de soya, sur la santé et la fertilité du sol ainsi que sur les stocks de carbone du sol dans le contexte pédoclimatique de l'Est du Canada.

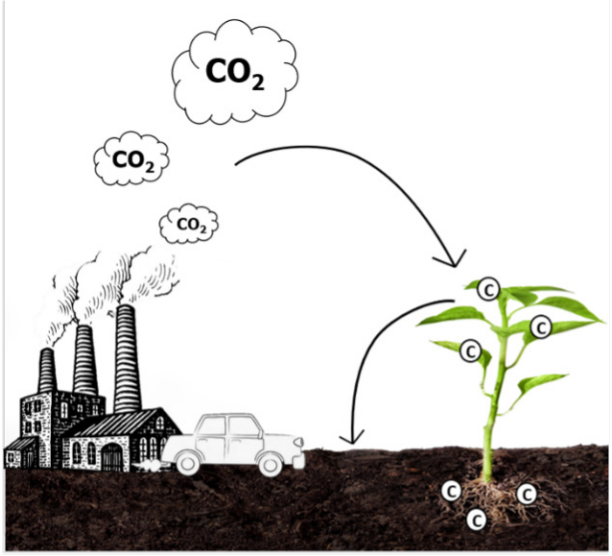

Figure 1. Le CO2 rejeté dans l'atmosphère peut être capté par les plantes et converti en matière organique végétale grâce à la photosynthèse. Le carbone contenu dans la matière organique végétale peut ensuite être retourné au sol et y être stabilisée sur le long terme.

Méthodologie

Ce projet de recherche est basé sur un essai de long terme situé à la station de recherche agronomique de l'Université Laval à St-Augustin-de-Desmaures, près de Québec, au Canada. Le dispositif a été mis en place à l'automne 2008 et est décrit en détail dans Samson et al. (2019). Il est répété sur une argile limoneuse et sur un loam sableux. Chaque site expérimental prend la forme d'un plan factoriel en tiroirs subdivisés comprenant trois répétitions en blocs complets et combinant différents régimes de travail du sol (travail réduit au printemps vs labour d'automne et travail au printemps), de gestion des résidus de culture (résidus récoltés vs laissés au sol) et cinq différentes sources fertilisantes (fumier de volaille, lisier de bovin, lisier de porc, engrais minéral complet [NPK] et engrais minéral sans azote [PK]). Cette structure expérimentale permet non seulement d'évaluer l'effet net de chaque pratique, mais également de déterminer s'il existe des interactions entre chacune de ces pratiques. Les deux sites ont été cultivés en blé en 2009 et en 2010, puis ils ont suivi une rotation maïs-soya-blé de 2010 à 2017 (une culture par saison de croissance).

Ce dispositif expérimental unique au monde a permis d'évaluer l'effet agronomique et environnemental de 20 systèmes de culture différents sur deux brunisols à texture contrastée, sur une période de neuf ans. Le rendement des cultures de maïs, de blé et de soya a été évalué entre 2009 et 2017. Après chaque récolte, des échantillons de sol ont été récoltés en surface (0-10 cm) pour évaluer l'évolution de différents indicateurs de la santé du sol (concentration en carbone organique, biomasse microbienne, diamètre moyen pondéré des agrégats, etc.). Des analyses biochimiques de la matière organique du sol, réalisées en 2015, nous ont ensuite permis de mieux comprendre l'effet de différentes pratiques agricoles sur la qualité de la matière organique en surface et sur son rôle potentiel dans le stockage de carbone et/ou la fertilité du sol. Finalement, en 2016, les stocks totaux de carbone organique du sol ont été mesurés jusqu'à une profondeur de 60 cm afin d'évaluer le potentiel de chaque itinéraire technique pour le stockage de carbone dans le sol.

Résultats

Rendement

Le travail réduit du sol est présenté comme étant le principal pilier des pratiques de conservation des sols en grandes cultures. Ses effets bénéfiques sur certaines propriétés biologiques, chimiques et physiques du sol en surface sont bien établis (Hobbs et al., 2008) et se répercutent parfois positivement sur le rendement des cultures, particulièrement sous les climats secs où la disponibilité de l'eau est un des principaux facteurs limitant le rendement des cultures (Ogle et al. 2012). Cependant, nos résultats (Samson et al., 2019), comme ceux d'autres chercheurs (Toliver et al., 2012; Pittelkow et al., 2015) ont démontré que sous des conditions froides et humides, l'effet du travail réduit du sol sur le rendement pouvait être plus variable. Par exemple, dans l'argile limoneuse, le travail réduit du sol a permis d'obtenir des rendements moyens en grain supérieurs (8 à 30 %) à ceux du labour dans toutes les cultures, mais seulement après une période de transition de 6 ans (Figure 2). Dans le loam sableux, toutefois, l'effet du travail réduit sur le rendement dépendait principalement de l'espèce végétale cultivée; il avait un effet bénéfique sur le rendement du soya, peu d'effet sur le rendement du blé et un effet négatif sur le rendement du maïs (Figure 1). L'effet négatif du travail réduit du sol sur le rendement du maïs n'était toutefois observé que lorsque cette pratique était combinée au retour des résidus de culture de blé au sol, sans doute en raison d'un effet de paillis qui aurait pu retarder l'émergence et/ou avoir entraîné l'immobilisation de l'azote. Le fait que le maïs soit une plante particulièrement exigeante en termes de chaleur et d'azote (Tremblay et al., 2012) explique sans doute pourquoi l'effet négatif de cette interaction sur le rendement ait été observé seulement pour cette culture et non pour le blé et le soya.

Outre l'accumulation de résidus à la surface du sol, le travail réduit peut également impacter les rendements en complexifiant la lutte aux mauvaises herbes, et particulièrement celle des adventices pérennes (Brainard et al., 2013). Dans notre essai, nous avons d'ailleurs observé une plus grande prévalence de sétaire

glauque dans le loam sableux, lorsque les parcelles de maïs étaient cultivées sous travail réduit du sol. La gestion des adventices est un enjeu bien connu des producteurs ayant adopté les techniques de travail réduit du sol (Brainard et al., 2013). En raison de l'absence de travail mécanique du sol en profondeur, le travail réduit s'accompagne souvent d'une utilisation accrue d'herbicides (Day et al. 1999). Entre autres choses, cet enjeu fait en sorte que les bienfaits du travail réduit du sol sur l'environnement sont parfois débattus (Lankoski et al. 2006). De plus en plus de chercheurs et de producteurs s'intéressent donc à l'utilisation des cultures intercalaires et/ou cultures de couverture pour améliorer la lutte aux mauvaises herbes dans les systèmes sous travail réduit, ou semis direct du sol (Mirsky et al., 2012; Masilionyte et al., 2017). Cette stratégie de lutte intégrée demande cependant le développement d'un plan de culture bien raisonné, afin d'éviter que ces espèces ne deviennent un foyer d'infection des pathogènes pour les cultures principales et/ou qu'elles entrent en compétition avec celles-ci pour l'eau et les nutriments (Mirsky et al., 2012). En pratique, de petites réductions de rendement peuvent toutefois être acceptées par le producteur en semis direct ou en travail réduit du sol en raison des coûts de production inférieurs (Soane et al., 2012). Cependant, pour assurer une transition réussie, l'adoption du travail réduit du sol devrait idéalement être encadrée par des professionnels, afin d'adapter au mieux l'application de cette pratique en tenant compte des spécificités pédoclimatiques et culturales de l'entreprise.

Dans cet essai, l'engrais minéral (NPK) était souvent associé à des rendements supérieurs dans le maïs (Figure 3) et parfois aussi dans le blé. Toutefois, les engrais de ferme ont toujours permis d'obtenir des rendements supérieurs à ceux obtenus avec le contrôle minéral sans azote (PK). Une des forces de ce dispositif était de pouvoir comparer, sous les mêmes conditions pédoclimatiques, l'utilisation de trois engrais de ferme différents ayant des propriétés biochimiques contrastées. Parmi les engrais de ferme étudiés, le lisier de porc était celui qui permettait généralement d'obtenir les meilleurs rendements, sans doute en raison de son faible rapport C/N et de sa concentration élevée en NH4-N (Webb et al., 2013). Par contre, lorsque des engrais de ferme liquides, tels que le lisier de bovin et le lisier de porc, étaient combinés au retour des résidus de blé au sol dans l'argile limoneuse, une diminution des rendements en maïs était observée. Cet effet n'était pas observé lorsque le retour des résidus était combiné à des engrais solides (engrais minéral et fumier de volaille). Il est donc probable que l'importante quantité de résidus de blé laissée au sol l'année précédente ait absorbé les engrais liquides, rendant les éléments nutritifs moins disponibles pour la plante pendant les phases critiques de croissance des cultures.

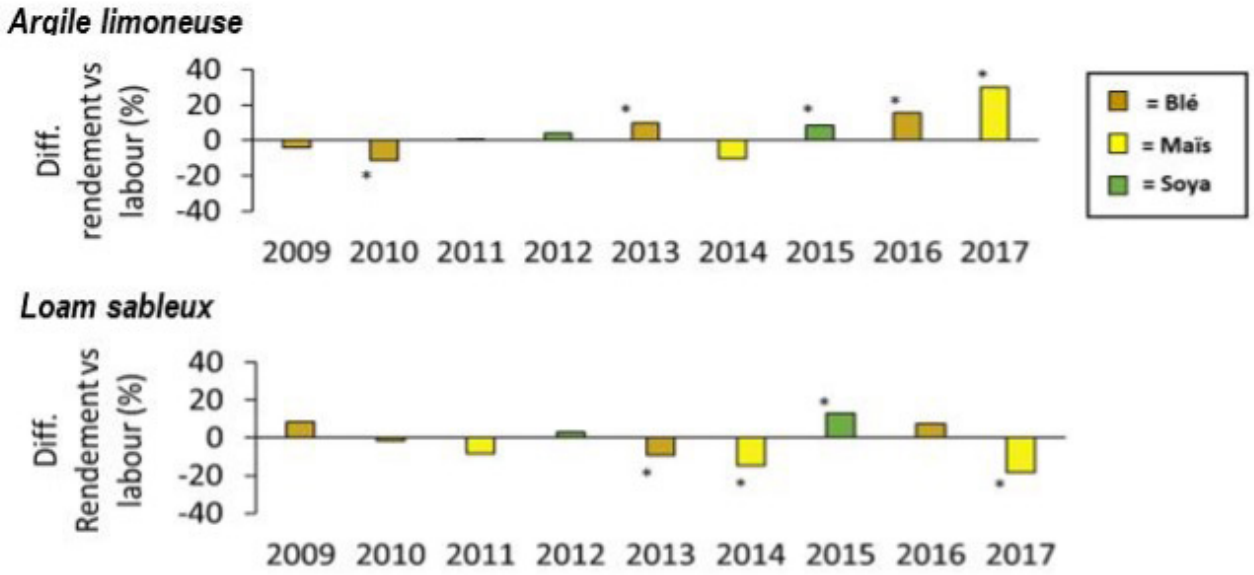

Figure 2. Gains ou pertes de rendement (%) avec le travail réduit du sol, lorsque comparé au labour, selon le type de sol, l'année et la culture. L'astérisque indique les différences statistiquement significatives.

L'efficacité des différentes sources fertilisantes était également étroitement liée aux conditions climatiques lors de la saison de croissance, particulièrement dans le maïs. Alors que l'engrais minéral permettait d'obtenir des rendements acceptables de maïs (vs une moyenne de 7 072 kg/ha pour la région), peu importe les années, le rendement du maïs fertilisé avec les engrais de ferme dépendait des conditions climatiques lors de la saison de croissance (Figure 3). En 2011, par exemple, les conditions étaient favorables à la minéralisation de la matière organique du sol et des engrais de ferme et la différence de rendement entre les engrais de ferme et l'engrais minéral était relativement faible, voire inexistante pour le lisier de porc. En 2017, par contre, les conditions très sèches lors de la pollinisation du maïs ont probablement nui à la minéralisation de l'azote organique des engrais de ferme et du sol. Sous ces conditions, les rendements étaient en moyenne 38 % inférieurs avec les engrais de ferme qu'avec l'engrais minéral complet, et jusqu'à 73 % inférieurs avec l'engrais de contrôle qu'avec l'engrais minéral.

De plus, les rendements étaient généralement plus sensibles à la source fertilisante (minérale ou organique) dans le loam sableux que dans l'argile limoneuse. En raison de sa teneur en matière organique initiale plus élevée, le sol fournit plus facilement les nutriments nécessaires à la plante dans l'argile limoneuse, alors que dans le loam sableux, elle dépend davantage des apports exogènes de matière organique et de nutriments (Bloom et al., 1988; Webb et al., 1998). Dans le loam sableux, ayant une capacité potentiellement plus faible à fournir de l'azote à la plante (Schipanski et al., 2010), les différences de rendement en fonction de la source fertilisante étaient plus élevées et un arrière-effet positif des engrais de ferme sur le rendement du soya a également été observé. Cet arrière-effet positif des engrais de ferme sur le rendement du soya pourrait s'expliquer par une amélioration de la fertilité du sol suivant une application répétée de ces engrais organiques (Nyiraneza et al. 2010; Webb et al., 2013) et/ou en raison d'une meilleure nodulation sous ces conditions (Ganeshamurthy et Sammi Reddy, 2000).

Puisque les rendements avec engrais de ferme étaient très acceptables dans le blé (moyenne de 3 512 kg/ha vs moyenne de 2 165 kg/ha pour la région) et ont parfois même engendré un arrière-effet positif sur le rendement du soya (moyenne de 3 757 kg/ha vs moyenne de 2 258 kg/ha pour la région), l'idéal serait sans doute de valoriser les engrais de ferme dans le blé, mais de considérer une stratégie de fertilisation complémentaire pour le maïs, étant donné ses besoins très élevés en azote. Une stratégie intéressante serait de considérer l'utilisation d'un engrais vert de légumineuses à l'automne précédant la culture du maïs. En effet, les légumineuses ont l'avantage de fixer de l'azote atmosphérique dans le sol tout en apportant une quantité limitée de phosphore lors de leur retour au sol. Une méta-analyse réalisée par Charles et al. (2017) a mis en évidence un apport équivalent en azote minéral de 86 kg N ha-1 et un gain de rendement de 16 à 27 % lorsqu'une culture de couverture de légumineuses était implantée l'année précédant une culture principale de maïs. De plus, jumelées à l'utilisation d'engrais de ferme, les cultures de couverture ont l'avantage d'améliorer la rétention de l'azote des engrais de ferme dans le sol et de diminuer le lessivage des éléments nutritifs vers les cours d'eau (Parkin et al., 2006; Cambardella et al., 2010).

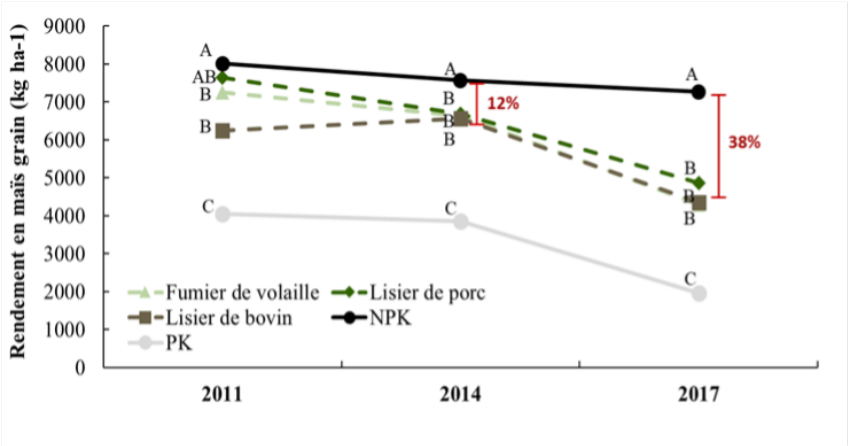

Figure 3. Représentation graphique de l'effet de l'année de croissance sur le rendement moyen (combinaison des sols et de toutes les autres pratiques de gestion) de maïs grain obtenu avec différentes sources fertilisantes.

Santé et fertilité du sol

Dans cette étude, les pratiques de conservation des sols (travail réduit, retour des résidus de culture au sol et utilisation d'engrais de ferme) ont généralement permis d'améliorer les indicateurs de santé du sol en surface (0-10 cm), lorsque comparé aux pratiques conventionnelles ou aux témoins et ce, peu importe le type de sol (Figure 4).

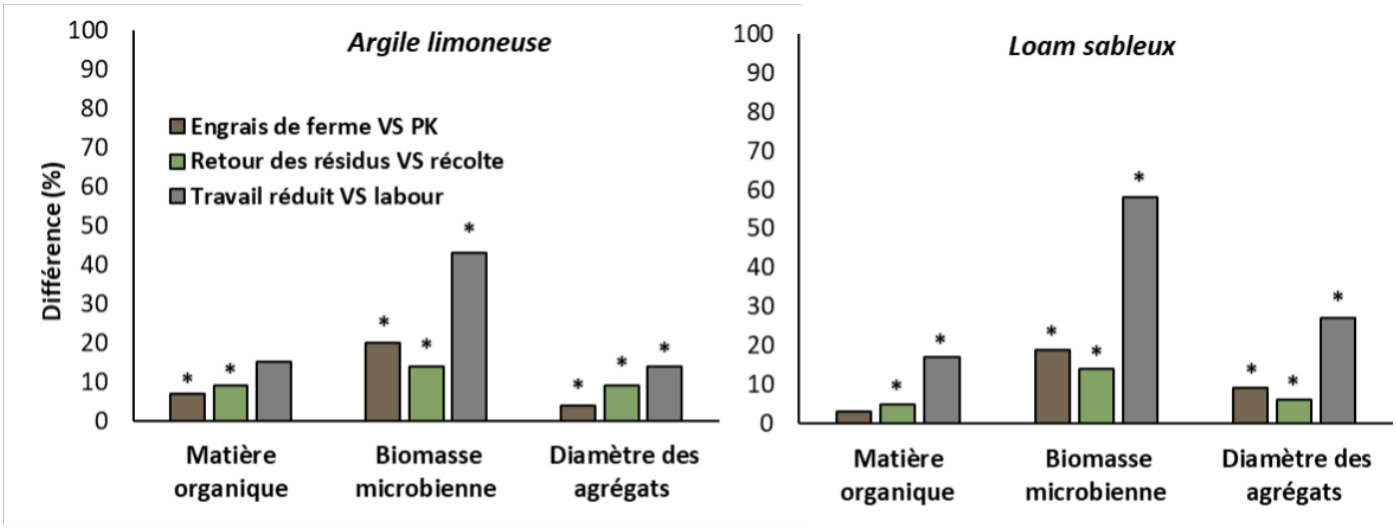

Figure 4. Résumé graphique des différences (%) entre les engrais de ferme et le contrôle minéral sans N (PK), le retour des résidus au sol et leur récolte ainsi que le travail réduit du sol et le labour pour différents indicateurs de santé du sol en surface (matière organique, biomasse microbienne, diamètre moyen pondéré des agrégats stables à l'eau).

Les indicateurs de santé du sol en surface (carbone organique, biomasse microbienne et diamètre des agrégats) étaient, en moyenne, de 14 à 58 % plus élevés sous travail réduit que sous labour (Samson et al., 2020a). De façon générale, le travail réduit du sol a un effet très positif sur l'agrégation et sur l'accumulation de carbone à la surface du sol (Sheehy et al., 2015). En effet, la réduction du travail du sol protège les agrégats contre l'action physique du labour sur les agrégats eux-mêmes et sur leurs agents de stabilisation, tels que les hyphes fongiques et les racines (Grandy et Neff, 2008) (Figure, 5). La stabilité accrue des agrégats du sol en surface est également favorisée en travail réduit par l'accumulation de composés carbonés dérivés des résidus de culture et de l'activité microbienne (Holland and Coleman, 1987). En effet, la matière organique est reconnue pour agir dans la stabilisation des agrégats et de la matière organique du sol en augmentant la cohésion entre les particules à l'intérieur de l'agrégat et en augmentant leur hydrophobicité (Abiven et al., 2009). L'inclusion de la matière organique fraîche au sein d'agrégats stables réduit ensuite son taux de minéralisation via une limitation de l'accessibilité aux microorganismes susceptibles de la dégrader.

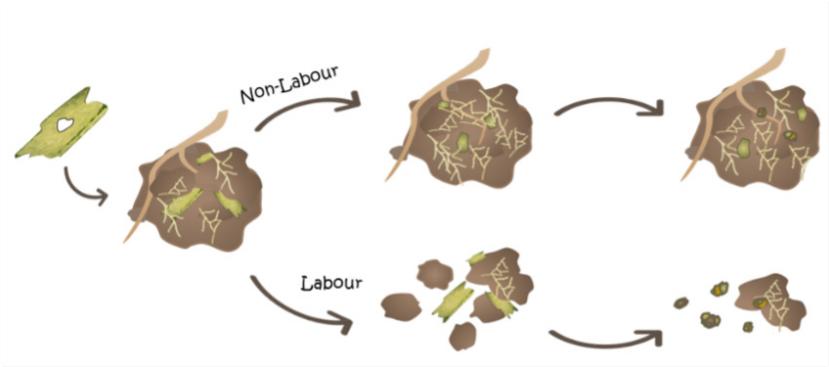

Figure 5. Effet du travail du sol sur la stabilité des agrégats et sur la stabilisation de la matière organique fraîche dans le sol.

Nos résultats ont donc démontré que même dans un horizon décennal, l'influence des pratiques agricoles sur les indicateurs de santé du sol peut être substantielle et peut aussi varier en fonction des combinaisons de pratiques et/ou du type de sol. Tel que déjà proposé par certains auteurs (Bissonnette et al., 2001; Viaud et al., 2011), nos résultats ont démontré une synergie entre le travail réduit et le retour de résidus et d'engrais de ferme au sol. L'effet positif des amendements organiques sur les indicateurs de santé du sol était beaucoup plus élevé lorsque combiné au travail réduit du sol que lorsque combiné au labour. Ce résultat s'explique entre autres par le fait que le travail réduit concentre les amendements organiques en surface (dans la zone d'échantillonnage de 0-10 cm) alors que le labour dilue les apports organiques sur une plus grande profondeur (Angers et Eriksen-Hamel, 2008).

Nos résultats ont également mis en lumière l'importance de la qualité biochimique de l'amendement organique pour l'amélioration de la santé et de la fertilité du sol (Samson et al., 2020b). En effet, le retour au sol des résidus de culture mature (C/N élevé et forte concentration en lignine) a eu un impact plus important sur la concentration de matière organique à la surface du sol que l'utilisation des engrais de ferme (Figure 3). Or, les résidus de culture ont principalement favorisé l'accumulation de carbone organique dans une fraction de matière organique du sol ayant un taux de résidence assez faible dans le sol (FL) et n'ont eu aucun effet sur les réserves d'azote du sol (Figure 6). Inversement, les engrais de ferme (et particulièrement le fumier de volaille et le lisier de bovin) ont favorisé l'accumulation de carbone et d'azote dans les fractions labiles de la matière organique des sols (MAOM grossière), contribuant ainsi de façon significative au maintien et à l'amélioration de la fertilité du sol sur le long terme (Nyiraneza et al. 2010; Webb et al., 2013) (Figure 6).

De plus, le retour au sol des résidus de culture n'a eu aucun effet sur l'accumulation de carbone et d'azote dans les fractions fines et stables de la matière organique du sol (MAOM fine), et n'a donc pas significativement contribué à la stabilisation de carbone dans le sol sur le long terme. Le fumier de volaille et le lisier de bovin, quant à eux, ont toutefois favorisé l'accumulation de carbone et d'azote dans les fractions stables de la matière organique du sol, mais seulement dans l'argile limoneuse.

Cette observation est en phase avec les modèles conceptuels de stabilisation de la matière organique dans le sol qui attribuent la formation de matière organique stable dans le sol à l'apport d'amendements organiques à faible concentration en lignine et à faible rapport C/N (Cotrufo et al., 2013), tel que les engrais de ferme. En effet, ce genre d'amendements organiques stimule l'activité microbienne et engendre la formation de sous-produits microbiens, ayant une propension élevée aux associations organo-minérales (Kögel-Knabner et al., 2008) et donc, à la stabilisation de la matière organique (et du carbone) dans le sol sur le long terme. Toutefois, la stabilisation de ces produits organiques sur les surfaces minérales du sol n'est possible que si des surfaces minérales réactives sont présentes dans le sol et ne sont pas déjà saturées de matière organique (Hassink, 1997). C'est la raison pour laquelle, dans notre étude, l'utilisation de fumier de volaille et de lisier de bovin a permis la formation de complexes organo-minéraux stables, mais seulement dans l'argile limoneuse, étant donné sa plus grande teneur en argile (Figure 6).

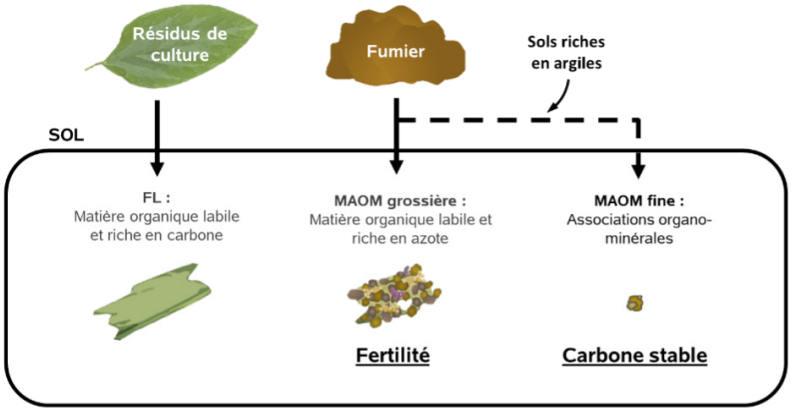

Figure 6. Résumé graphique de l'effet du type d'amendement organique sur l'accumulation de carbone et d'azote au sein de fractions de la matière organique du sol contribuant à la fertilité ou au stockage de carbone dans le sol.

Le lisier de porc n'a toutefois pas eu la même incidence positive sur la santé et la fertilité du sol, peut-être en raison de sa plus faible concentration en carbone et de sa haute concentration en NH4-N et en composés solubles (Morvan et al., 2006). Ces caractéristiques pourraient avoir stimulé la minéralisation de la matière organique indigène du sol, ou encore avoir favorisé le lessivage d'une partie des composés organiques solubles du lisier de porc vers les couches plus profondes (Angers et al., 2010). Ceci n'est pas sans rappeler le fait qu'outre l'effet globalement positif des engrais de ferme sur la santé et la fertilité du sol, certaines problématiques environnementales spécifiques peuvent être liées à leur utilisation dans un contexte agricole. Ces enjeux rappellent l'interconnexion entre tous les éléments d'un agroécosystème, la complexité de leurs interactions et le défi que représente le développement de systèmes culturaux productifs, durables et respectueux de l'environnement.

Stocks de carbone du sol

De plus en plus d'instances privées et gouvernementales s'intéressent actuellement au rôle potentiel des sols agricoles dans la lutte aux changements climatiques, en raison de leur important potentiel de séquestration de carbone atmosphérique (Minasny et al., 2017) et des autres bénéfices qui en découlent, tels qu'une amélioration potentielle de la santé des sols agricoles et une meilleure résilience des systèmes agricoles face aux aléas climatiques (Lal et al., 2011). Plusieurs pays se dotent donc actuellement de politiques visant à favoriser les pratiques permettant de stocker du carbone dans les sols agricoles. Le gouvernement du Canada a d'ailleurs récemment annoncé qu'il investira dans un fond des solutions climatiques naturelles pour l'agriculture.

Or, à l'heure actuelle, il demeure toujours très difficile de quantifier avec précision l'impact réel d'une pratique agricole sur les stocks de carbone du sol, en raison notamment de la variabilité spatio-temporelle de la concentration en carbone des sols, des coûts associés aux mesures y étant associées et au manque de précision des modèles prédictifs (Paustian et al., 2016). De plus, les procédures standardisées pour la mesure et le suivi des stocks de carbone organique dans les sols suggèrent actuellement une profondeur d'échantillonnage de 30 cm (FAO, 2020). Cette recommandation est basée sur la prémisse voulant que le carbone profond du sol soit très stable et ne réagisse généralement pas, ou très peu, aux pratiques agricoles. Or, des études récentes ont démontré que sous certaines conditions, les pratiques agricoles, comme le labour et la rotation des cultures, pouvaient influencer le contenu en carbone organique sous les 30 premiers centimètres de sol (Osanai et al., 2020).

Nos résultats ont d'ailleurs démontré que les changements de stocks de carbone en profondeur pouvaient être importants au point de dicter la réponse globale du sol aux différents itinéraires techniques agricoles (Samson et al., 2021). En effet, l'effet des

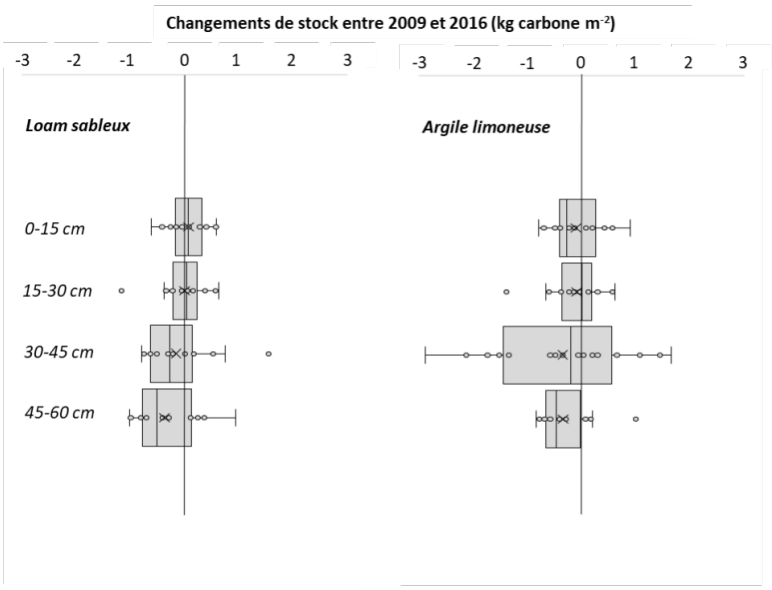

Figure 7. Distribution des changements observés de stocks de carbone du sol à différentes profondeurs après 8 années de traitements.

différents traitements sur les stocks de carbone était beaucoup plus faible dans les 15 premiers cm de sol (0,36 à 0,76 kg C m -2) que dans les couches sous-jacentes (jusqu'à 2,3 kg C m -2 pour la couche 30 - 45 cm) (Figure 7). Ainsi, lorsque toute la profondeur du profil était considérée (0-60 cm), ce sont les effets en profondeur qui influençaient la réponse des stocks de carbone du sol aux différents systèmes de culture.

De plus, l'effet des traitements sur les stocks de carbone était contrasté selon la profondeur. Dans le loam sableux, par exemple, les pratiques de conservation des sols (travail réduit, retour des résidus et utilisations d'engrais organiques) ont généralement (mais pas toujours) engendré des stocks de carbone plus élevés que les traitements conventionnels dans la couche 0-15 cm. Dans les couches 15-30, 30-45 et 45-60 cm, par contre, l'effet des traitements était bien différent et dépendait fortement des interactions entre les différentes pratiques. Ainsi, sous labour, les stocks de carbone sous la couche de surface (> 15 cm) étaient plus élevés lorsque l'utilisation d'engrais de ferme liquide (et particulièrement de lisier de porc) était combinée au retour des résidus au sol que lorsque combinée à la récolte des résidus (Figure 8). La teneur élevée en matière organique soluble des engrais organiques liquides (et particulièrement du lisier de porc) (Morvan et al., 2006) a sans doute favorisé le lessivage et l'accumulation de la matière organique issue de ces engrais vers les couches plus profondes de sol (Angers et al., 2010). Cette accumulation de C et de N en profondeur était particulièrement marquée lorsque la présence de résidus de culture sous la couche de labour en permettait la rétention. Sous les conditions froides et humides qui prévalent au site expérimental, l'activité microbienne en profondeur est ralentie, par rapport à la surface, ce qui permet à la matière organique se trouvant en profondeur d'être préservée sur le long terme. Lorsque le labour était jumelé à l'utilisation d'engrais minéraux, toutefois, les stocks de carbone en profondeur étaient plus élevés lorsque les résidus étaient récoltés que lorsqu'ils étaient retournés au sol (Figure 8). Dans des conditions semblables, Shahbaz et al. (2017) ont également constaté que l'utilisation d'azote minérale sur un horizon décennal réduisait considérablement les stocks de carbone du sous-sol (25-60 cm) dans un luvisol labouré. Les stocks profonds de carbone semblent donc être particulièrement sensibles aux différentes combinaisons de sources fertilisantes et de pratiques de gestion des résidus lorsque le sol est labouré et que la matière organique et les nutriments sont enfouis en profondeur.

Dans les circonstances de notre étude, les variations des stocks de carbone sous la surface (> 15 cm) étaient si importantes par rapport à celles de la couche de surface qu'elles ont déterminé la réponse de l'ensemble du profil du sol aux pratiques de gestion. Ces résultats montrent que la dynamique du carbone profond doit être spécifiquement prise en compte et que les recommandations pour la gestion des stocks de carbone dans les sols agricoles devraient s'étendre au-delà de la recommandation visant les 30 premiers centimètres de sol, au moins dans les conditions pédoclimatiques de l'est du Canada.

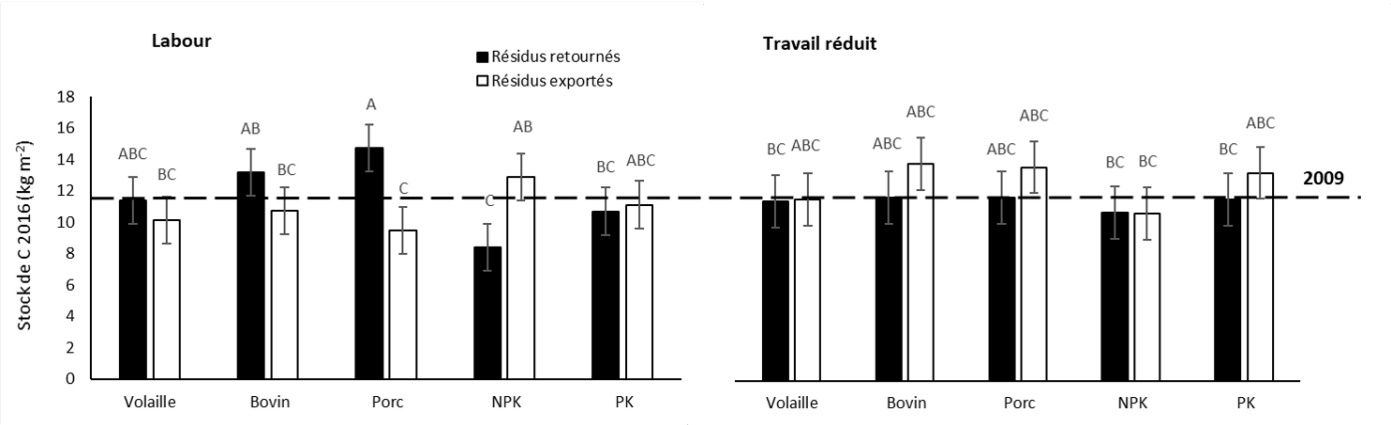

Figure 8. Stocks de carbone totaux du sol (0-60 cm) après huit années de traitements dans le loam sableux. Des lettres différentes indiquent une différence significative entre les traitements.

Applicabilité et perspectives

Les résultats obtenus dans ce projet démontrent bien la complexité des facteurs agricoles, climatiques, biogéochimiques et physiques pouvant affecter l'efficacité agroenvironnementale des systèmes de production en grandes cultures. À cette complexité intrinsèque, s'ajoutent également les enjeux financiers, sociaux et environnementaux liés à la gestion des entreprises agricoles. En effet, pour subsister sur le long terme, les productions agricoles doivent évidemment être rentables, et donc, obtenir des rendements acceptables. Les producteurs doivent également tenir compte de la durabilité de leur entreprise. Celle-ci passe inévitablement par le maintien, ou encore l'amélioration de la santé de leurs sols. Les producteurs agricoles doivent également répondre aux préoccupations croissantes de la population et des institutions gouvernementales liées à l'impact de l'agriculture sur l'environnement et sur la santé humaine. À l'échelle locale et internationale, on sent donc une mouvance vers le développement d'une approche agroécologique afin de faire face aux enjeux économiques, sociaux et environnementaux liés à la production de denrées alimentaires. Bien qu'il soit aisé de s'imaginer qu'en adoptant une pratique agricole dite de « conservation » un producteur s'assure d'optimiser à la fois les services agronomiques et environnementaux rendus par les sols agricoles, la réalité s'avère un peu plus complexe.

En effet, les pratiques permettant d'améliorer le rendement des cultures et/ou d'améliorer la santé des sols ont un effet direct sur la rentabilité et la durabilité de l'entreprise agricole. Ceci peut faciliter l'acceptabilité de ces pratiques et leur adoption par un plus grand nombre de producteurs. En revanche, un producteur agricole sera peu enclin à adopter de son propre gré des pratiques permettant de stocker du carbone atmosphérique dans les sols, à moins qu'elles n'aient aussi un impact positif sur la santé du sol ou sur le rendement de ses cultures. En effet, les producteurs agricoles répondent aux lois d'un marché libéralisé et se doivent donc d'offrir un produit compétitif à l'échelle mondiale. En acceptant une augmentation de ses coûts ou une baisse de son rendement au nom de la durabilité du système agroalimentaire canadien et/ou de la lutte aux changements climatiques, le producteur agricole se positionne donc potentiellement dans une situation précaire, face au reste du marché. Dans ce contexte, il pourrait donc être pertinent de développer des incitatifs financiers pour la séquestration de carbone dans les sols agricoles et/ou le maintien ou l'amélioration des indicateurs de santé des sols. Cependant, les incitatifs devraient être basés sur des mesures fiables et/ou sur des prédictions adaptées au contexte pédoclimatique et cultural à l'échelle de la ferme.

Chacune à leur manière, ces méthodes posent toutefois d'importants défis (Smith et al. 2020). Les stratégies actuellement disponibles pour le suivi des changements des stocks decarbone dans le sol à l'échelle de la ferme comprennent les mesures directes et la modélisation, qui comportent toutes deux certaines limites (Smith et al., 2019). En effet, la mesure des changements des stocks de carbone à la ferme serait très coûteux, notamment en raison de la variabilité spatiale et temporelle, qui exige un nombre élevé d'échantillons pour arriver à une évaluation représentative des changements de stocks sous différentes pratiques agricoles (de Gruijter et al., 2018). Il a aussi été démontré que l'amplitude du changement annuel de stock de carbone causé par les conditions météorologiques annuelles puisse parfois dépasser les changements de stock liés aux pratiques de gestion, du moins, sur une échelle de temps décennale (Dimassi et al., 2014; Paustian et al., 2016). Compte tenu des coûts d'échantillonnage élevés associés aux mesures intensives pour tenir compte de la variabilité spatiale et temporelle du sol, les modèles fondés sur les processus peuvent être privilégiés. Toutefois, cette stratégie comporte aussi de grands défis, notamment en raison de l'ampleur des facteurs à considérer et à paramétrer dans le modèle pour obtenir des prédictions fiables à l'échelle de la ferme (Otway et al. 2020).

Il faudra donc investir des efforts dans la mise au point de nouvelles technologies de capteurs qui pourraient permettre d'effectuer des échantillonnages et des mesures rapides et peu coûteuses. Ces efforts pourraient également bénéficier à l'amélioration des modèles fondés sur les processus, qui exigent des données de grande qualité générées par des protocoles de mesure cohérents dans divers types de sol, zones climatiques et pratiques de gestion des sols sur de longues périodes. Cela souligne également le besoin pour le gouvernement canadien d'appuyer les essais scientifiques diachroniques à long terme en agriculture. Des protocoles d'échantillonnage et de mesure normalisés pour ces essais permettaient de créer une base de données nationale très utile et nécessaire qui pourrait être utilisée pour mettre sur pied un programme national fiable d'atténuation des gaz à effet de serre en agriculture (Paustian, et al., 2016).

De plus, même s'ils n'ont pas été étudiés dans cette étude, il est aussi important de prendre en compte d'autres processus majeurs, mais parfois sous-estimés qui entrent en jeu dans l'équation. Par exemple, lorsqu'on s'intéresse au rôle à jouer des sols agricoles dans la lutte aux changements climatiques, la séquestration de CO2 est souvent mise de l'avant, mais il ne faut pas omettre de considérer les autres gaz à effet de serre pouvant être produits par les sols agricoles. Ainsi, si une pratique agricole permet de stocker du carbone dans le sol, mais qu'elle engendre une libération semblable ou supérieure d'équivalents CO2 sous forme de N2O, son impact sur les changements climatiques ne sera pas nécessairement celui attendu (Li et al., 2005; Zaehle et al., 2011).

En bref, avant que les problématiques susmentionnés ne soient tenues en compte, les incitatifs pour la séquestration du carbone dans les sols agricoles ne pourraient être basés que sur des estimations grossières, ou sur la recommandation à grande échelle de pratiques de conservation des sols ayant un faible niveau de risque relativement au rendement et aux bilans de gaz à effet de serre. Plus d'efforts de recherche seront toutefois nécessaires pour prédire et/ou quantifier avec certitudes l'effet de différentes pratiques de production agricole sur les services agronomiques et environnementaux rendus par les sols agricoles.

Conclusion

L'agriculture et l'alimentation sont des éléments clés de l'économie canadienne. Les enjeux globaux auxquels la planète est confrontée depuis quelques décennies ne sont pas sans nous rappeler l'importance de maintenir notre capacité à produire des denrées alimentaires et à développer des stratégies efficaces d'adaptation et de mitigation face aux changements climatiques. Bien que la séquestration de carbone dans les sols agricoles ait été identifiée comme étant l'une des solutions les plus attrayantes dans la lutte aux changements climatiques, les résultats de notre étude démontrent que, sous certaines conditions, un compromis soit à faire entre le rendement des cultures, la santé du sol en surface et la séquestration de carbone sur tout le profil de sol. En effet, sous les conditions de notre étude, bien que le travail réduit du sol ait généralement été bénéfique à la santé du sol en surface, son effet sur le rendement variait en fonction du type de sol et de la culture. Le retour des résidus au sol a pour sa part parfois eu des effets négatifs sur le rendement, mais certains effets positifs ont été observés sur la santé du sol en surface et le stockage de carbone en profondeur. Globalement, l'effet des engrais de ferme était influencé par leur qualité biochimique. Ainsi, le lisier de porc permettait parfois d'obtenir de meilleurs rendements que le lisier de bovin et le fumier de volaille, mais son effet positif sur la santé du sol en surface était moins important. En revanche, le fumier de volaille et le lisier de bovin ont favorisé l'accumulation préférentielle de carbone et d'azote dans les fractions labiles et stables de la matière organique du sol, contribuant ainsi à améliorer à la fois la fertilité du sol et le stockage de carbone dans le sol sur le long terme. Or, sur la période de temps étudiée, ces engrais de ferme ne permettaient pas toujours d'obtenir des rendements aussi élevés que l'engrais minéral, particulièrement dans le maïs, étant donné ses besoins élevés en azote. Pour parvenir à développer une approche agroécologique applicable à grande échelle, il faudra donc intégrer d'autres pratiques innovantes, telles que l'intégration des cultures de couverture et d'engrais verts et continuer de développer les modèles prédictifs, qui tiennent compte des réalités culturales et pédoclimatiques à l'échelle de la ferme. Ces résultats ne devraient toutefois pas être vus comme un frein à l'adoption des pratiques de conservation des sols, mais comme un appel à reconnaître la complexité intrinsèque des agroécosystèmes et à investir dans la science et le développement d'outils fiables de mesure et de prédiction. Ils se veulent également un appel à reconnaître à leur juste valeur tous les services écosystémiques rendus par les sols agricoles. Bien que le rendement des cultures et la rentabilité de l'entreprise agricole soient actuellement les principaux facteurs qui dictent le marché et les prises de décision, les pays qui auront su investir dans la durabilité de leurs systèmes agro-alimentaires seront nécessairement avantagés sur le long terme. S'il sait reconnaître cette valeur, le Canada investira dans la résilience de son système agroalimentaire et pourra compter sur un retour de son investissement dans les années à venir. Rien n'a plus d'importance, puisque comme l'a dit le Dr. Swaminathan, agronome et premier prix Nobel de l'alimentation : « Si l'agriculture va mal, rien d'autre n'aura de chance d'aller bien ».

References

Abiven, S., Menasseri, S., Chenu, C., 2009. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – A literature analysis. Soil Biology and Biochemistry 41, 1-12.

Angers, D., Eriksen-Hamel, N., 2008. Full-inversion tillage and organic carbon distribution in soil profiles: A meta-analysis. Soil Science Society of America Journal 72, 1370-1374.

Angers, D., Chantigny, M., Macdonald, J., Rochette, P., Côté, D., 2010. Differential retention of carbon, nitrogen and phosphorus in grassland soil profiles with long-term manure application. Nutrient Cycling in Agroecosystems 86, 225-229.

Bissonnette, N., Angers, D.A., Simard, R.R., Lafond, J., 2001. Interactive effects of management practices on water-stable aggregation and organic matter of a Humic Gleysol. Canadian Journal of Soil Science 81, 545-551.

Bloom, T., Sylvester-Bradley, R., Vaidyanathan, L., Murray, A., 1988. Apparent recovery of fertilizer nitrogen by winter wheat. Nitrogen efficiency in agricultural soils, 27-37.

Brainard, D.C., Haramoto, E., Williams, M.M., Mirsky, S., 2013. Towards a no-till no-spray future? Introduction to a symposium on nonchemical weed management for reduced-tillage cropping systems. Weed Technology 27, 190–192.

Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Singer, J.W., 2010. Soil nitrogen response to coupling cover crops with manure injection. Nutrient cycling in agroecosystems 87, 383-393.

Charles, A., Vanasse, A., Van Eerd, L.L., Tremblay, N., Bourgeois, G., Lynch, D.H., 2017. Meta-analysis of cover cropping systems: The effects of cover crops on subsequent cash crop yields and nitrogen contribution. ASA, CSSA and SSSA International Annual Meetings. Tampa, FL.

Cotrufo, M.F., Wallenstein, M.D., Boot, C.M., Denef, K., Paul, E., 2013. The Microbial Efficiency Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? Global Change Biology 19, 988-995.

Day, J., Hallahan, C., Sandretto, C., Lindamood, W., 1999. Pesticide use in US corn production: Does conservation tillage make a difference? Journal of soil and water conservation 54, 477–484.

Dimassi, B., Mary, B., Wylleman, R., Labreuche, J., Couture, D., Piraux, F., Cohan, J.-P., 2014. Long-term effect of contrasted tillage and crop management on soil carbon dynamics during 41 years. Agriculture, Ecosystems and Environment 188, 134-146.

FAO. 2020. A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes – GSOC-MRV Protocol. Rome. https://doi.org/10.4060/cb0509en

Ganeshamurthy, A.N., Sammi Reddy, K., 2000. Effect of Integrated Use of Farmyard Manure and Sulphur in a Soybean and Wheat Cropping System on Nodulation, Dry Matter Production and Chlorophyll Content of Soybean on Swell-Shrink Soils in Central India. Journal of Agronomy and Crop Science 185, 91-97.

Grandy, A.S., Neff, J.C., 2008. Molecular C dynamics downstream: the biochemical decomposition sequence and its impact on soil organic matter structure and function. Science of the Total Environment 404, 297-307.

de Gruijter, J.J., McBratney, A.B., Minasny, B., Wheeler, I., Malone, B.P., Stockmann, U., 2018. Farm-scale soil carbon auditing. Pedometrics. Springer, pp. 693-720.

Hassink, J., 1997. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. Plant and Soil 191, 77–87.

Hobbs, P.R., Sayre, K., Gupta, R., 2008. The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 363, 543-555.

Holland E, Coleman DC, 1987. Litter placement effects on microbial and organic matter dynamics in an agroecosystem. Ecology 68, 425-433.

Kögel-Knabner, I., Guggenberger, G., Kleber, M., Kandeler, E., Kalbitz, K., Scheu, S., Eusterhues, K., Leinweber, P., 2008. Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 171, 61-82.

Lal, R., Delgado, J., Groffman, P., Millar, N., Dell, C., Rotz, A., 2011. Management to mitigate and adapt to climate change. Journal of Soil and Water Conservation 66, 276-285.

Lankoski, J., Ollikainen, M., Uusitalo, P., 2006. No-till technology: benefits to farmers and the environment? Theoretical analysis and application to Finnish agriculture. European Review of Agricultural Economics 33, 193-221.

Li, C., Frolking, S., Butterbach-Bahl, K., 2005. Carbon sequestration in arable soils is likely to increase nitrous oxide emissions, offsetting reductions in climate radiative forcing. Climatic Change 72, 321-338.

Masilionyte, L., Maiksteniene, S., Kriauciuniene, Z., Jablonskyte-Rasce, D., Zou, L., Sarauskis, E., 2017. Effect of cover crops in smothering weeds and volunteer plants in alternative farming systems. Crop Protection 91, 74-81

Minasny, B., Malone, B.P., McBratney, A.B., Angers, D.A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.-S., Cheng, K., Das, B.S., 2017. Soil carbon 4 per mille. Geoderma 292, 59-86.

Mirsky, S.B., Ryan, M.R., Curran, W.S., Teasdale, J.R., Maul, J., Spargo, J.T., Moyer, J., Grantham, A.M., Weber, D., Way, T.R., 2012. Conservation tillage issues: Cover crop-based organic rotational no-till grain production in the mid-Atlantic region, USA. Renewable Agriculture and Food Systems 27, 31-40.

Morvan, T., Nicolardot, B., Péan, L., 2006. Biochemical composition and kinetics of C and N mineralization of animal wastes: a typological approach. Biology and Fertility of Soils 42, 513–522.

Nyiraneza, J., Chantigny, M., N'Dayegamiye, A., Laverdiere, M., 2010. Long-Term Manure Application and Forages Reduce Nitrogen Fertilizer Requirements of Silage Corn-Cereal Cropping Systems. Agronomy Journal 102, 1244–1251.

Ogle, S.M., Swan, A., Paustian, K., 2012. No-till management impacts on crop productivity, carbon input and soil carbon sequestration. Agriculture, Ecosystems and Environment 149, 37-49.

Oldfield, E.E., Bradford, M.A., Wood, S.A., 2019. Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields. Soil, pp. 15-32.

Otway, J., 2020. Farm-Scale Modelling for the Spatio-Temporal Prediction of Soil Carbon Sequestration in South-Western Australia: Bringing Soil Carbon Modelling to the Farm Gate

Parkin, T., Kaspar, T., Singer, J., 2006. Cover crop effects on the fate of N following soil application of swine manure. Plant and Soil 289, 141–152.

Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G.P., Smith, P., 2016. Climate-smart soils. Nature 532, 49-57.

Pittelkow, C.M., Linquist, B.A., Lundy, M.E., Liang, X., van Groenigen, K., Lee, J., van Gestel, N., Six, J., Venterea, R., van Kessel, C., 2015. When does no-till yield more? A global meta-analysis. Field Crops Research 183, 156-168.

Samson, M.-E., Menasseri-Aubry, S., Chantigny, M., Angers, D., Royer, I., Vanasse, A., 2019. Crop response to soil management practices is driven by interactions among practices, crop species and soil type. Field Crops Research 243, 107623.

Samson, M.-É., Chantigny, M.H., Vanasse, A., Menasseri-Aubry, S., Royer, I., Angers, D.A., 2020a. Management practices differently affect particulate and mineral-associated organic matter and their precursors in arable soils. Soil Biology and Biochemistry, 107867.

Samson, M.-É., Chantigny, M.H., Vanasse, A., Menasseri-Aubry, S., Angers, D.A., 2020b. Coarse mineral-associated organic matter is a pivotal fraction for SOM formation and is sensitive to the quality of organic inputs. Soil Biology and Biochemistry, 107935.

Samson, M.-É., Chantigny, M.H., Vanasse, A., Menasseri-Aubry, S., Royer, I., Angers, D.A., 2021. Subsurface C and N stock changes drive whole-soil profile response to agricultural management practices. Article accepted with major revision, Agriculture, ecosystems and environment.

Schipanski, M., Drinkwater, L., Russelle, M., 2010. Understanding the variability in soybean nitrogen fixation across agroecosystems. Plant Soil 329, 379–397.

Shahbaz, M., Kuzyakov, Y., Maqsood, S., Wendland, M., Heitkamp, F., 2017. Decadal nitrogen fertilization decreases mineral-associated and subsoil carbon: a 32-year study. Land degradation & development 28, 1463-1472.

Sheehy, J., Regina, K., Alakukku, L., Six, J., 2015. Impact of no-till and reduced tillage on aggregation and aggregate-associated carbon in Northern European agroecosystems. Soil & Tillage Research 150, 107-113.

Smith, P., Soussana, J.F., Angers, D., Schipper, L., Chenu, C., Rasse, D.P., Batjes, N.H., van Egmond, F., McNeill, S., Kuhnert, M., 2020. How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. Global Change Biology 26, 219-241.

Soane, B.D., Ball, B.C., Arvidsson, J., Basch, G., Moreno, F., Roger-Estrade, J., 2012. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. Soil and Tillage Research 118, 66-87.

Toliver, D., Larson, J., Roberts, R., English, B., Ugarte, D., West, T., 2012. Effects of No-Till on Yields as Influenced by Crop and Environmental Factors. Agronomy Journal 104, 530-541.

Tremblay, N., Bouroubi, Y., Belec, C., Mullen, R.W., Kitchen, N., Thomason, W., Ebelhar, S., Mengel, D., Raun, W., Francis, D.D., Vories, E., Ortiz-Monasterio, I., 2012. Corn Response to Nitrogen is Influenced by Soil Texture and Weather. Agronomy Journal. 104, 1658-1671.

UNCCD (United Nations Conventions to Combat Desertification), 2017. Global Land Outlook. Bonn, Germany.

Viaud, V., Angers, D., Parnaudeau, V., Morvan, T., Menasseri-Aubry, S., 2011. Response of organic matter to reduce tillage and animal manure in a temperate loamy soil. Soil Use And Management 27, 84-93.

Webb, J., Seeney, F., Sylvester-Bradley, R., 1998. The response to fertilizer nitrogen of cereals grown on sandy soils. J. Agric. Sci. 130, 271–286.

Webb, J., Sorensen, P., Velthof, G., Amon, B., Pinto, M., Rodhe, L., Salomon, E., Hutchings, N., Burczyk, P., Reid, J., 2013. An assessment of the variation of manure nitrogen efficiency throughout Europe and an appraisal of means to increase Manure-N efficiency. Advances in Agronomy 119, 371–442.

Zaehle, S., Ciais, P., Friend, A.D., Prieur, V., 2011. Carbon benefits of anthropogenic reactive nitrogen offset by nitrous oxide emissions. Nature Geoscience 4, 601-605.