

## Mémoire au Comité sénatorial permanent de l'agriculture : Étude sur la santé des sols

Cultivons Biologique Canada est heureux de contribuer aux commentaires suivants dans le cadre de l'étude du Sénat sur la santé des sols. Ce mémoire résume la littérature scientifique sur la relation entre l'agriculture biologique et la santé des sols. Il fait partie d'une [étude](#) (en anglais) plus vaste que nous entreprenons (qui sera terminée par l'été 2024) visant à déterminer les impacts de l'agriculture biologique sur les résultats environnementaux, climatiques et économiques au Canada.

### L'agriculture biologique comme modèle pour restaurer la santé des sols agricoles du Canada : une revue de la littérature scientifique

La santé des sols est le fondement de notre système alimentaire et est essentielle à la sécurité alimentaire et la lutte contre le changement climatique. Cependant, des décennies d'agriculture intensive ont contribué à la perte de fertilité des sols, et l'érosion des sols coûte [3,1 milliards de dollars](#) par année aux Canadiens.

**La combinaison des pratiques agroécologiques permet aux agriculteurs d'optimiser la santé des sols et doit être encouragée.**

Des études ont montré les avantages des pratiques de gestion bénéfiques (PGB) telles que la rotation diversifiée des cultures, le travail de conservation du sol, les amendements et les cultures de couverture, ainsi que leurs impacts sur la santé des sols (voir l'annexe 2). Cependant, il y a moins de recherches sur la façon dont ces pratiques fonctionnent ensemble en tant que système et sur la façon dont l'utilisation simultanée de certaines pratiques dans diverses combinaisons peut entraîner des gains importants. Les pratiques individuelles sont importantes pour améliorer la santé des sols ; cependant, la mise en œuvre de ces pratiques séparément peut ne pas entraîner d'améliorations systémiques mesurables et durables.

**L'agriculture biologique offre un système idéal pour la recherche et la mise à l'essai de pratiques combinées afin de gérer les compromis et d'améliorer les résultats.**

**L'agriculture biologique se concentrent sur le maintien et le renforcement de la santé des sols grâce à la gestion écologique, en utilisant nécessairement une approche systémique de multiples pratiques agroécologiques pour assurer la résilience de la production.** Les principales pratiques recommandées pour gérer la santé des sols sont couramment utilisées dans les systèmes de culture biologique dans des combinaisons variables selon l'intensité de la gestion.

Cela constitue un terrain d'essai idéal pour les pratiques qui peuvent gérer les compromis dans l'ensemble du secteur agricole, comme le risqué croissant de gérer l'azote au détriment de la diminution du carbone, un facteur clé pour la santé des sols. **Les systèmes d'agriculture biologique sont des systèmes de production idéaux pour tester et affiner la gestion avancée du carbone organique et de l'azote afin d'améliorer les résultats agroenvironnementaux globaux pour le Canada. Ce point est développé à l'annexe 1.** Les systèmes biologiques stimulent l'innovation constante pour répondre à des défis tels que la lutte contre les mauvaises herbes et les ravageurs, alors l'adoption de pratiques biologiques peut être bénéfique pour tous les producteurs, aidant à relever des défis tels que les coûts élevés des intrants, la résistance aux herbicides et les impacts environnementaux.

**La recherche suggère une amélioration de la santé des sols et du carbone organique du sol grâce à la gestion biologique ; cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires.**

Une récente revue de la littérature sur la santé des sols dans les systèmes biologiques au Canada (**voir l'annexe 2**) a révélé que, par rapport à la production conventionnelle, **la gestion biologique peut maintenir la santé des sols et le carbone organique du sol (COS)**. Cela est particulièrement vrai lorsque les meilleures pratiques de gestion sont utilisées et combinées dans les systèmes biologiques. Ces pratiques comprennent la réduction de l'intensité et de la fréquence du travail du sol, les cultures de couverture, les fourrages et l'intégration du bétail dans le système. Cependant, les pratiques agricoles dans les systèmes biologiques [varient considérablement en intensité](#), avec des impacts variables sur les résultats en matière de santé des sols. De plus, les recherches menées dans le contexte canadien, en particulier pour les cultures horticoles, font défaut en ce qui concerne la santé des sols. Cela confirme la nécessité d'effectuer davantage de recherches pour évaluer correctement les impacts de la gestion biologique avec une variété de pratiques dans le système agricole diversifié du Canada.

### **Étude de cas : Upland Organics, Saskatchewan : La combinaison de pratiques régénératrices améliore la santé des sols et la résilience climatique.**

Upland Organics, une ferme mixte de 8 000 acres de bovins et de céréales certifiée biologique régénératrice près de Wood Mountain, en Saskatchewan, a **obtenu une augmentation moyenne de 1 % de la matière organique du sol (MOS)** (totale ~ 3 %), ainsi qu'une augmentation de l'agrégation et de la stabilité du sol. Mesure clé de la santé des sols, la MOS a également un impact significatif sur la résilience de la ferme à la sécheresse, puisque chaque augmentation de 1 % de la MOS permet aux sols de contenir [25 000 gallons](#) d'eau supplémentaires par acre. **La santé des sols est une stratégie clé de résilience climatique** pour la ferme, située dans le triangle de Palliser frappé par la sécheresse.

Upland Organics se concentre sur la gestion de la santé des sols en combinant des pratiques telles que le travail réduit du sol, les rotations de cultures diversifiées et prolongées, les cultures intercalaires, les cultures de couverture, les bandes de pollinisateurs, le compostage et le pâturage en rotation afin de construire un écosystème de sol résilient qui soutient la conservation de l'eau du sol, la fertilité naturelle et la lutte antiparasitaire. Cette augmentation de la MOS correspond également à une augmentation annuelle d'environ [1,5 tonne](#) de carbone organique du sol (COS) par hectare par année, ce qui est considérablement supérieur au taux d'environ 0,2 tSOC/ha/an attribué à l'agriculture sans labour des Prairies, ce qui aide la ferme à contribuer à l'atténuation des changements climatiques. Bien que le risque d'érosion des sols ait diminué grâce à la réduction du travail du sol et de la jachère, l'utilisation de plusieurs pratiques régénératrices peut grandement améliorer les résultats.

### **Résumé**

La régénération de la santé de nos sols repose entre les mains de nos agriculteurs et éleveurs. La recherche, la vulgarisation et les incitatifs aux producteurs amélioreront les résultats dans tout le spectre de la gestion pour aider les producteurs à renforcer la santé des sols et la résilience à long terme.

L'agriculture biologique est à la fois un système établi dans lequel investir pour améliorer la santé des sols et un système modèle qui profite à toute l'agriculture. Avec la recherche, à la vulgarisation et aux incitations, l'augmentation et l'amélioration de la production biologique peuvent contribuer à améliorer la santé des sols tout en produisant des aliments nutritifs sans utiliser de pesticides ni d'engrais synthétiques, avec des coûts d'intrants réduits et une moindre dépendance aux intrants fossiles, et des avantages pour la biodiversité et le climat.

## **Annexe 1 : Gestion avancée du carbone organique et de l'azote organique pour améliorer les résultats agroenvironnementaux dans le prochain cadre stratégique pour l'agriculture du Canada<sup>1</sup>**

### **Gestion avancée du carbone organique (C)**

1. **Les niveaux de carbone organique du sol (COS) continuent de diminuer, en particulier dans les systèmes de culture de l'Est du Canada** (Clearwater et coll., 2016 ; Nyiraneza et al., 2017), entraînant une détérioration de la santé des sols et une dégradation et une perte de sols, en raison de l'intensification des cultures (rotations moins diversifiées incluant souvent des cultures à faible résidus).
2. **Les gains en COS doivent être basés sur l'ajout de résidus et l'apport de carbone dans le sol.** Le semis direct n'inverse pas le déclin du COS dans les régions humides (Angers et al., 2017) et le travail minimal du sol augmente les émissions de N<sub>2</sub>O sur les sols à texture plus fine lorsque les précipitations de la saison de croissance dépassent 600 mm (Pelster et al., 2024).
3. **Il ne s'agit pas seulement de l'utilisation des cultures de couverture, mais aussi de la bonne gestion des cultures de couverture.** Les programmes fédéraux actuels (Fonds d'action à la ferme pour le climat, Laboratoires vivants) et provinciaux augmentent les essais à la ferme et l'exploration de l'utilisation des cultures de couverture. Les cultures de couverture ont le potentiel de fournir trois services de solutions climatiques naturelles ; augmentation du COS, remplacement des engrais azotés et réduction des émissions de N<sub>2</sub>O et du lessivage de l'azote (Drever et coll., 2021). Cependant, l'adoption et l'utilisation actuelles des cultures de couverture pourraient ne pas augmenter considérablement les niveaux de COS, car :
  - Les gains de COS des cultures de couverture seules varient considérablement selon leur type et leur utilisation (pleine saison, culture intercalaire, culture de relais, etc.) et la région. Dans la région des Prairies, les taux moyens de biomasse des cultures de couverture varient de 0,5 à 0,6 Mg C<sup>ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup></sup> (Thiessen-Martens et al., 2015), mais ils sont inférieurs dans les régions des Prairies plus sèches, comparativement à 2 Mg C<sup>ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup></sup> (~4 Mg de biomasse) dans les régions de culture plus humides, les semis plus précoces et les fins tardives atteignant les fourchettes supérieures (Blanco-Canqui, H. 2022). Comme seule une fraction de l'apport en carbone dans le sol des cultures de couverture contribue au gain de COS (Gregorich et al., 2017), les taux de gain de COS, le cas échéant, des cultures de couverture sont suggérés à 0,27-0,39 t C<sup>ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup></sup> ou moins selon la production de biomasse de la culture de couverture (Poeplau et al., 2024).
  - Éviter d'obtenir des taux de biomasse de cultures de couverture plus élevés en raison (i) du risque perçu de problèmes d'immobilisation de l'azote pour la culture commerciale suivante (R. Barrett, comm. pers.), (ii) de la preuve d'un lien entre la biomasse des cultures de couverture et les émissions de N<sub>2</sub>O dans les régions humides, ce qui a mené à des recommandations d'utiliser les cultures de couverture principalement comme cultures dérobées à faible biomasse afin d'utiliser l'excès d'azote minéral résiduel du sol (RSMN) (M. Tenuta, comm. pers. ; Thapa et al., 2018). Cependant, il est peu probable que les cultures de couverture à faible biomasse (<2 Mg<sup>ha<sup>-1</sup></sup>) contribuent aux gains de COS (Blanco-Canqui, 2022).
  - Certaines études suggèrent que l'augmentation des niveaux de COS pourrait ne pas être garantie par des rotations plus diversifiées qui incluent des cultures de couverture, à moins

<sup>1</sup> Par Derek Lynch - Professeur, Chaire de recherche du Canada, Agriculture biologique, 2005-2015

qu'une période dans les cultures fourragères vivaces ne soit incluse (Arcand et Congreves, 2018 ; Sprunger et al., 2020).

4. **Le sol est la ressource non renouvelable fondamentale et essentielle qui doit être maintenue, et le COS est au cœur de tous les aspects de la santé des sols.** Bien que la gestion avancée de l'azote (4R) ait un rôle clé à jouer dans la réduction des gaz à effet de serre (GES) dans les systèmes de culture, il est nécessaire de mettre l'accent sur la gestion avancée du carbone pour maintenir le COS, la santé des sols et la résilience climatique, c'est-à-dire une programmation visant à améliorer les tests et l'adoption, optimisée par région, à savoir :

**Diversification de la rotation** (y compris les cultures de couverture)

**Gestion des résidus** (les exportations de résidus (paille, foin, etc.) peuvent annuler les gains de la diversification)

**Taux d'intensité du travail du sol** (basé sur la fréquence et le niveau de perturbation/mesures STIR)

**Retour** du fumier (ou des composts)

Ces [4R pour la gestion avancée du carbone](#) sont des piliers clés de l'agriculture régénératrice, et ces pratiques sont couramment utilisées dans les systèmes de culture biologique dans des combinaisons variables en fonction de l'intensité de la gestion (Lynch et al., 2022).

## Gestion avancée de l'azote organique (N)

1. **Améliorations observées grâce aux pratiques de culture biologique.** L'utilisation fréquente de cultures de couverture, telle qu'elle est pratiquée dans les systèmes de culture biologique, renforce encore les gains de rendement significatifs liés à l'utilisation de cultures de couverture, des gains de rendement de l'ordre de 13 à 22 % pour le maïs et le blé dans la méta-analyse de Bourgeois et al. (2022). Les mélanges de cultures de couverture qui comprennent des légumineuses peuvent offrir des gains de rendement et augmenter les teneurs en N et C du sol (Lavergne et coll., 2020).
2. **Au-delà de la gestion du fumier.** Les programmes et les recommandations actuels concernant l'amélioration de la reconnaissance des sources d'azote organique sont principalement axés sur la gestion du fumier, avec peu ou pas d'accent sur le remplacement de l'utilisation d'engrais azotés par l'utilisation ciblée de légumineuses vivaces ou de cultures de couverture en rotation.
3. **Les crédits d'azote suggérés par les provinces pour les cultures de couverture de légumineuses précédentes varient considérablement et doivent être améliorés pour améliorer le remplacement et l'adoption de l'azote par engrais.** En dehors des systèmes d'agriculture biologique, l'inexpérience des agriculteurs et les risques agronomiques perçus limitent le potentiel d'expansion des essais et de l'utilisation de légumineuses de couverture courantes et nouvelles comme source prédominante d'approvisionnement en azote pour la culture commerciale suivante. Il a été démontré dans l'est du Canada que la capacité biologique de fixation de l'azote (BNF) et l'approvisionnement en azote du sol de certaines nouvelles légumineuses remplacent en grande partie les besoins en engrais azotés pour le maïs (Yang et coll., 2024), le blé (Alam et coll., 2018) et les pommes de terre (Lynch et coll., 2012).

Comme pour l'azote des engrais, l'azote des légumineuses peut également entraîner des émissions de N<sub>2</sub>O (Rochette et coll., 2008), mais cela est compensé par les avantages connexes des cultures de couverture pour la santé et la résilience du sol, la biodiversité et le potentiel de gain de COS (Lynch, D. H. 2022).

Les estimations des taux d'émissions relatifs de N<sub>2</sub>O provenant des cultures de couverture sont également en cours de révision (Liang et coll., 2020). D'Amours et coll. (2023) au Québec ont constaté qu'un labour à l'eau de l'engrais vert minimisait les émissions de N<sub>2</sub>O par hectare sans augmenter les émissions de N<sub>2</sub>O à l'échelle du rendement des cultures (orge, maïs, soja).

4. **Les bilans d'azote dans les systèmes biologiques sont généralement faibles par rapport aux systèmes non biologiques.** L'intensité de l'utilisation d'engrais azotés a continué d'augmenter dans tous les systèmes de culture au Canada, ce qui a entraîné une augmentation des bilans d'azote à l'échelle des champs (entrées-sorties d'azote). Les taux d'émission de N<sub>2</sub>O sont considérés comme non linéaires par rapport aux apports d'azote et ont augmenté en conséquence.

Les systèmes d'agriculture biologique, même au sein de secteurs spécifiques, varient en termes de gestion et d'intensité nutritionnelle (Roberts et al., 2008), mais sont **généralement beaucoup moins intensifs** en ce qui concerne les flux d'azote que les systèmes de culture conventionnels. Par conséquent, les bilans d'azote à l'échelle du champ et les concentrations résiduelles d'azote minéral dans le sol après la récolte sont généralement faibles dans les systèmes de culture biologique, ce qui réduit le **risque de pertes d'azote par lessivage et de pertes directes ou indirectes de N<sub>2</sub>O** (Lynch et al., 2012).

5. **Une phase de rotation des légumineuses ou des légumineuses en mélange, des plantes vivaces ou des cultures de couverture agit comme un « tampon N » qui permet l'application de divers amendements du sol riches en carbone** (composts, etc.). La capacité BNF des légumineuses évite une perte de productivité de la biomasse due à l'immobilisation de l'azote après l'application de l'amendement (Lynch et al., 2004).

## Résumé

Les avantages en matière de GES des pratiques avancées de gestion du carbone organique et de l'azote organique, utilisées seules ou en combinaison, restent sous-étudiés et ne sont actuellement pas couverts dans le Rapport d'inventaire national (RIN). **Il faut s'attaquer au risque croissant de gérer l'azote dans les systèmes conventionnels au détriment de la baisse du carbone.** Les systèmes biologiques sont des systèmes de production idéaux pour la mise à l'essai et le perfectionnement de la gestion avancée du carbone organique et de l'azote afin d'améliorer les résultats agroenvironnementaux pour le Canada.

## Annexe 2 : Revue de la littérature sur la santé des sols dans les systèmes biologiques au Canada – Rapport du Groupe de travail sur l'agriculture biologique<sup>2</sup>

### Contexte

Des sols sains sont le fondement des systèmes productifs. En agriculture, la santé des sols est définie comme la capacité du sol à produire des aliments de haute qualité avec un minimum d'intrants. La santé des sols est le résultat de multiples interactions entre les fonctions physiques, chimiques et biologiques du sol (Bünemann et al., 2018). Par conséquent, les indicateurs de santé des sols doivent refléter les fonctions du sol. Par exemple, comme le carbone organique du sol (COS) est l'élément clé qui influence de multiples fonctions du sol, les fractions de COS et de COS labiles [particules (POM-C), oxydables au

---

<sup>2</sup> Par Stéphanie Lavergne, candidate au doctorat, Université Dalhousie, Faculté d'agriculture

permanganate (POXc), C minéralisable] sont des composantes et des mesures essentielles de la santé des sols (Hurisso et coll., 2016 ; Norris et coll., 2020). Par conséquent, par rapport à d'autres propriétés du sol, d'autres études sur le COS et les fractions de COS sont incluses dans cette revue de la santé du sol.

La santé du sol est importante pour les producteurs biologiques. Cranfield et coll. (2010) ont constaté que les préoccupations relatives à la santé et à l'environnement étaient une motivation plus importante que les considérations économiques pour la conversion à la production biologique au Canada. Des entrevues avec 34 producteurs du Canada atlantique ont révélé que les producteurs biologiques avaient une définition plus holistique de la santé des sols que les producteurs conventionnels (Mann et coll., 2021). Ils avaient également tendance à être plus ouverts à des évaluations plus complètes de la santé des sols qui incluent les propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol, comme l'évaluation de la santé des sols de Cornell (CSHA). Dans une étude menée dans trois fermes biologiques du sud-ouest de l'Ontario, Hargreaves et coll. (2019) ont constaté que les perceptions des producteurs biologiques à l'égard de la productivité et de la santé du sol étaient associées aux propriétés physiques, biologiques et chimiques du sol.

Cette revue s'appuie sur des revues et des méta-analyses pour comparer l'agriculture biologique et conventionnelle dans un contexte canadien. Il est organisé comme suit :

- Comparaisons de la santé des sols dans les systèmes de culture biologique et conventionnel.
- Comparaisons de la santé des sols dans les systèmes horticoles biologiques et conventionnels.
- Meilleures pratiques de gestion pour améliorer la santé des sols.

## 1. Grandes cultures

Aucune méta-analyse spécifique à la santé des sols dans les grandes cultures biologiques n'a été trouvée. Cependant, de nombreuses méta-analyses ont comparé la teneur en COS et la concentration. Ces méta-analyses montrent que **les fermes biologiques ont des concentrations de carbone organique du sol (COS) et des stocks de carbone dans le sol plus élevés que les fermes conventionnelles** (Mondelaers et coll., 2009 ; Gomiero et al., 2011 ; Gattinger et coll., 2012 ; Tuomisto et al., 2012 ; García-Palacios et al., 2018). Cependant, dans une méta-analyse récente, Alvarez et Cayuela (2022) ont examiné 83 comparaisons directes de systèmes biologiques et conventionnels. Ils ont constaté que les systèmes biologiques augmentaient le SOC par rapport aux systèmes conventionnels, mais principalement en raison de sources externes de C (fumier provenant de la production animale ou de la rétention de résidus). García-Palacios et al. (2018) ont constaté que les systèmes biologiques avaient des taux de respiration du sol, de stocks de COS et de séquestration du COS plus élevés que les systèmes conventionnels. Leur principale explication était la source de fertilisation dans les systèmes organiques, une source externe d'apports de carbone. Ils émettent également l'hypothèse que les caractéristiques des cultures (p. ex., l'azote des feuilles et les racines fines C et N) jouent un rôle important dans les effets des systèmes biologiques sur les stocks de COS et les taux de séquestration.

Des expériences de recherche à long terme sur les agroécosystèmes dans le monde entier ont comparé les systèmes de grandes cultures biologiques aux systèmes conventionnels. La plupart de ces études ont recueilli des données sur la santé des sols pendant de nombreuses années. Dans la majorité de ces études, les systèmes biologiques ont généralement une teneur ou une concentration en COS plus élevée que les systèmes

conventionnels lorsqu'une source externe de carbone est utilisée (Teasdale et coll., 2007 ; Delate et coll., 2013 ; Omondi et al., 2022 ; Mayer et al., 2022). Cela se reflète dans d'autres indicateurs de santé des sols tels que SOM, POM-C, MBC (biomasse microbienne de carbone), POXc (Spargo et al., 2011 ; Wortman et

coll., 2011 ; Delate et coll., 2013 ; Braman et coll., 2016 ; Krauss et al., 2022 ; Mayer et al. 2022 ; Lori et al., 2023 ; Rodale Institute, 2021). Cependant, dans les systèmes déficients en P et en N, les systèmes organiques ne surpassent pas les systèmes conventionnels (Malhi et coll., 2009 ; Bell et coll., 2012). De plus, la santé du sol dans les systèmes biologiques avait tendance à être similaire à celle des systèmes conventionnels lorsque les systèmes biologiques sont comparés aux systèmes conventionnels utilisant des pratiques de gestion exemplaires telles que le semis direct, les cultures de couverture ou les amendements au fumier (Green et al., 2005 ; Spargo et al., 2011).

Les sols gérés biologiquement avaient tendance à avoir une plus grande stabilité des agrégats (Lotter et al., 2003 ; Green et al., 2005 ; Gomiro et al., 2011 ; Stainsby et al., 2022). Il a également été rapporté que la densité apparente était plus faible dans les sols gérés biologiquement que dans les sols conventionnels après 40 ans aux États-Unis (Rodale Institute, 2021). Les sols gérés biologiquement avaient également tendance à avoir une disponibilité plus élevée du pH, du K, du P et de l'azote (Birkhofer et al., 2008 ; Wortman et coll., 2011 ; Delate et al., 2013), bien que dans certains cas, un appauvrissement en phosphore ait été observé dans des sols gérés biologiquement (Malhi et al., 2009 ; Welsh et al., 2009 ; Fraser et coll., 2019).

## 2. Horticulture

### 2.1 Fruits et légumes

La littérature sur la santé des sols dans les cultures horticoles biologiques est particulièrement rare au Canada. Une étude à long terme menée en Italie (Campanilli et Capi, 2012) a révélé que sur une période de neuf ans, la teneur en COS et en TN du système de gestion biologique a augmenté au fil du temps après la période de conversion, tandis que la teneur en COS et en TN des sols gérés de manière conventionnelle a eu tendance à rester inchangée. En Californie, aux États-Unis, Reganold et al. (2010) ont mesuré la santé du sol dans 13 champs de fraises biologiques et conventionnels appariés. Ils ont rapporté que les sols organiques avaient plus de SOC, TN, MBC et C minéralisable que les sols conventionnels. Dans une enquête à la ferme menée au Québec, les résultats préliminaires suggèrent que les fermes commerciales biologiques avaient une teneur en MOS de la couche arable plus élevée et une densité apparente du sol plus faible que les fermes conventionnelles (Bélanger et al., 2024). Dans une étude menée dans des fermes commerciales mixtes du sud-ouest de la Colombie-Britannique, Norgaard et al. (2022) n'ont trouvé aucune différence entre les stratégies de gestion en matière de POXc et de N-NO<sub>3</sub> dans le sol. Le phosphore résiduel était huit fois plus élevé avec un compost élevé qu'avec un compost faible. Dans leur étude, 80 % des fermes étaient biologiques. Dans une étude menée sur trente fermes maraîchères mixtes biologiques au Michigan, aux États-Unis, Kaufman et al. (2020) ont signalé que les PGB telles que la profondeur de travail du sol, l'utilisation de cultures de couverture et les types d'amendements du sol pourraient augmenter les niveaux de MOS dans les fermes biologiques. En examinant différentes

stratégies de gestion dans les systèmes de légumes biologiques aux États-Unis, Prichett et al. (2011) ont signalé que les amendements biologiques avaient le plus grand effet à court terme sur le COS et la densité apparente par rapport au travail réduit du sol et aux cultures de couverture.

Dans l'Est du Canada, deux évaluations de la santé des sols ont été réalisées dans des exploitations commerciales de pommes de terre. Les rotations de pommes de terre dans l'Est du Canada comprennent généralement des céréales et sont donc discutées séparément des autres études sur les légumes. Au Nouveau-Brunswick, Nesbit et al. (2014) ont constaté que l'abondance moyenne des nématodes, des sous-ordres d'acariens et des familles de collemboles ne différait pas significativement entre les champs biologiques et conventionnels. Cependant, dans la même étude, les champs gérés biologiquement

présentaient un MBC, un pH, une humidité du sol, une fraction légère de la litière, un rapport C : N et une densité apparente inférieurs à ceux des champs conventionnels. Boiteau et al. (2014) ont également évalué la santé des sols dans quatre systèmes du Nouveau-Brunswick. Ils ont constaté que les systèmes de production conventionnels présentaient les niveaux les plus faibles de paramètres biologiques (c'est-à-dire l'abondance des vers de terre, la biomasse, la respiration du sol, l'abondance des Acari et des collemboles) par rapport aux champs de pommes de terre biologiques, aux champs de pommes de terre abandonnés et aux pâturages. Ils ont également signalé que les systèmes conventionnels avaient la teneur en phosphore et la saturation en phosphore les plus élevées, tandis que les systèmes organiques avaient la teneur en TN et en calcium du sol la plus élevée. À l'Île-du-Prince-Édouard et au Nouveau-Brunswick, Nelson et al. (2009) ont évalué la santé du sol dans le cadre de rotations intensives de pommes de terre (c.-à-d. phases de pommes de terre suivies de 4 ans de fourrage) et ont constaté un rétablissement de l'abondance et de la biomasse des vers de terre deux ans après la phase de la pomme de terre, tandis que d'autres paramètres de santé du sol sont restés inchangés.

## 2.2 Vignobles

Les études viticoles comparant la gestion biologique à la gestion conventionnelle ont été principalement menées en Europe. Dans une étude à long terme sur la gestion biologique, biodynamique et intégrée des vignobles en Italie, Simona et al. (2024) ont constaté que le niveau de durabilité des vignobles biologiques était supérieur à celui des vignobles intégrés. Cependant, en ce qui concerne spécifiquement la santé des sols, la richesse et la diversité des espèces bactériennes et le stockage du COS dans la production de gestion intégrée étaient similaires à ceux des systèmes de production biologique. Ces résultats sont similaires à ceux rapportés par Meissner et al. (2019) et Gutiérrez-Gamboa et al. (2019) dans des études menées dans des fermes expérimentales. Les deux ont signalé des paramètres de santé du sol similaires dans les vignobles biologiques par rapport aux vignobles intégrés. D'autres études menées sur des vignobles commerciaux ont rapporté une santé du sol similaire entre les vignobles conventionnels et biologiques (Vavoulidou et al., 2006 ; Wheeler et Crips, 2011 ; Van Geel et coll., 2017 ; Unc et al., 2021). Néanmoins, d'autres études menées dans des vignobles commerciaux ont rapporté une meilleure santé du sol dans les vignobles gérés biologiquement par rapport aux vignobles conventionnels (Coll et al., 2014 ; Brunori et al.,

2016 ; Orkur et coll., 2016 ; Amaral et al., 2022). Fait intéressant, Coll et al. (2014) ont rapporté que la plupart des paramètres de santé du sol (p. ex., COS, P et K disponibles et biomasse microbienne) étaient plus élevés que dans les vignobles conventionnels après 11 ans de gestion biologique, mais pas après seulement 7 ans.

Cependant, les vignobles biologiques semblent nuire aux vers de terre dans certains cas (Coll et al., 2014 ; Beaumelle et al., 2023). L'utilisation du cuivre dans les vergers biologiques peut expliquer la baisse de l'abondance des vers de terre (Steinmetz et al., 2017).

Les études à la ferme supposent que les vignobles conventionnels et biologiques ont des caractéristiques de sol identiques au moment de la conversion, ce qui limite les conclusions qui peuvent être tirées des études à la ferme et souligne l'importance des études à long terme pour évaluer la santé du sol (Probst et al., 2008).

## 2.3 Vergers

La plupart des données disponibles sur la santé des sols pour les vergers proviennent de comparaisons avec des exploitations commerciales. **Ces études à la ferme suggèrent que les vergers biologiques soutiennent les paramètres de santé du sol par rapport aux vergers conventionnels.**

Une étude sur les vergers de fruits mixtes à Chypre a révélé que les sols des vergers biologiques avaient un diamètre de poids moyen et une respiration plus élevés que les vergers de fruits mixtes conventionnels (Ioannidou et al., 2022).

En Espagne, Herencia et al. (2019) ont signalé une augmentation de la SOM, de la TN, du P, du Mg disponible, de l'abondance des vers de terre et des microorganismes dans les vergers de pruniers biologiques que dans les vergers de pruniers conventionnels.

Cependant, une autre étude menée dans des vergers commerciaux en Belgique a montré que le SOC, le SOM, le TN et la densité apparente ne différaient pas entre les vergers intégrés et biologiques (Dealemans et al., 2022). Des résultats similaires ont été rapportés par Orpet et al. (2020), car les paramètres de santé du sol ne différaient pas entre les vergers de pommiers de transition, biologiques et conventionnels aux États-Unis.

Dans une étude menée dans une ferme expérimentale de l'État de Washington, Glover et al. (2000) ont signalé que le verger de pommiers intégré avait un score de santé du sol plus élevé que le verger conventionnel. Le système de production biologique n'a pas donné lieu à un score de santé du sol significativement différent de celui des deux autres systèmes de gestion. Dans cette étude, les vergers intégrés et biologiques avaient une densité apparente plus faible et un CSM plus élevé que le verger de pommiers conventionnel.

### **3. Meilleures pratiques de gestion pour améliorer la santé des sols**

Dans une revue systématique, Tully et McAskill (2020) ont rapporté 17 études où la réduction du travail du sol dans les systèmes biologiques a entraîné une augmentation du COS de la couche arable et de la biomasse microbienne par rapport au travail du sol conventionnel. Dans la plupart de ces études, la réduction du travail du sol était également associée à une plus grande stratification du sol par rapport au travail du sol conventionnel. Ils ont également signalé une augmentation de la stabilité des agrégats du sol dans quatre études, une augmentation de la teneur en eau dans une étude et une réduction de l'érosion du sol dans trois études. Cependant, la plupart des comparaisons ne tiennent pas compte de la variabilité de l'intensité et de la fréquence du travail du sol (Tully et McAskill, 2020).

Dans une enquête à la ferme dans le système de maïs biologique du Midwest, Sprunger et al. (2021) ont signalé que l'intensité du travail du sol était associée à une plus grande diversité des cultures et à une diminution de la santé du sol.

Des recherches sur le semis direct biologique ont été menées au Canada. Dans un examen des projets de recherche sans labour menés dans l'Est du Canada, Halde et al. (2017) ont signalé que le fait que la santé des sols n'ait pas été mesurée constituait une lacune dans la recherche.

Dans une étude menée en Nouvelle-Écosse comparant différentes stratégies d'élimination des engrais verts, Marshall et Lynch (2018) ont constaté que trois ans après l'élimination des engrais verts, le COS de la couche arable était plus élevé dans l'engrais vert non labouré que dans l'engrais vert labouré. Dans la même expérience, ils ont également trouvé une abondance de vers de terre plus faible dans le traitement du labour par rapport au semis direct ; cependant, la population de vers de terre s'est rétablie trois ans après le labour (Marshall et Lynch, 2018).

Dans l'Ouest canadien, Halde et al. (2014) ont étudié l'adaptation des pratiques de semis direct pour inclure le paillis de culture de couverture. Ils ont trouvé un rendement similaire dans le système biologique sans labour que dans le système biologique (Halde et al., 2014).

Halde et al. (2015) ont comparé différents types de paillis de culture de couverture et ont signalé que le paillis de vesce velue était la meilleure option pour l'approvisionnement en azote et le contrôle des mauvaises herbes. Le carbone organique, le P et le pH du sol n'ont pas varié d'un traitement à l'autre. Aucun autre paramètre de santé du sol n'a été mesuré dans ces systèmes.

**Les futurs essais biologiques sans labour au Canada devraient être menés sur une plus longue période et inclure des mesures de la santé des sols.**

Dans une méta-analyse de différentes PGO dans les systèmes biologiques, Crystal-Ornelas et al. (2021) ont constaté que les cultures de couverture augmentaient le COS de 10 % par rapport aux cultures sans couverture. Ils ont également constaté une tendance temporelle où les effets des cultures de couverture étaient significatifs 5 ans après l'adoption.

**L'incorporation de cultures de couverture dans la rotation peut être plus bénéfique lorsqu'elle est combinée à des amendements organiques.** Des études ont montré que la combinaison de l'utilisation de cultures de couverture et de l'épandage de fumier animal peut améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'azote (Torstensson et al., 2006), la disponibilité de l'azote dans le sol (Chirinda et al., 2010 ; Kauer et coll., 2015 ; Spargo et al., 2016) et la respiration du sol (Chirinda et al., 2010). La combinaison de l'utilisation de cultures de couverture et d'amendements organiques peut réduire les taux d'épandage de fumier animal et améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'azote.

**Les avantages des cultures de couverture sur les rendements des cultures commerciales ont été démontrés dans l'est du Canada.** Lavergne et al. (2021) ont constaté que les cultures de couverture semées après la récolte des céréales augmentaient les nitrates du sol au printemps suivant, contribuant ainsi au rendement du maïs. Des résultats similaires ont été rapportés pour le blé biologique (Alam et al., 2018) et les pommes de terre biologiques (Alam et al., 2016). L'utilisation de cultures de couverture dans les systèmes biologiques n'entraîne pas toujours une meilleure santé du sol (McNeil et al., 2023) ou des rendements plus élevés des cultures commerciales (Evans et al., 2016), ce qui laisse place à l'optimisation des cultures de couverture en fonction de la région et du système (Thiessen Martens, 2019).

**L'ajout de fourrages aux rotations de cultures biologiques peut améliorer la santé du sol** (Sprunger et al., 2021). Une méta-analyse a montré que les fermes biologiques ont tendance à avoir des rotations de cultures plus longues, ce qui entraîne une plus grande diversité que les fermes conventionnelles (Barbieri et al., 2017). L'inclusion de la luzerne dans les rotations de céréales biologiques augmente le COS (Wander et coll., 2007 ; Welsh et al., 2009) et l'activité biologique du sol (Wander et al., 2007 ; Braman et al., 2016). Au cours d'une rotation de 5 ans, Wachter et al. (2019) ont constaté que le COS demeurait inchangé après deux rotations biologiques avec la luzerne, mais diminuait dans le cadre de la gestion conventionnelle. Il y a quelques exceptions (Bell et coll., 2012 ; Wortman et coll., 2011 ; Blanco-Canqui et coll., 2017 ; Spargo et al., 2011). L'inclusion de la luzerne dans les rotations de grains peut également augmenter l'azote du sol (Welsh et al., 2009 ; Spargo et al., 2011). L'intégration du bétail dans les systèmes de culture biologique pourrait améliorer la santé des sols et le statut SOC.

**L'élevage intégré est une excellente opportunité pour le pâturage des résidus de culture** (Rakkar et Blanco-Canqui, 2018). Le bétail peut être intégré de différentes manières dans les systèmes de culture (par exemple, les agneaux et les chèvres dans les vignobles et les vergers, les bovins dans les fermes de cultures mixtes ou les poulets dans les fermes maraîchères). Des études à long terme et des comparaisons systématiques mondiales de la santé des sols dans les systèmes de grandes cultures biologiques et conventionnelles suggèrent que les systèmes biologiques sans stock efficaces dépendent de sources externes de fumier (p. ex., Omondi et coll., 2022 ; Mayer et al., 2022). Smith et al. (2000) ont étudié l'effet de l'épandage de fumier organique dans les systèmes de pâturages annuels et pérennes et

ont signalé que l'épandage de fumier améliorerait le COS dans les champs de cultures annuelles par rapport aux pâturages pérennes.

**L'utilisation de cultures pérennes dans la rotation pourrait améliorer la santé du sol et les niveaux de COS** (Spargo et al., 2011 ; Delate et coll., 2013). Cependant, des études ont suggéré que la récolte ou l'élimination des résidus de culture peut limiter la capacité des cultures pérennes à augmenter le COS (Bell et al., 2012). Aux États-Unis, Rui et al. (2022) ont signalé que les pâturages pérennes gérés avec un pâturage en rotation étaient le seul traitement qui favorisait l'accumulation de MAOM-C et de COS par rapport aux systèmes céréaliers annuels.

**La littérature traitant directement des effets de la gestion biologique sur les pâturages est rare.** Schulz et al. (2014) ont observé un effet négatif de la production de cultures biologiques sans labour sur les niveaux de MOS après 11 ans, par rapport aux cultures mixtes. Ils ont également conclu que les légumineuses vivaces devraient être incluses dans les rotations de cultures biologiques pour maintenir la SOM.

Dans le nord de l'Angleterre, Zani et al. (2021) ont étudié les effets des systèmes agricoles biologiques et non biologiques (conventionnels) sur les indicateurs de qualité du sol dans une ferme commerciale mixte et ont constaté que lorsque le pâturage était inclus, les systèmes conventionnels et biologiques bénéficiaient d'une amélioration significative de la qualité du sol. La longueur des prairies dans la rotation était positivement liée au QS, quel que soit le type de système agricole, et une longueur de prairie entre les graminées et les trèfles équivalant à 30 à 40 % de la rotation complète des cultures est nécessaire pour augmenter linéairement la concentration de C dans le sol.

Dans un contexte horticole, Bilenky et al. (2024) ont constaté que l'intégration des poulets a le potentiel d'améliorer les indicateurs de santé des sols tels que la biomasse microbienne sans affecter la productivité des légumes biologiques.

**Réduire la contamination par les agents pathogènes lors de l'utilisation de fumier brut :** L'utilisation de fumier brut dans la production alimentaire peut présenter un risque de contamination par E. coli et Salmonella. Bilenky et al. (2024) n'ont trouvé aucun agent pathogène sur la culture d'épinards lorsque la surface des feuilles a été exposée, même si les agents pathogènes étaient présents dans le champ après l'intégration des poulets.

La dynamique de la réglementation des maladies dans l'industrie canadienne de la production bovine est également préoccupante au Canada (Pogue et coll., 2018). Au Canada, le fumier brut doit être incorporé au sol au moins 120 jours avant la récolte si la partie comestible de la culture est en contact avec le sol, ou au moins 90 jours avant la récolte pour toutes les autres cultures vivrières. **Le pâturage des résidus de culture pourrait réduire le risque de maladies dues à des agents pathogènes tout en améliorant la santé des sols.** Dans une revue, Rakkar et Blanco-Canqui (2018) ont signalé que le pâturage des résidus a moins d'impact négatif sur l'érosion éolienne et hydrique que la mise en balles des résidus et moins d'impact négatif sur les propriétés du sol que le pâturage dans les prairies.

## Conclusion

Bien qu'il existe une importante documentation sur les effets de l'agriculture biologique sur le COS, peu d'études mondiales ont examiné les effets de l'agriculture biologique sur d'autres paramètres chimiques, physiques et biologiques de la santé des sols. Les recherches menées dans le contexte canadien, en particulier pour les cultures horticoles, font également défaut en ce qui concerne la santé des sols.

Par rapport à la production conventionnelle, la plupart des études suggèrent que la gestion biologique peut maintenir la santé du sol et le COS. Cela est particulièrement vrai lorsque les meilleures pratiques de gestion sont utilisées et combinées dans les systèmes biologiques. Ces pratiques comprennent la réduction de l'intensité et de la fréquence du travail du sol, les cultures de couverture, les fourrages et l'intégration du bétail dans le système.

Les pratiques agricoles dans les systèmes biologiques varient considérablement en intensité (Lynch, 2022). Par conséquent, d'autres recherches sont nécessaires pour évaluer correctement les impacts de la gestion biologique avec une variété de pratiques dans le système agricole diversifié du Canada.

## Annexe 1 Références :

- Alam, M.Z., Lynch, D.H., Tremblay, G., Gillis-Madden R., and Vanasse, A. 2018. Optimizing combining green manures and pelletized manure for organic spring wheat production. *Can J. Soil Sci.* 98: 638-649.
- Angers, D., Bolinder, M.A., Carter, M.R., Gregorich, E.G., Drury, C.F., Liang, B.C. et al. (2017). Impact of tillage practices on organic carbon and nitrogen storage in cool, humid soils of eastern Canada. *Soil and Tillage Research* 41:191-201
- Arcand, M and Congreves, K.A. (2018). Alternative management improves soil health indices in intensive vegetable cropping systems: A review. *Frontiers in Environmental Science* 6: 1-18.
- Blanco-Canqui, H. (2022). Cover crops and carbon sequestration: Lessons from U.S. studies. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 86: 501-519.
- Bourgeois, B., Charles, A., Van Eerd, L.L., Tremblay, N., Lynch, D.H., Bourgeois, G., Bastien, M., Bélanger, V., Landry, C., and Vanasse, A. 2022. Interactive effects between cover crop management and the environment modulate benefits to cash crop yields: a meta-analysis. *Can. J. Plant Sci.* 102:656-678.
- Clearwater, R.L., Martin, T., and Hoppe, T. 2016. Environmental sustainability of Canadian agriculture: Agri-environmental indicator report series – Report #4., Ottawa, Ont.
- D'Amours et al., 2023. Combining reduced tillage and green manures minimized N<sub>2</sub>O emissions from organic cropping systems in a cool humid climate. *Agric. Ecosys. Env.* 341:108205.
- Drever et al. 2021. Natural climate solutions for Canada. *Science Advances*. Vol 7
- Gregorich, E., et al. 2017. Litter decay controlled by temperature, not soil properties, affecting future soil carbon. *Global Change Biology* 23:1725-1734.
- Lavergne, S., et al. 2020. Using fall-seeded cover crop mixtures to enhance agroecosystem services: A review. *Agrosyst Geosci Environ.* 2021;e20161.
- Liang, C., MacDonald, D., Thiagarajan, A., Flemming, C., Cerkowniak, D., and Desjardins, R.. 2020. Developing a country specific method for estimating nitrous oxide emissions from agricultural soils in Canada. *Nutr. Cycling. Agoroecosyst.* 117: 145-167.
- Lynch, D. H. 2022. Soil health and biodiversity is driven by intensity of organic farming in Canada. *Frontiers in Sustainable Food Systems.* 6: 826486
- Lynch, D.H., Sharifi, M., Hammermeister, A., and Burton, D. 2012. Nitrogen management in organic potato production. *Sustainable potato production: Global case studies*, 209-231
- Lynch, D.H., Voroney, R.P., and Warman, P.R. 2004. [Nitrogen availability from composts for humid region perennial grass and legume-grass forage production](#). *J. Env. Qual.* 33:1509-1520
- Nyiraneza, J., Thompson, B., Geng, X., He, J., Jiang, Y., Fillmore, S., and Stiles, K. 2017. Changes in soil organic matter over 18 yr in Prince Edward Island, Canada. *Can. J. Soil Sci.* 97:745-756.

- Pelster et al. 2024. Tillage effects on growing season nitrous oxide emissions in Canadian cropland soils. *Can. J. Soil Sci.* 104: 1–10.
- Poeplau, C., et al. 2024. Cover crops do increase soil organic carbon stocks—A critical comment on Chaplot and Smith (2023). *Glob Change Biol.* 2024;30:e17128.
- Roberts, C. J., Lynch, D.H., Voroney, R.P., Martin, R. C. and Juurlink, S. D. (2008). Nutrient budgets of Ontario organic dairy farms. *Can. J. Soil Sci.* 88:107-114.
- Rochette, P., et al. 2008. Estimation of N<sub>2</sub>O emissions from agricultural soils in Canada. I. Development of a country specific methodology. *Can. J. Soil Sci.* 88:641-654.
- Sprunger, C.D. Martin, T., and Mann, M. (2020). Systems with greater perenniality and crop diversity enhance soil biological health. *Agricultural and Environmental Letters.* 5:e20030
- Thapa et al. 2018. Cover crops reduce nitrate leaching in agroecosystems: A global meta-analysis. *J. Env. Qual.* 47:1400-1411.
- Thiessen-Martens, J.R. et al. 2015. Review: Redesigning Canadian prairie cropping systems for profitability, sustainability and resilience. *Can. J. Pl. Sci.* 95:1049-1072.
- Yang, X., et al. 2024. Legume cover crop as a primary nitrogen source in an organic crop rotation in Ontario, Canada: impacts on corn, soybean and winter wheat yields. *Org. Agr.* 14:19–31

## Annexe 2 Références :

- Amaral, H. F., Schwan-Estrada, K. R. F., Sena, J. O. A. de, Colozzi-Filho, A., Andrade, D. S. (2022). Seasonal variations in soil chemical and microbial indicators under conventional and organic vineyards. *Acta Scientiarum.*, 45. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v45i1.56158>
- Alam, M. Z., Lynch, D. H., Sharifi, M., Burton, D. L., Hammermeister, A. (2016). The effect of green manure and organic amendments on potato yield, nitrogen uptake and soil mineral nitrogen. *Biological Agriculture & Horticulture.* 32, 221–236. <https://doi.org/10.1080/01448765.2015.1133319>
- Alam, M. Z., Lynch, D. H., Tremblay, G., Gillis-Madden, R., Vanasse, A. (2018). Optimizing combining green manures and pelletized manure for organic spring wheat production. *Canadian Journal of Soil Science.* 98, 638–649. <https://doi.org/10.1139/cjss-2018-0049>
- Alvarez, R., Cayuela, M. (2022). Organic farming does not increase soil organic carbon compared to conventional farming if there is no carbon transfer from other agroecosystems. A meta-analysis. *Soil Research.*, 60(3), 211–223. <https://doi.org/10.1071/SR21098>
- Barbieri P, Pellerin S, Nesme T. Comparing crop rotations between organic and conventional farming. *Sci Rep.* 2017 Oct 23;7(1):13761. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14271-6>
- Beaumelle, L., Giffard, B., Tolle, P., Winter, S., Entling, M. H., Benítez, E., Zaller, J. G., Auriol, A., Bonnard, O., Charbonnier, Y., Fabreguettes, O., Joubard, B., Kolb, S., Ostandie, N., Reiff, J. M., Richart-Cervera, S., Rusch, A. (2023). Biodiversity conservation, ecosystem services and organic viticulture: A glass half-full. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 351. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108474>
- Bélanger, A., Hogue, R., Dessureault-Rompré, J. (2024). Est-ce que les sols sous cultures maraîchères au Québec sont en santé? Poster presented at RQRAD 2nd annual conference in Levis. February 14-15.
- Bell, L., Sparling, B., Tenuta, M., Entz, M. (2012). Soil profile carbon and nutrient stocks under long-term conventional and organic crop and alfalfa-crop rotations and re-established grassland. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 158, 156–163. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.06.006>
- Birkhofer, K., Bezemer, T. M., Bloem, J., Bonkowski, M., Christensen, S., Dubois, D., Ekelund, F., Fließbach, A., Gunst, L., Hedlund, K., Mäder, P., Mikola, J., Robin, C., Setälä, H., Tatin-Froux, F., Van der Putten, W. H., & Scheu, S. (2008). Long-term organic farming fosters below and aboveground

biota: Implications for soil quality, biological control and productivity. *Soil Biology & Biochemistry*, 40(9), 2297–2308. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.05.007>

Bilenky, M. T., Nair, A., McDaniel, M. D., Shaw, A. M., Bobeck, E. A., Delate, K. (2024). Integrating pastured meat chickens into organic vegetable production increased nitrogen and microbial biomass with variability in presence of *E. coli* and *Salmonella* spp. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 39. <https://doi.org/10.1017/S1742170524000012>

Blanco-Canqui H, Francis CA, Galusha TD (2017) Does organic farming accumulate carbon in deeper soil profiles in the long term? *Geoderma*. 288:213–221. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.031>

Boiteau, G., Goyer, C., Rees, H. W., Zebarth, B. J. (2014). Differentiation of potato ecosystems on the basis of relationships among physical, chemical and biological soil parameters. *Canadian Journal of Soil Science*, 94(4), 463–476. <https://doi.org/10.4141/CJSS2013-095>

Braman, S., Tenuta, M., & Entz, M. (2016). Selected soil biological parameters measured in the 19th year of a long term organic-conventional comparison study in Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 233, 343–351. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.09.035>

Brunori, E., Farina, R., & Biasi, R. (2016). Sustainable viticulture: The carbon-sink function of the vineyard agro-ecosystem. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 223, 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.02.012>

Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., De Deyn, G., de Goede, R., ... Brussard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry* 120, 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>.

Campanelli, G., Canali, S. (2012). Crop Production and Environmental Effects in Conventional and Organic Vegetable Farming Systems: The Case of a Long-Term Experiment in Mediterranean Conditions (Central Italy). *Journal of Sustainable Agriculture*, 36(6), 599–619. <https://doi.org/10.1080/10440046.2011.646351>

Chirinda N, Olesen JE, Porter JR, Schjøning P (2010) Soil properties, crop production and greenhouse gas emissions from organic and inorganic fertilizer-based arable cropping systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 139:584–594. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.10.001>

Coll, P., Le Cadre, E., Blanchart, E., Hinsinger, P., Villenave, C. (2011). Organic viticulture and soil quality: A long-term study in Southern France. *Applied Soil Ecology*, 50(1), 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.07.013>

Cranfield, J., Henson, S., Holliday, J. (2010). The motives, benefits, and problems of conversion to organic production. *Agriculture and Human Values*, 27(3), 291–306. <https://doi.org/10.1007/s10460-009-9222-9>

Crystal-Ornelas, R., Thapa, R., & Tully, K. L. (2021). Soil organic carbon is affected by organic amendments, conservation tillage, and cover cropping in organic farming systems: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 312. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107356>

Daelemans, R., Hulsmans, E., Honnay, O. (2022). Both organic and integrated pest management of apple orchards maintain soil health as compared to a semi-natural reference system. *Journal of Environmental Management*, 303. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114191>

Delate, K., Cambardella, C., Chase, C., Johanns, A., Turnbull, R. (2013). The Long-Term Agroecological Research (LTAR) experiment supports organic yields, soil quality, and economic performance in Iowa. *Crop Manage*. <https://doi.org/10.1094/CM-2013-0429-02-RS>.

Evans, R., Lawley, Y., Entz, M. (2016). Fall-seeded cereal cover crops differ in ability to facilitate low-till organic bean (*Phaseolus vulgaris*) production in a short-season growing environment. *Field Crops Research*, 191, 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.02.020>

Fraser, T. D., Lynch, D. H., O'Halloran, I. P., Voroney, R. P., Entz, M. H., Dunfield, K. E., Lupwayi, N. (2019). Soil phosphorus bioavailability as influenced by long-term management and

applied phosphorus source. *Canadian Journal of Soil Science.*, 99(3), 292–304.

<https://doi.org/10.1139/cjss-2018-0075>

García-Palacios, P., Gattinger, A., Bracht-Jørgensen, H., Brussaard, L., Carvalho, F., Castro, H., Clément, J., De Deyn, G., D'Hertefeldt, T., Foulquier, A., Hedlund, K., Lavorel, S., Legay, N., Lori, M., Mäder, P., Martínez-García, L. B., Martins da Silva, P., Muller, A., Nascimento, E., Reis, F. (2018). Crop traits drive soil carbon sequestration under organic farming. *The Journal of Applied Ecology.*, 55(5), 2496–2505. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13113>

Gattinger, A., Muller, A., Haeni, M., Skinner, C., Fliessbach, A., Buchmann, N., Mäder, P., Stolze, M., Smith, P., Scialabba, N. E.-H., Niggli, U. (2012). Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.*, 109(44), 18226–18231. <https://doi.org/10.1073/pnas.1209429109>

Glover, J., Reganold, J., Andrews, P. (2000). Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 80(1–2), 29–45. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00131-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00131-6)

Gomiero T, Pimentel D, Paoletti MG (2011) Environmental impact of different agricultural management practices: conventional vs. organic agriculture. *Crit Rev. Plant Sci* 30:95–124. <https://doi.org/10.1080/07352689.2011.554355>

Green, V. S., Cavigelli, M. A., Dao, T. H., & Flanagan, D. C. (2005). SOIL PHYSICAL PROPERTIES AND AGGREGATE-ASSOCIATED C, N, AND P DISTRIBUTIONS IN ORGANIC AND CONVENTIONAL CROPPING SYSTEMS. *Soil Science : An Interdisciplinary Approach to Soils Research.*, 170(10), 822–831. <https://doi.org/10.1097/01.ss.0000190509.18428.fe>

Gutiérrez-Gamboa, G., Verdugo-Vásquez, N., & Díaz-Gálvez, I. (2019). Influence of Type of Management and Climatic Conditions on Productive Behavior, Oenological Potential, and Soil Characteristics of a 'Cabernet Sauvignon' Vineyard. *Agronomy.*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/agronomy9020064>

Halde, C., Bamford, K.C., Entz, M.H., 2015. Crop agronomic performance under a six-year continuous organic no-till system and other tilled and conventionally-managed systems in the northern Great Plains of Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 213, 121-130. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.07.029>

Halde, C., Gulden, R.H., and Entz, M.H. (2014). Selecting cover crop mulches for organic rotational no-till systems in Manitoba, Canada. *Agronomy Journal*. 106: 1193–1204 <https://doi.org/10.2134/agronj13.0402>

Halde C, Gagné S, Charles A, Lawley Y. Organic No-Till Systems in Eastern Canada: A Review. *Agriculture*. 2017; 7(4):36. <https://doi.org/10.3390/agriculture7040036>

Hargreaves, S. K., DeJong, P., Laing, K., McQuail, T., Van Eerd, L. L., Naeth, M. A. (2019). Management sensitivity, repeatability, and consistency of interpretation of soil health indicators on organic farms in southwestern Ontario. *Canadian Journal of Soil Science.*, 99(4), 508–519. <https://doi.org/10.1139/cjss-2019-0062>

Herencia, J., Pérez-Romero, L., Daza, A., Arroyo, F. (2021). Chemical and biological indicators of soil quality in organic and conventional Japanese plum orchards. *Biological Agriculture & Horticulture an International Journal.*, 37(2), 71–90. <https://doi.org/10.1080/01448765.2020.1842243>

Hurisso, T. T., Culman, S. W., Horwath, W. R., Wade, J., Cass, D., Beniston, J. W., Bowles, T. M., Grandy, A. S., Franzluebbers, A. J., Schipanski, M. E., Lucas, S. T., Ugarte, C. M. (2016). Comparison of permanganate-oxidizable carbon and mineralizable carbon for assessment of organic matter stabilization and mineralization. *Soil Science Society of America Journal*. 80, 1352–1364. doi: 10.2136/sssaj2016.04.0106

- Ioannidou, S. C., Litskas, V. D., Stavrinides, M. C., Vogiatzakis, I. N. (2022). Linking management practices and soil properties to Ecosystem Services in Mediterranean mixed orchards. *Ecosystem Services*, 53. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101378>
- Krauss, M., Wiesmeier, M., Don, A., Cuperus, F., Gattinger, A., Gruber, S., Haagsma, W., Peigné, J., Palazzoli, M. C., Schulz, F., van der Heijden, M., Vincent-Caboud, L., Wittwer, R., Zikeli, S., Steffens, M. (2022). Reduced tillage in organic farming affects soil organic carbon stocks in temperate Europe. *Soil & Tillage Research*, 216. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105262>
- Kauer, K., Tein, B., Sanchez de Cima, D., Talgre, L., Eremeev, V., Loit, E., Luik, A. (2015). Soil carbon dynamics estimation and dependence on farming system in a temperate climate. *Soil & Tillage Research*, 154, 53–63. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.06.010>
- Kaufman, M. M., Steffen, J. M., Yates, K. L. (2020). Sustainability of soil organic matter at organic mixed vegetable farms in Michigan, USA. *Organic Agriculture*, 10(4), 487–496. <https://doi.org/10.1007/s13165-020-00310-6>
- Lavergne S, Vanasse A, Thivierge M-N, Halde C. (2021). Nitrogen content of pea-based cover crop mixtures and subsequent organic corn yield. *Agronomy Journal*. 1–16. <https://doi.org/10.1002/ajq2.20727>
- Lori, M., Hartmann, M., Kundel, D., Mayer, J., Mueller, R. C., Mäder, P., Krause, H.-M. (2023). Soil microbial communities are sensitive to differences in fertilization intensity in organic and conventional farming systems. *FEMS Microbiology Ecology*, 99(6). <https://doi.org/10.1093/femsec/fiad046>
- Lotter DW, Seidel R, Liebhardt W (2003) The performance of organic and conventional cropping systems in an extreme climate year. *American Journal of Alternative Agriculture* 18:146–154. <https://doi.org/10.1079/ajaa200345>
- Lynch, D. H. (2022). Soil Health and Biodiversity Is Driven by Intensity of Organic Farming in Canada. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.826486>
- Malhi, S. S., Brandt, S. A., Lemke, R., Moulin, A. P., Zentner, R. P. (2009). Effects of input level and crop diversity on soil nitrate-N, extractable P, aggregation, organic C and N, and nutrient balance in the Canadian Prairie. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 84(1), 1–22. <https://doi.org/10.1007/s10705-008-9220-0>
- Mann, C., Lynch, D. H., Dukeshire, S., Mills, A. (2021). Farmers' perspectives on soil health in Maritime Canada. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 45(5), 673–688. <https://doi.org/10.1080/21683565.2020.1866143>
- Marshall, C.B., and Lynch, D.H. (2018). No-till green manure termination influences soil organic carbon distribution and dynamics. *Agron. J.* 110: 1-9. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.01.0063>
- Marshall, C.B., and Lynch, D.H. (2020). Soil microbial and macrofauna dynamics under different green manure termination methods. *Applied Soil Ecology*. 148: 103505. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103505>
- Mayer, M., Krause, H.-M., Fliessbach, A., Mäder, P., Steffens, M. (2022). Fertilizer quality and labile soil organic matter fractions are vital for organic carbon sequestration in temperate arable soils within a long-term trial in Switzerland. *Geoderma*, 426. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116080>
- McNeil, M. O., Lynch, D. H., Alam, M. Z., Mills, A., Marshall, C. B. (2023). Impact of green manure and weeds on selected soil health indicators in an organic grain cropping system in Nova Scotia. *Canadian Journal of Plant Science*, 103(5), 507–511. <https://doi.org/10.1139/cjps-2023-0004>
- Meissner, G., Athmann, M. E., Fritz, J., Kauer, R., Stoll, M., Schultz, H. R. (2019). Conversion to organic and biodynamic viticultural practices: impact on soil, grapevine development and grape quality. *OENO One*, 53(4), 639–659. <https://doi.org/10.20870/oenone.2019.53.4.2470>

- Mondelaers K, Aertsens J, Van Huylenbroeck G (2009) A meta-analysis of the differences in environmental impacts between organic and conventional farming. *British Food Journal*. 111:1098–1119. <https://doi.org/10.1108/00070700910992925>
- Nelson, K., Lynch, D., Boiteau, G. (2009). Assessment of changes in soil health throughout organic potato rotation sequences. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 131(3–4), 220–228. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.01.014>
- Nesbitt, J. E., Adl, S. M. (2014). Differences in soil quality indicators between organic and sustainably managed potato fields in Eastern Canada. *Ecological Indicators*., 37(PART A), 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.10.002>
- Norgaard, A. E., Lewis, D., Borden, K. A., Krzic, M., Carrillo, J., Smukler, S. M. (2022). Trade-offs in organic nutrient management strategies across mixed vegetable farms in Southwest British Columbia. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.706271>
- Norris, C. E., Bean, G. M., Cappellazzi, S. B., Cope, M., Greub, K. L., Liptzin, D., Rieke, E. L., Tracy, P. W., Morgan, C. L., Honeycutt, C. W. (2020). Introducing the North American project to evaluate soil health measurements. *Agronomy Journal*., 112(4), 3195–3215. <https://doi.org/10.1002/agj2.20234>
- Orpet, R.J., Jones, V.P., Beers, E.H., Reganold, J.P., Goldberger, J.R., Crowder, D.W. (2020). Perceptions and outcomes of conventional vs. organic apple orchard management. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 289, 106723. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106723>
- Okur, N., Kayikcioglu, H., Ates, F., Yagmur, B. (2016). A comparison of soil quality and yield parameters under organic and conventional vineyard systems in Mediterranean conditions (West Turkey). *Biological Agriculture & Horticulture an International Journal*., 32(2), 73–84. <https://doi.org/10.1080/01448765.2015.1033645>
- Omondi, E. C., Wagner, M., Mukherjee, A., Nichols, K. (2022). Long-term organic and conventional farming effects on nutrient density of oats. *Renewable Agriculture and Food Systems*., 37(2), 113–127. <https://doi.org/10.1017/S1742170521000387>
- Pogue, S. J., Kröbel, R., Janzen, H. H., Beauchemin, K. A., Legesse, G., de Souza, D. M., Irvani, M., Selin, C., Byrne, J., & McAllister, T. A. (2018). Beef production and ecosystem services in Canada's prairie provinces: A review. *Agricultural Systems*, 166, 152–172. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.06.011>
- Pritchett, K., Kennedy, A. C., Cogger, C. G. (2011). Management Effects on Soil Quality in Organic Vegetable Systems in Western Washington. *Soil Science Society of America Journal*., 75(2), 605–615. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0294>
- Probst, B., Schöler, C., Joergensen, R. G. (2008). Vineyard soils under organic and conventional management—microbial biomass and activity indices and their relation to soil chemical properties. *Biology and Fertility of Soils*, 44(3), 443–450. <https://doi.org/10.1007/s00374-007-0225-7>
- Rakkar, M. K., & Blanco-Canqui, H. (2018). Grazing of crop residues: Impacts on soils and crop production. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 258, 71–90. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.11.018>
- Reganold, J. P., Andrews, P. K., Reeve, J. R., Carpenter-Boggs, L., Schadt, C. W., Alldredge, J. R., Ross, C. F., Davies, N. M., Zhou, J., El-Shemy, H. A. (2010) Fruit and Soil Quality of Organic and Conventional Strawberry Agroecosystems. *PLOS ONE* 5(9): e12346. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0012346>
- Sharifi, M., Lynch, D. H., Hammermeister, A., Burton, D. L., Messiga, A. J. (2014). Effect of green manure and supplemental fertility amendments on selected soil quality parameters in an organic potato rotation in Eastern Canada. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 100(2), 135–146. <https://doi.org/10.1007/s10705-014-9633-x>

Rodale institute (2021). Farming Systems Trial. 40-year Report. [https://rodaleinstitute.org/wp-content/uploads/FST\\_40YearReport\\_RodaleInstitute-1.pdf](https://rodaleinstitute.org/wp-content/uploads/FST_40YearReport_RodaleInstitute-1.pdf)

Rui, Y., Jackson, R. D., Cotrufo, M. F., Sanford, G. R., Spiesman, B. J., Deiss, L., Culman, S. W., Liang, C., Ruark, M. D. (2022). Persistent soil carbon enhanced in Mollisols by well-managed grasslands but not annual grain or dairy forage cropping systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.*, 119(7). <https://doi.org/10.1073/pnas.2118931119>

Schulz, F., Brock, C., Schmidt, H., Franz, K.-P., Leithold, G. (2014). Development of soil organic matter stocks under different farm types and tillage systems in the Organic Arable Farming Experiment Gladbacherhof. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60(3), 313–326. <https://doi.org/10.1080/03650340.2013.794935>

Simona, C., Nicola, F., Micol, M., Rodríguez Carmen, M., Raffaella, M., Daniele, P., Andrea, V., Roberto, Z. (2024). A multi-indicator approach to compare the sustainability of organic vs. integrated management of grape production. *Ecological Indicators.*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111297>

Smith, P., Powlson, D. S., & Schlesinger, W. H. (2000). Considering Manure and Carbon Sequestration. *Science*, 287(5452), 428–429. <http://www.jstor.org/stable/3074420>

Spargo, J. T., Cavigelli, M. A., Mirsky, S. B., Maul, J. E., Meisinger, J. J. (2011). Mineralizable soil nitrogen and labile soil organic matter in diverse long-term cropping systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 90(2), 253–266. <https://doi.org/10.1007/s10705-011-9426-4>

Spargo, J. T., Cavigelli, M. A., Mirsky, S. B., Meisinger, J. J., Ackroyd, V. J. (2016). Organic Supplemental Nitrogen Sources for Field Corn Production after a Hairy Vetch Cover Crop. *Agronomy Journal.*, 108(5), 1992–2002. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0485>

Sprunger, C. D., Culman, S. W., Deiss, L., Brock, C., Jackson-Smith, D. (2021). Which management practices influence soil health in Midwest organic corn systems? *Agronomy Journal.*, 113(5), 4201–4219. <https://doi.org/10.1002/agj2.20786>

Stainsby, A., Entz, M. H., Naeth, M. A. (2022). Aggregate stability after 25 years of organic, conventional, and grassland management. *Canadian Journal of Soil Science.*, 102(2), 519–530. <https://doi.org/10.1139/cjss-2021-0104>

Steinmetz, Z., Kenngott, K. G. J., Azeroual, M., Schäfer, R. B., Schaumann, G. E. (2017). Fractionation of copper and uranium in organic and conventional vineyard soils and adjacent stream sediments studied by sequential extraction. *Journal of Soils and Sediments : JSS.*, 17(4), 1092–1100. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1623-y>

Teasdale, J. R., Coffman, C. B., Mangum, R. W. (2007). Potential Long-Term Benefits of No-Tillage and Organic Cropping Systems for Grain Production and Soil Improvement. *Agronomy Journal.*, 99(5), 1297–1305. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0362>

Thiessen Martens, J. R., Lynch, D. H., Entz, M. H., Willenborg, C. (2019). A survey of green manure productivity on dryland organic grain farms in the eastern prairie region of Canada. *Canadian Journal of Plant Science.*, 99(5), 772–776. <https://doi.org/10.1139/cjps-2018-0311>

Torstensson G., Aronsson H., Bergstrom L. (2006). Nutrient use efficiencies and leaching of organic and conventional cropping systems in Sweden. *Agronomy Journal.* 98:603–613. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0224>

Tuomisto H. L., Hodge I. D., Riordan P., Macdonald D. W. (2012). Does organic farming reduce environmental impacts?—a meta-analysis of European research. *Journal of Environmental Management*, 112:309–320. <https://doi-org/10.1016/j.jenvman.2012.08.018>

Tully, K.L., McAskill, C. (2020). Promoting soil health in organically managed systems: a review. *Org. Agr.* 10, 339–358. <https://doi-org/10.1007/s13165-019-00275-1>

- Unc, A., Eshel, G., Unc, G. A., Doniger, T., Sherman, C., Leikin, M., Steinberger, Y. (2021). Vineyard soil microbial community under conventional, sustainable and organic management practices in a Mediterranean climate. *Soil Research.*, 59(3), 253–265. <https://doi.org/10.1071/SR20152>
- Van Geel, M., Verbruggen, E., De Beenhouwer, M., van Rennes, G., Lievens, B., Honnay, O. (2017). High soil phosphorus levels overrule the potential benefits of organic farming on arbuscular mycorrhizal diversity in northern vineyards. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 248, 144–152. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.07.017>
- Vavoulidou, E., Avramides, E., Dimirkou, A., Papadopoulos, P. (2006). Influence of Different Cultivation Practices on the Properties of Volcanic Soils on Santorini Island, Greece. *Communications in Soil Science and Plant Analysis.*, 37(15–20), 2857–2866. <https://doi.org/10.1080/00103620600832837>
- Wachter, J. M., Painter, K. M., Carpenter-Boggs, L. A., Huggins, D. R., Reganold, J. P. (2019). Productivity, economic performance, and soil quality of conventional, mixed, and organic dryland farming systems in eastern Washington State. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 286. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106665>
- Wander, M. M., Yun, W., Goldstein, W. A., Aref, S., & Khan, S. A. (2007). Organic N and particulate organic matter fractions in organic and conventional farming systems with a history of manure application. *Plant and Soil.*, 291(1–2), 311–321. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9198-4>
- Welsh, C., Tenuta, M., Flaten, D.N., Thiessen-Martens, J.R. Entz, M.H. (2009). High Yielding Organic Crop Management Decreases Plant-Available but Not Recalcitrant Soil Phosphorus. *Agron. Journal*, 101: 1027-1035. <https://doi-org/10.2134/agronj2009.0043>
- Wheeler, S., Crisp, P. (2011). Going organic in viticulture: a case-study comparison in Clare Valley, South Australia. *Australasian Journal of Environmental Management.*, 18(3), 182–198. <https://doi.org/10.1080/14486563.2011.583206>
- Wortman S. E., Galusha T. D., Mason S. C., Francis C. A. (2011). Soil fertility and crop yields in long-term organic and conventional cropping systems in Eastern Nebraska. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 27:200–216. <https://doi-org/10.1017/S1742170511000317>
- Zani, C. F., Gowing, J., Abbott, G. D., Taylor, J. A., Lopez-Capel, E., Cooper, J. (2021). Grazed temporary grass-clover leys in crop rotations can have a positive impact on soil quality under both conventional and organic agricultural systems. *European Journal of Soil Science.*, 72(4), 1513–1529. <https://doi.org/10.1111/ejss.13002>