

Rapport 3 de l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec

Stratégies et interventions pour améliorer la santé des sols



Responsable scientifique : Marc-Olivier Gasser, agr. Ph.D

Co-auteurs : Denis Angers, Ph.D.

Collaborateurs : Catherine Bossé, agr. B. Sc.
Chedzer-Clarc Clément, Ph. D.
Eduardo Chavez Benalcazar, B. Sc.
Jean-Benoît Mathieu, M. Sc.
Lucie Grenon, agr., B. Sc.
Nyck Rochel Occean, agr., M. Sc.
Myck Wu, Ph. D.

Rapport présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ)

Date : Avril 2023

Projet IRDA # : 820 050



L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) a été constitué en mars 1998 par quatre fondateurs, soit le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), l'Union des producteurs agricoles (UPA), le ministère de l'Environnement et de la lutte contre les changements climatiques (MELCC) et le ministère de l'Économie, de l'Innovation (MEI).

L'Institut est une corporation de recherche à but non lucratif, qui travaille chaque année sur une centaine de projets de recherche en collaboration avec de nombreux partenaires du milieu agricole et du domaine de la recherche.

Notre mission

L'IRDA a pour mission de soutenir le développement d'une agriculture durable au Québec en favorisant le recours à l'innovation et aux partenariats.

Consulter le www.irda.qc.ca pour en connaître davantage sur l'Institut et ses activités.



Ce rapport peut être cité comme suit :

Gasser, M.-O. et D. Angers. 2023. Rapport 3 de l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec. : Stratégies et interventions pour améliorer la santé des sols. Rapport final présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). IRDA. 15 pages.

© Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)

Équipe de réalisation du projet*Responsable scientifique*

Marc-Olivier Gasser, agr., Ph. D.

Chercheur associé

Claude Bernard, Ph. D.

Chargés de projet et prof. de recherche :

Catherine Bossé, agr. B. Sc.

Marie-Ève Tremblay, agr., M. Sc.

Francis Allard, agr., M. Sc.

Chedzer-Clarc Clément, Ph. D.

Jean-Benoît Mathieu, M. Sc.

Équipe de rédaction du rapport

Marc-Olivier Gasser, agr., Ph. D.

Denis Angers, Ph. D.

Collaborateurs IRDA

Michèle Grenier, M. Sc.

Myck Wu, Ph. D.

Eduardo Chavez Benalcazar, B. Sc.

Nyck Rochel Occean, agr., M. Sc.

Pierre-Luc Lemire, Tech. A.

Rachelle Fecteau, Tech. A.

Philippe Fortin, Tech. A.

Collaborateurs externes

Lucie Grenon, agr., B. Sc.

Michaël Leblanc, Ph. D.

Mikaël Guillou, M.Sc.

Denis Angers, Ph.D.

Les lecteurs qui souhaitent commenter ce rapport peuvent s'adresser à :

Marc-Olivier Gasser, agr., Ph. D.

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

2700, rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

Téléphone : 418 643-2380, poste 650

Courriel : marc-o.gasser@irda.qc.ca

Remerciements

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière accordée par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. L'IRDA a également fourni une contribution importante dans le cadre de cette étude. Les auteurs remercient également les participants du projet et reconnaissent également l'appui technique fourni par le personnel de recherche de l'IRDA et les multiples Clubs-conseils, Groupes-conseils et firmes citées dans le rapport.

Les auteurs voudraient également remercier tous les membres du comité d'orientation et de suivi qui ont encadré la conception et la réalisation de ces travaux sous la gouverne du MAPAQ :

Comité d'orientation et de suivi du MAPAQ

Coordination :

Janylène Savard et Stéphane Martel, MAPAQ

Membres du comité :

Denis Angers et Lucie Grenon (retraités d'AAC)

Athyna Cambouris et Noura Ziadi (AAC)

Mikael Guillou, Odette Ménard et Denis Ruel (MAPAQ)

RÉSUMÉ

Comme l'avait mis en lumière l'inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles réalisé en 1990 (Tabi et al., 1990), l'EESSAQ (2023) a confirmé que les sols agricoles du Québec subissaient une forte dégradation particulièrement dans les monocultures annuelles intensives. Les sols en contexte d'agriculture plus intensive dans les régions méridionales de la plaine de Montréal et du Centre du Québec sont généralement plus souvent affectés par la compaction, la dégradation de la structure et la diminution de la teneur en matière organique. Dans le présent rapport, nous présentons des recommandations sur les pratiques à mettre en œuvre pour favoriser la préservation et l'amélioration de la santé des sols du Québec. Ces recommandations sont basées à la fois sur les connaissances historiques acquises au Québec et à l'international et sur les résultats de l'EESSAQ 2023 (rapports 1 et 2).

Globalement, les résultats obtenus dans la cadre de l'EESSAQ confirment que la santé des sols est fortement influencée par l'usage des sols et les pratiques agricoles utilisées. L'effet bénéfique des pratiques de conservation telles que le travail réduit (ou semis direct) et la couverture de sols, déjà observés en conditions de parcelles expérimentales, est bien mis en évidence dans l'ensemble du Québec dans les conditions réelles des exploitations agricoles. Il apparaît également évident que la teneur en M.O. de l'horizon de surface est un facteur clé du maintien de la santé des sols, ce facteur étant fortement lié à la plupart des autres indicateurs de la santé des sols.

La dégradation des propriétés physiques est un autre enjeu à considérer. Elle se traduit sous plusieurs formes comme la dégradation de la structure, la compaction et la diminution de la porosité, la dégradation des propriétés dynamiques régulant les échanges d'air et les mouvements de l'eau, et finalement l'érosion des sols. Plusieurs pratiques agricoles influencent ces propriétés physiques et les plus importantes sont celles qui bouleversent intensivement le sol et qui le compactent, sans retourner ou maintenir la matière organique dans le sol. L'accumulation d'éléments nutritifs et la contamination des sols par des métaux lourds et aux autres contaminants d'intérêt émergent est aussi une préoccupation à avoir en tête pour maintenir les sols en santé. Traditionnellement, les sols ont été perçus comme des milieux filtrants capables de dégrader la matière organique et de recycler les effluents et autres matières exogènes apportées aux sols, mais cette vision doit être revue en considérant les problématiques soulevées ces dernières décennies avec des contaminants de diverses natures, dont certains sont même qualifiés d'éternel.

Nonobstant ces nouvelles problématiques, nous avons réunis dans sept domaines d'interventions les pratiques à mettre en place favorisant le maintien ou l'augmentation de la M.O., le maintien ou l'amélioration des propriétés physiques et une meilleure gestion des engrais pour éviter les accumulations d'éléments nutritifs dans le sol. La plupart des pratiques bénéfiques (travail réduit, apports de matière organique, couverture du sol, diversification des cultures, réduction de la compaction, fertilisation raisonnée, etc.) sont généralement bien connues, mais il existe des freins à leur adoption liés aux conditions pédoclimatiques ou socio-économiques. Il est donc essentiel que la recherche agronomique offre aux gestionnaires des politiques agricoles des solutions aux producteurs pour adapter et favoriser l'adoption de ces différentes pratiques aux conditions locales de sol et de climat, en tenant compte du contexte social. C'est particulièrement critique dans le contexte pédoclimatique québécois où la saison de croissance est limitée et les sols présentent des conditions relativement variables en termes de texture, de drainage et de fertilité naturelle.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	i
Introduction.....	1
Stratégies et interventions proposées	3
Maintenir, voire accroître les surfaces agricoles en cultures pérennes.....	3
Accroître l'utilisation des techniques de travail du sol simplifié ou du semis-direct.....	4
Maintenir une couverture du sol (vivante ou résidus de culture)	7
Diversifier les rotations en grandes cultures.....	8
Favoriser une gestion intégrée des fumiers de ferme	10
Améliorer la gestion des machineries agricoles afin d'éviter la compaction et la dégradation physique des sols	4
Éviter sinon réduire ou optimiser l'usage des intrants de synthèse.	11
Défis à l'intégration des stratégies proposées	12
Conclusion	13
Références	14

CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Les superficies de sols à bon potentiel agricole sont limitées au Québec. Les superficies cultivées occupaient environ 1,75 millions d'ha en 2021 ([Statistiques Canada](#)), auquel on peut ajouter 500 000 ha en pâturages et terres défrichées (Lajoie et al., 1975). Ce qui représente moins de 2 % du territoire québécois. Il importe donc d'assurer la pérennité de cette ressource en suivant son état et son évolution. Depuis plusieurs années, de nombreux intervenants se questionnent sur l'état de santé des sols du Québec. Le dernier inventaire sur le sujet datant de 1990, le MAPAQ a mandaté l'IRDA pour réaliser une nouvelle étude sur le sujet à l'orée de 2020.

Objectifs

L'objectif de l'étude vise à connaître et documenter l'état actuel de la santé des sols agricoles pour permettre au MAPAQ de mieux orienter ses interventions et d'en déterminer les priorités d'action.

Le mandat confié par le MAPAQ prévoyait les six objectifs spécifiques suivants :

1. Obtenir des données quantitatives sur l'état de santé des sols de plusieurs groupes de séries de sols québécois, dans plusieurs régions pédologiques.
2. Lorsque possible, faire un suivi de l'état des sols de certaines parcelles ayant été échantillonnées lors de l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec (Tabi et al., 1990) et décrire l'évolution de ces sols au cours de cette période.
3. À partir des résultats obtenus, interpréter et déterminer les niveaux de santé des sols pour les groupes de séries de sols sélectionnés en comparant, dans chaque site, des sols cultivés et des témoins non perturbés.
4. Déterminer quels sont les paramètres qui ont le plus d'impacts sur la productivité des sols ou quels en sont les facteurs limitants pour les sites cultivés de chaque groupe de séries de sols sélectionnés (en vérifiant notamment le lien entre les propriétés des sols et les rendements).
5. Contribuer à l'amélioration des sols agricoles québécois dégradés en :
établissant un état de situation de la santé des principaux groupes de séries de sols agricoles au Québec;
recommandant des méthodes de gestion des sols (à partir des résultats de l'étude), facilitant ainsi l'élaboration et la mise en œuvre par le MAPAQ d'une stratégie d'intervention pour améliorer la santé des sols québécois dégradés;
diffusant efficacement les résultats et les recommandations de l'étude afin de sensibiliser un grand nombre d'entreprises agricoles sur l'importance de préserver la santé de leurs sols.
6. Proposer une méthode et une fréquence de suivi de l'étude afin de suivre l'évolution de la santé des sols des sites évalués.

Présentation des résultats en cinq rapports

Rapport 1 : État de santé des principales séries de sols cultivées au Québec

Rapport 2 : Effets des pratiques agricoles sur la santé des sols et la productivité des cultures

Rapport 3 : Stratégies et interventions pour améliorer la santé des sols

Rapport 4 : Recommandations pour le suivi de la santé des sols au Québec

Rapport 5 : Sévérité de l'érosion des sols évaluée à l'aide du ^{137}Cs

INTRODUCTION

Les sols sont généralement considérés comme une ressource non-renouvelable à l'échelle de la vie humaine. Étant donné leur importance capitale dans la production alimentaire et les divers services écosystémiques (préservation de la ressource en eau, régulation du climat, réservoir de biodiversité) qu'ils rendent, leur préservation est essentielle. Au Québec, la surface de sol occupée par les activités agricoles était estimée à environ 3,4 millions d'hectares en 2011 ([Statistiques Canada](#)). Les superficies cultivées occupaient quant à elles 1,75 millions d'ha en 2021 ([Statistiques Canada](#)), auquel on peut ajouter 500 000 ha en pâturages et terres défichées (Lajoie et al., 1975). Ce qui représente moins de 2 % du territoire québécois. C'est donc une ressource précieuse essentielle, voire vitale, pour la production alimentaire du Québec et son autonomie à long terme.

Le maintien de la qualité ou de la santé des sols est donc un enjeu vital. Plusieurs définitions de la santé ou qualité des sols ont été proposées. Quoique certains utilisent indifféremment les expressions santé et qualité des sols (Acton et Gregorich, 1995), d'autres, proposent que la qualité des sols mette l'accent sur les caractéristiques intrinsèques (permanentes) du sol, alors que la santé des sols met l'emphasis sur l'aspect dynamique et gérable du sol (Alain Brauman, IRD, France, Comm. personnelle). Par ailleurs, la FAO définit la santé des sols comme étant la capacité continue du sol à fonctionner comme un système vivant vital, dans les limites des écosystèmes et de l'utilisation des terres, pour soutenir la productivité biologique, promouvoir la qualité de l'air et de l'eau, et maintenir la santé végétale, animale et humaine (FAO, 2015).

L'inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles réalisé en 1990 (Tabi et al. 1990) a mis en lumière que les sols agricoles du Québec subissaient une forte dégradation, en particulier en lien avec la culture annuelle intensive. L'EESSAQ (2023) a révélé les mêmes effets des pratiques agricoles intensives sur la plupart des indicateurs de santé des sols. Les sols en contexte d'agriculture plus intensive dans les régions méridionales de la plaine de Montréal et du Centre du Québec sont généralement plus souvent affectés en termes de compaction, de dégradation de la structure et de diminution de la matière organique. La compaction profonde dans les sols argileux et loameux sous pratiques agricoles intensives se manifeste par une diminution de la macroporosité, de l'aération et de la capacité de diffusion des gaz, alors que dans les sols sableux, c'est la capacité de rétention en eau qui est plus souvent réduite. La dégradation de la structure suit à peu près les mêmes tendances avec généralement des proportions d'agrégats stables plus faibles sous cultures intensive. La matière organique et sa capacité potentielle à minéraliser de l'azote sont affectées à la baisse par l'intensité des pratiques et le climat semble jouer un rôle dans les niveaux atteints dans les différentes régions pédoclimatiques. Finalement, les niveaux de P et autres éléments apportés avec la gestion des effluents d'élevage sont à la fois conditionnés par les quantités apportées et les types de sols. L'effet de la dégradation des sols sur la productivité des cultures n'est pas évident à démontrer lorsque toutes les cultures sont considérées. Une étude complémentaire sur la réponse aux engrais des cultures de maïs et de prairies de graminées a toutefois démontré que le rendement obtenu sans engrais est fortement conditionné par la présence de matière organique et la capacité du sol à minéraliser l'azote, de même que la condition physique du sol (Gasser et al., 2023).

Dans ce rapport, nous présentons des recommandations sur les pratiques (interventions) à mettre en œuvre pour favoriser la préservation et l'amélioration de la santé des sols du Québec. Ces recommandations sont basées à la fois sur les connaissances historiques acquises au Québec et à l'international et sur les résultats de l'EESSAQ 2023 (rapports 1 et 2).

STRATÉGIES ET INTERVENTIONS PROPOSÉES

Sept domaines d'interventions sont proposés pour guider les pratiques et les stratégies à déployer pour améliorer, sinon conserver la santé de sols. Nos recommandations incluent, entre autres, les trois piliers de l'ACS ([Agriculture de conservation des sols](#)) selon la FAO : couverture permanente du sol, diversification des espèces cultivées et perturbation mécanique minimale du sol. Chaque domaine d'intervention est complété d'un tableau présentant une liste non exhaustive de stratégies à déployer. Cette liste demeure ouverte.

Maintenir, voire accroître les surfaces agricoles en cultures pérennes

L'Inventaire des problèmes de dégradation des sols du Québec (Tabi 1990) a clairement montré une différence importante entre les sols sous prairie (cultures pérennes) et les cultures annuelles. De façon globale, les sols sous prairie présentaient une plus forte teneur en matière organique, une meilleure stabilité structurale et une masse volumique apparente plus faible. Cet effet était visible dans toutes les régions agricoles où les cultures annuelles étaient pratiquées.

Cet effet bénéfique des cultures pérennes (prairies) sur la santé des sols est bien connu dans la littérature scientifique internationale et québécoise (Martel et Deschenes 1976, Elustondo et al. 1990, Angers 1992). L'impact le plus généralement observé est une plus grande teneur en M.O. (ou C) dans les systèmes sous prairie que sous culture annuelle. Dans un système sous prairie, la période de photosynthèse des plantes est plus longue et le système racinaire plus important, ce qui conduit à un plus grand apport de carbone au sol. De plus, l'absence de travail de sol sous prairie facilite l'accumulation de M.O. dans l'horizon de surface. L'accumulation de M.O. en surface contribue ainsi à l'amélioration ou au maintien de la stabilité structurale et de la porosité du sol (plus basse masse volumique apparente).

Les résultats du rapport 2 de l'EESSAQ démontrent aussi que les systèmes sous cultures pérennes ou de cultures annuelles associés à des cultures pérennes présentent en général un meilleur état de santé des sols que les systèmes en grandes cultures annuelles ou en production maraîchère. En surface, les sols ont généralement une meilleure structure avec un diamètre moyen pondéré des agrégats plus élevé quand une culture pérenne est présente dans la rotation. À toutes les profondeurs considérées, les teneurs en matière organique ainsi que le potentiel du sol à minéraliser de l'azote et la macroporosité sont plus élevées, tandis que la masse volumique apparente est plus faible. Il existe toutefois des gradients régionaux liés au climat qui modulent les niveaux de matière organique ou de carbone atteints dans les sols. La relation entre la proportion des superficies en cultures pérennes et les niveaux de matière organique dans les sols est aussi démontrée à l'échelle du Québec dans une autre étude basée sur les analyses de sols des producteurs (Gasser et al., 2022). Dans la synthèse présentée dans le rapport 1 de l'EESSAQ, les séries de sols dans les régions plus méridionales sont plus souvent dégradées et elles sont plus souvent sous cultures annuelles (Gasser et al., 2023a).

Les sols argileux et loameux et ceux sur tills en régions méridionales (Montérégie, Centre-du-Québec, Lanaudière) sont plus compacts à la surface du sol et présentent un niveau d'aération déficient en profondeur. Les sols sableux à squelettiques sont parfois plus compacts en profondeur, mais sans lien apparent avec un gradient climatique. La dégradation de la structure ainsi que la baisse des teneurs en matière organique et des capacités potentielles du sol à minéraliser de l'azote et du carbone associés aux cultures annuelles sont davantage liées au gradient climatique peu importe le type de matériau sur lesquels les sols se sont développés. Pour ce qui est des

accumulations de P, Cu et Zn, les gradients climatiques ont une moins grande importance que la fréquence d'apports en amendements organiques et les types de matériaux et de sols qui conditionnent leur accumulation.

Plusieurs solutions s'offrent pour maintenir ou réintroduire les cultures pérennes dans les rotations, parmi lesquelles certaines sont encore à développer/démontrer et d'autres ont atteint la maturité nécessaire ou ne posent pas de réels défis à l'adoption par les producteurs. Parmi la liste suivante de solutions, seules quelques-unes peuvent être adoptées rapidement.

Stratégies pour réintroduire ou maintenir les cultures pérennes dans les rotations	Niveau de maturité*
Développer la semence et le marché pour des grains issus de céréales et de légumineuses pérennes	1
Développer des technologies et des marchés en alimentation humaine à partir de légumineuses fourragères ou autres espèces pérennes	3
Favoriser des cultures pérennes commerciales de longue durée (10-15 ans) dans les champs à risque élevé d'érosion des sols	9
Organiser le partage de terre avec des producteurs de foin commercial	7
Intensifier le développement des marchés de foin commercial	6
Favoriser les élevages sur pâturage intensif	6
Favoriser l'ensilage d'herbe en remplacement de l'ensilage de maïs	9
Développer des systèmes de cultures de couverture et/ou en alternance avec plantes pérennes : Ex. culture du maïs au 60 pouces avec prairie en culture intercalaire, trèfles intercalaires dans le blé d'automne	4/8
Développer des filières de biométhanisation ou de production d'éthanol à partir de récolte de cultures pérennes seulement	5
Favoriser des filières de production de biomasse à partir de récolte de cultures pérennes sur les terres difficilement exploitable de manière durable telles les terres du littoral	5
Rétribuer les producteurs pour remettre ou garder en prairie une proportion de leur surface cultivée	5
...	

*Niveau de maturité variant de 1, le moins avancé à 9, déjà utilisé dans des conditions réelles

Améliorer la gestion des machineries agricoles afin d'éviter la compaction et la dégradation physique des sols

Le problème de compaction des sols est reconnu depuis longtemps au Québec. Déjà en 1986, Mehuys (1986) estimait à 15% les pertes de rendements associées à la compaction sur l'ensemble des cultures du Québec, même si l'effet de la compaction sur les pertes de rendements est difficile à généraliser. L'inventaire des problèmes de dégradation des sols (Tabi et al., 1990) évaluait à 100 000 ha la superficie des sols en monocultures annuelles

ayant subi de la compaction. Depuis, le poids des équipements agricoles circulant dans les champs n'a cessé d'augmenter.

La mécanisation du travail au champ a permis d'augmenter considérablement la productivité des exploitations agricoles. Ainsi, on cherche toujours à améliorer l'efficacité des opérations culturales au champ avec une machinerie plus rapide et plus large permettant de couvrir une plus grande surface en moins de temps. Cette augmentation de la capacité effective des opérations mécanisées s'est réalisée au détriment d'une machinerie de plus en plus lourde. Bien que la pression exercée à la surface du sol soit restée pratiquement constante depuis les années 60 avec l'avènement des pneus plus larges et à basses pressions, la pression exercée en profondeur dans le sous-sol par les moissonneuses batteuses a presque triplé, passant soit moins de 50 kPa à près 150 kPa à 50 cm de profondeur (Keller et al., 2022). Selon les travaux de Schjønning et al. (2012), pour éviter une pression de 50 kPa à 50 cm de profondeur dans le sol et ainsi éviter sa déformation, le poids à la roue ne devrait pas dépasser 3,5 Mg avec des pneus à basse pression de 0,5 bar.

Le rapport 2 de l'EESSAQ présente des relations étroites entre plusieurs indicateurs de santé des sols et le risque de compaction estimé à partir du nombre de passages, de la grosseur de la machinerie et des mesures de prévention déclarées par les producteurs. Plus ce risque augmente, plus la compaction ou la masse volumique apparente (MVA) augmente, plus la macroporosité ou l'aération diminue et plus le DMP ou la stabilité des agrégats et la structure se détériore. Par ailleurs, ces phénomènes se propagent en profondeur dans le sol au point que la macroporosité est inférieure au seuil critique de 0,10 cm³/cm³ ou 10 %.

La compaction n'est pas uniquement induite par les citernes d'épandage. Pour l'épandage, il y a moyen d'utiliser des systèmes d'irrigation pour les lisiers et de viser des fenêtres durant la saison où les sols sont moins fragiles à la compaction. En revanche, pour la récolte des cultures tardives en fin de saison, la machinerie de plus en plus lourde utilisée pour la récolte et le transbordement, dans des conditions de sols saturés en eau est plus difficile à éviter. Du moins, les tendances de ces dernières décennies à l'augmentation du poids à la roue des moissonneuses batteuses n'ont pas fléchi.

Stratégies pour réduire la compaction des sols	Niveau de maturité
Sensibiliser les producteurs aux effets de la compaction sur la productivité et la rentabilité de leurs cultures, ainsi que sur les effets environnementaux adverses	9
Assurer que le poids à la roue ne dépasse pas 3500 kg pour les roues simples, 3000 kg pour les roues jumelées et 2700 kg pour les roues triples	8
Viser des cultures ou des hybrides avec des saisons de croissance plus courtes	9
Encourager l'emploi de pneus radiaux à basse pression et le recours aux roues doubles lorsque possible	9
Diminuer le nombre de passages par saison	9
Équiper la machinerie pour le télégonflage des pneus	6
Contrôler le trafic dans les champs	5
Réaménager des chemins de ferme	9
...	

***Niveau de maturité variant de 1, le moins avancé à 9, déjà utilisé dans des conditions réelles**

Le premier moyen à recommander pour réduire la compaction demeure la sensibilisation des producteurs aux effets adverses de la compaction sur la productivité et la rentabilité de leurs cultures. De la recherche pour quantifier les pertes de rendements occasionnées par la compaction profonde pourrait faciliter cette sensibilisation des producteurs. Les résultats présentés dans le rapport 2 de l'EESSAQ ont démontré qu'il y a des liens importants entre les risques de compaction engendrés par la grosseur de la machinerie et les propriétés physiques des sols jusqu'en le début de l'horizon B, mais des liens plus directs pourraient être établis entre ces risques et l'effet sur la productivité des cultures dans une prochaine analyse.

Accroître l'utilisation des techniques de travail du sol simplifié ou du semis-direct

De façon générale, il est reconnu que l'utilisation répétée et continue du labour conventionnel (charrue à versoir) conduit à la dégradation de certaines propriétés du sol, en particulier la matière organique dans l'horizon de surface. Au contraire, la mise en place d'un système de semis-direct ou de travail réduit permet d'atténuer ces effets. Plusieurs études réalisées au Québec et à l'international ont mis en évidence l'effet bénéfique du travail réduit et du semis-direct sur la quantité et la qualité de la matière organique, l'activité biologique et la stabilité structurale des sols, en particulier dans l'horizon de surface (Angers et al., 1993 a et b; Bissonnette et al., 2001). Ces effets apparaissent rapidement (à l'intérieur de 5 ans) lors de la mise en place de ces pratiques.

L'impact de ces pratiques de travail simplifié sur la masse volumique apparente (MVA) est moins clair. Les sols sous semis-direct sont souvent plus denses pendant les premières années mais récupèrent au fil des années.

Les résultats de l'analyse présentée dans le rapport 2 de l'EESSAQ montrent bien l'effet positif du travail réduit et du semis-direct sur la santé des sols, en particulier sur la teneur en M.O. et ses composantes (C et N potentiellement minéralisables et le diamètre moyen pondéré des agrégats (DMP)). La MVA a tendance à être plus faible sous semis direct, mais les effets ne sont pas significatifs. La structure du sol est toutefois en meilleur état sous semis direct, tel qu'en témoigne le diamètre moyen pondéré des agrégats (DMP) plus élevé. On note également des teneurs plus faibles en P dans les horizons Ap2 et B sous semis direct et les mêmes tendances pour Cu et Zn.

L'analyse plus générale de l'effet des pratiques agricoles sur les indicateurs de santé de sols a aussi démontré que l'intensité du travail de sol et le sol laissé à nu étaient inversement reliés au DMP dans l'horizon Ap1, positivement reliés à la MVA et les teneurs en P dans les horizons Ap1 et Ap2, et inversement reliés à la teneur en M.O. et la capacité du sol à minéraliser le C et N dans les mêmes horizons. Les teneurs plus élevées de P sous travail de sol plus intensif soulignent l'importance d'incorporer les engrais organiques au sol dans un contexte de gestion des effluents d'élevage.

Dans bien des situations, le travail de sol est inévitable. Par exemple, plusieurs cultures maraichères semées en plantules et la pomme de terre nécessitent une préparation de lit de semence avec une perturbation mécanique du sol. Le sarclage mécanique comme régie de contrôle des adventices est particulièrement agressif sur le sol et pratiquement inévitable en régie biologique pour éviter l'usage d'herbicide. Notons toutefois que plusieurs techniques sont proposées pour contrôler les adventices et réduire cette intensité du travail de sol avec le recours à des cultures de couvertures et du travail réduit. L'épandage des effluents d'élevage au champ nécessite une incorporation rapide sinon instantanée des effluents pour réduire les émissions d'ammoniac et augmenter leurs valeurs fertilisantes en azote. De même, l'incorporation des effluents au sol augmente les surfaces de contact avec

le sol, la sorption des éléments fertilisants comme le phosphore et réduit les risques de ruissellement de ces éléments. D'autre part, l'avènement des semences génétiquement modifiées pour permettre l'usage d'herbicides non spécifiques a largement facilité l'adoption et la popularité du semis direct et de la réduction du travail de sol. Toutefois, d'autres problématiques liées à la gestion des herbicides et l'accumulation des matières fertilisantes à la surface du sol sont apparues ces dernières décennies et demeurent un enjeu.

À l'autre extrême, le recours au labour conventionnel (charrue à versoir) à chaque année et à des pratiques intensives de travail de sol qui laissent le sol à nu sur une bonne période de l'année doivent être évités. Plusieurs initiatives et stratégies de conservation des sols ont d'ailleurs misé sur le recours aux cultures de couvertures et les couverts de résidus durant l'hiver jusqu'au semis pour motiver les producteurs à délaissé le travail primaire du sol à l'automne. Puisque les stratégies de réduction du travail de sol sont souvent liées à l'inclusion de cultures de couverture et au contrôle de la couverture de sols par des résidus de culture, elles seront considérées ensemble dans la prochaine section. Les stratégies pour encourager strictement l'abandon du labour et la réduction du travail de sol sont listées ici :

Stratégies pour réduire le travail du sol et le labour	Niveau de maturité
Diffuser les avantages du semis direct en termes de consommation d'énergie, de réduction du temps d'opération et des bénéfices occasionnés sur la santé du sol	9
Développer des systèmes intégrant cultures de couverture, semis direct et diversification des cultures (Agriculture de conservation des sols)	7
Favoriser le travail de sol en bande ou sur billon pour limiter le travail de sol	8
Utiliser des outils de travail primaire réduit comme des outils combinés avec des dents de chisel au lieu de la charrue à versoir	9
...	

*Niveau de maturité variant de 1, le moins avancé à 9, déjà utilisé dans des conditions réelles

Maintenir une couverture du sol (vivante ou résidus de culture)

L'importance d'une couverture du sol, sous forme de culture de couverture ou de résidus de culture, pour le maintien de la santé des sols dans l'horizon de surface est généralement reconnue. (Wood and Bowman, 2021; Turmel et al., 2015). Le maintien d'une couverture végétale permanente ou d'un paillis contribue au maintien de la matière organique, de l'activité biologique, de la stabilité structurale (et ainsi au maintien de la structure du sol et de ses propriétés hydrauliques. Elle réduit également la formation de croûte de battance, favorise l'infiltration de l'eau, réduit le ruissellement et les risques d'érosion et finalement augmente la réserve en eau dans le sol. L'effet des cultures de couvertures sur la productivité des cultures est aussi bien démontré (Bourgeois et al., 2021). L'indice de sol à nu utilisé comme indicateur de pression des pratiques agricoles dans le rapport 2 de l'EESSAQ, montre un lien fort entre cet indicateur et la santé des sols, en particulier la teneur en M.O. et les propriétés qui y sont liées (DMP, C et N potentiellement minéralisables). Plus les sols sont travaillés et laissés dénudés, plus les teneurs en M.O. sont faibles dans les horizons Ap1 et Ap2 et à l'inverse la masse volumique apparente (MVA) et les teneurs en P sont plus élevées. Ces effets sont même apparents dans l'horizon B.

Que ce soit pour le contrôle de l'érosion ou le maintien de l'activité biologique dans les sols sur une plus longue période de l'année en cultures annuelles, il est recommandé de maintenir au minimum 30 % de couverture à la surface du sol soit après les semis ou au moins jusqu'après la fonte des neiges au moment où les épisodes de ruissellement sont les plus intenses (Massicotte et al., 2000). Cette couverture peut prendre la forme de cultures de couverture ou de résidus de culture. Le maintien des résidus de culture à la surface des sols à l'automne dépend toutefois de la récolte de ces résidus (pailles, tiges, etc.) qui doit être évitée et des pratiques de non-travail ou de travail réduit du sol adoptées pour conserver ces résidus à la surface. Les stratégies pour favoriser les couvertures de sols vivantes ou avec des résidus de culture sont listées ici :

Stratégies pour favoriser la couverture des sols	Niveau de maturité
Implantation de cultures de couverture en culture intercalaire	9
Implantation de cultures de couverture à la dérobée (en fin de saison)	9
Implantation de cultures de couverture de pleine saison	9
Éviter le travail de sol à l'automne	9
Introduire les céréales d'automne dans la rotation	9
Laisser les pailles et les résidus de récolte au champ	9
...	

*Niveau de maturité variant de 1, le moins avancé à 9, déjà utilisé dans des conditions réelles

Diversifier les rotations en grandes cultures

La diversification des cultures est un des piliers de l'ACS (agriculture de conservation des sols). Au niveau agronomique, il existe de nombreux bénéfices liés à la diversification des cultures, en particulier pour le contrôle des ravageurs. Cependant, son impact sur la santé des sols est moins clair, en particulier dans le cas des systèmes de grandes cultures strictement annuelles. La plupart des études sur cette question ont été menées en parcelles expérimentales (e.g. Amogoh et al., 2020 et 2021). Il existe peu d'études réalisées chez les producteurs en conditions réelles de production. Dans une étude menée au Missouri sur plus de 5000 champs en conditions vraie vie (real-world dans le texte), Veum et al. (2022) ont montré que la diversification des cultures annuelles favorisait la santé des sols, mais seulement dans les cas où plus de deux cultures étaient présentes dans la rotation. Cet effet positif des rotations diversifiées était visible pour la teneur en M.O., l'azote potentiellement minéralisable et la stabilité des agrégats, trois indicateurs importants de la santé des sols également mesurés dans l'EESSAQ. La fréquence de certaines cultures dans la rotation peut exercer certaines pressions sur les sols et contribuer à leur dégradation. Par exemple, l'Inventaire de 1990 a mis en lumière que les monocultures de maïs, de céréales et de pommes de terre conduisent à plusieurs problèmes de dégradation dont la détérioration de la structure, la surfertilisation et la perte de matière organique (Tabi et al., 1990). L'étude de Agomoh et al. (2021), réalisée en parcelles expérimentales de longue durée en Ontario, a aussi démontré que la fréquence de la culture de soya dans la rotation avait un effet négatif non seulement sur les indicateurs de santé des sols reliés à la matière organique, mais aussi sur le rendement du soya lui-même.

Les données de l'EESSAQ ont permis de comparer divers systèmes de cultures intégrant ou non des cultures pérennes, annuelles et maraîchères. L'effet bénéfique de la présence de cultures pérennes dans la rotation sur les indicateurs de santé de sols a clairement été démontré par rapport aux cultures annuelles et aux cultures maraîchères. L'analyse devrait être poussée plus loin pour vérifier les effets de la diversité des cultures annuelles ou de la fréquence de certaines cultures comme le soya ou le maïs dans la rotation. Ces analyses n'ont pas été réalisées, mais le nombre d'observations (< 350 champs) limite aussi les possibilités d'interpréter les résultats en considération de la variabilité des conditions pédoclimatiques existante à l'échelle du Québec.

Parmi les facteurs qui ont un impact sur la diversification des rotations en grandes cultures, les filières en production animale et celles des cultures destinées à la consommation humaine ont certainement un grand rôle à jouer sur la demande pour ces cultures et leur diversité. Pour augmenter la diversité des cultures annuelles en remplacement du soya et du maïs dans la rotation par exemple, il faudrait pouvoir miser sur des cultures aussi attrayantes au niveau rentabilité, et pour des questions opérationnelles ou de productivité, faire valoir quels avantages les producteurs peuvent retirer de diversifier les cultures dans leur rotation. Si peu de cultures alternatives ont réussi à prendre de l'expansion dans les régions à forte production de maïs et de soya, il n'a pas encore été suffisamment démontré que certaines cultures peuvent générer des profits, améliorer et protéger les sols et s'inscrire dans le cadre opérationnel de l'exploitation.

La promotion de céréales d'automne dans la rotation est une avenue très intéressante à plusieurs points de vue. Elle peut être implantée à la volée dans le couvert de soya sans travail de sol additionnel ou tout de suite après la récolte du soya, protégeant le sol avec le couvert de la céréale. Au printemps suivant, la céréale couvre le sol mais il est toujours possible d'y planter une culture intercalaire de trèfles produisant une 2^e culture de couverture à l'automne et un apport d'azote à la culture subséquente de maïs. Ce système de culture a été adopté en Ontario depuis plusieurs années. Agomoh et al. (2021) ont attribué l'effet bénéfique de la diversification des cultures à la présence dans la rotation du blé d'hiver par son effet positif sur les apports de carbone au sol.

Le seigle hybride comme céréale d'automne présente un intérêt particulier en termes de productivité et de quantité de biomasse retournée au sol (Gélinas et Ruel, 2016; Allard et Gasser, 2022). Le principal enjeu demeure la mise en marché et le développement de la filière. L'adaptation du canola d'hiver aux conditions climatiques du Québec présente également un intérêt pour la possibilité de couvrir le sol durant l'hiver. Toutefois, les variétés actuelles nécessitent un semis hâtif au mois d'août, soit seulement possible après une céréale d'automne.

La diversification des cultures peut passer par l'angle de la rentabilité des cultures et dépendre des marchés, ou par la démonstration des effets bénéfiques au niveau des sols et de la productivité ou des améliorations au niveau opérationnelle de la conduite des cultures.

Stratégies pour favoriser la diversification des cultures dans la rotation	Niveau de maturité
Rétribuer les producteurs pour diversifier les cultures (mesure du PAD via la FADQ)	9
Développer les filières pour des cultures d'automne ou à saison plus courtes	9
Développer les filières pour des cultures à hautes valeurs commerciales	8
...	

*Niveau de maturité variant de 1, le moins avancé à 9, déjà utilisé dans des conditions réelles

Favoriser une gestion intégrée des fumiers de ferme

Les fumiers de ferme constituent une ressource importante d'éléments nutritifs et de carbone à valoriser dans les systèmes de culture au Québec. Leur apport au sol favorise généralement l'amélioration des teneurs en matière organique (Maillard et al, 2016; Liang et al., 2021) et en N (D'Amours et al., 2021), en S et autres éléments essentiels à la croissance des plantes, mais aussi l'accumulation de certains éléments en excès comme le P (Zheng et al., 2001) et des éléments traces métalliques (Zn, Cu) (Giroux et al., 2005).

L'amélioration de la matière organique (M.O.) conduit au maintien général de la santé des sols à travers son effet sur la stabilité structurale et la porosité des sols. L'analyse multivariée (Rapport 2 de l'EESSAQ) montre clairement les liens forts entre M.O. et DMP. De même, les apports de N et de P contribuent à la fertilité des sols et à la nutrition des cultures, et sont donc un facteur important du maintien de la santé des sols au regard de son importance sur la production des cultures. Un effet de l'apport de fumier (en particulier les lisiers) peut parfois être observé en profondeur (Samson et al., 2021) mais pas toujours (Maillard et al., 2016).

Les apports excessifs d'effluents d'élevage et une gestion déficiente des méthodes d'apport peuvent avoir des effets négatifs sur l'environnement et la santé des sols. Des accumulations excessives de P et N conduisent à une augmentation des risques de pertes environnementales dans l'eau (pour P et N) ou l'air (pour N) (CRAAQ, 2010). Le Règlement sur les exploitations agricoles (Q-2, r. 26) (REA) oblige, au moyen du bilan de phosphore, à ce qu'un équilibre soit atteint entre les apports de phosphore et la capacité maximale de dépôt sur les sols. Depuis son implantation complète, la très grande majorité des exploitations agricoles possèdent un bilan à l'équilibre (MELCC, 2020). L'indice de saturation des sols en phosphore (ISP) définit des seuils environnementaux au-delà desquels le risque de contamination des eaux de surface en P est accru. Au-delà de ces valeurs critiques, les recommandations en phosphore ne devraient pas dépasser les exportations par les récoltes (CRAAQ, 2010). Plusieurs groupes de séries de sols suivis dans le cadre de l'EESSAQ (Rapport 1) présentent en moyenne des niveaux de saturation en P supérieurs à la valeur critique agroenvironnementale au-delà de laquelle les apports en P ne devraient pas dépasser les exportations de P liés à la récolte des cultures. Il s'agit des sols argileux du groupe 1 (séries Sainte-Rosalie et Saint-Urbain), des sols loameux du groupe 5 (séries Chaloupe, Saint-Aimé, Des Saults et Le Bras), des sols sableux à squelettiques des groupes 6, 11 et 14 (séries Aston, Saint-Damase, Saint-Nicolas, Saint-André, Orléans, Saint-Jude et Uplands) et des tills du groupe 8-B (séries Sainte-Brigide et Raimbault). L'écart d'ISP entre les sols cultivés et les sols témoins, de même que les ISP atteints dans l'horizon B démontrent d'autres formes d'enrichissement en P atteints, plus fréquents dans les matériaux sableux à squelettiques et les tills.

Les apports répétés d'effluents d'élevage contribuent aussi à l'accumulation d'autres éléments dans le sol comme le Cu et Zn (Giroux et al., 2005). Par rapport aux sols ne recevant que des apports occasionnels ou aucun amendement organique, ceux recevant des apports fréquents, soit plus d'une fois par année, ont des teneurs plus élevées en P, Cu et Zn dans les trois horizons (Rapport 2 de l'EESSAQ). Les groupes de sols en régions plus méridionales allant jusqu'en Estrie et Chaudière-Appalaches présentent plus fréquemment des teneurs élevées en P, Cu, Zn reliées à des apports plus fréquents dans ces régions où les productions animales se concentrent, mais les niveaux d'enrichissements de ces différents éléments varient en fonction des types de sols ou des matériaux (Rapport 1 de l'EESSAQ). Ainsi le P et Zn extraits en solution Mehlich-3 s'accumulent davantage dans les sols sableux et les tills, tandis que le Cu Mehlich-3 s'accumulent davantage dans les sols argileux.

Par ailleurs, l'application de fumiers au champ doit être effectuée avec la machinerie appropriée et dans des conditions qui évitent la compaction et la dégradation physique des sols. Ceci est particulièrement critique pour

la gestion des engrais de ferme au printemps ou tard à l'automne lorsque les sols sont saturés en eau et plus sensibles à la compaction. Les apports fréquents d'amendements organiques ont augmenté les teneurs en N minéralisable, P, Cu et Zn, mais n'ont pas augmenté la masse volumique apparente ni diminué la macroporosité des sols. D'autres facteurs de risque de compaction, comme la grosseur du parc de machinerie et les cultures plus tardives comme le maïs et le soya semblent avoir davantage d'effets sur la compaction des sols.

Les stratégies à mettre en place pour mieux gérer les amendements organiques sont multiples et plusieurs solutions s'offrent à différentes étapes dans la chaîne de production et de valorisation, en partant des réductions à la source au niveau de la nutrition animale jusqu'au développement de rampes d'épandage et d'outil d'incorporation pour limiter les émissions d'ammoniac et accroître la valeur fertilisante en azote de ces amendements. Il existe aussi une panoplie de solutions intermédiaires visant le traitement et la séparation des éléments fertilisants à la source en vue de gérer ces derniers en fonction des besoins de la plante et de la fertilité des sols. Si dans certaines régions, les niveaux de P et autres éléments atteints dans les sols posent toujours des problèmes pour la qualité de l'eau ou des sols, les stratégies devraient viser à exporter une certaine partie de ces éléments en excès dans le milieu.

Stratégies pour mieux gérer les amendements organiques	Niveau de maturité
Améliorer la nutrition animale pour réduire les excès de nutriments dans les rejets animaux	7
Capter ou réduire les émissions de NH ₃ au bâtiment pour augmenter la valeur en fertilisante en N des engrais organiques	5
Traiter les engrais organiques à la source pour mieux gérer les différents constituants en fonction des besoins des cultures	8
Augmenter les capacités d'entreposage pour faciliter l'épandage dans des conditions plus idéales au champ pour les sols et les cultures	8
Favoriser et développer les technologies pour incorporer au sol les engrais organiques plus chargés en N au moment où les plantes en ont besoin	5
Favoriser l'épandage des lisiers par irrigation et incorporation simultanée au sol	8
Sensibiliser les producteurs à la compaction des sols engendrée par les équipements d'épandage pour circuler avec des équipements moins dommageables	9
...	

*Niveau de maturité variant de 1, le moins avancé à 9, déjà utilisé dans des conditions réelles

Éviter sinon réduire ou optimiser l'usage des intrants de synthèse.

L'effet de l'usage des intrants de synthèse (engrais minéraux, pesticides, etc.) sur la santé des sols de même que tous les produits de synthèses (antibiotiques, contaminants d'intérêt émergent, etc.) qui se retrouvent épandus dans les champs n'a pas été étudié en détail dans l'EESSAQ. Nous pouvons tout de même souligner l'importance de mettre en place des stratégies pour éviter sinon réduire ou optimiser l'usage des intrants de synthèse, par mesure de précaution.

Stratégies pour éviter sinon réduire l'usage des intrants de synthèse	Niveau de maturité
Encourager et favoriser les principes de lutte intégrée, fertilisation raisonnée, etc.	9
Encourager et favoriser les grands mouvements prônant la réduction ou l'évitement de l'usage des intrants de synthèse comme l'agriculture biologique ou l'agriculture raisonnée.	9
Améliorer l'hygiène et la conduite des élevages pour réduire l'usage des facteurs de croissance, antibiotiques, etc.	8
Encourager la diversification des cultures en incluant des espèces fourragères pérennes dans la rotation pour un meilleur contrôle des adventices et certains ravageurs et pour une meilleure résilience du système sol-plante en conditions de stress climatique.	8
Favoriser les espèces fourragères de légumineuses dans la rotation pour réduire la dépendance aux engrais azotés.	9
Favoriser les cultures, les variétés ou les systèmes de cultures nécessitant moins de pesticides.	6
...	

*Niveau de maturité variant de 1, le moins avancé à 9, déjà utilisé dans des conditions réelles

Défis à l'intégration des stratégies proposées

Plusieurs défis demeurent lorsqu'il s'agit d'intégrer certaines stratégies proposées. Une étude sur la synergie et l'antagonisme entre les pratiques bénéfiques a mis en lumière quelques-uns de ces défis (Martel et al., 2006). Lorsqu'il s'agit de travail réduit ou de semis direct par exemple, l'usage d'herbicides est pratiquement inévitable. Le recours aux technologies liées aux OGM pour mieux contrôler les mauvaises herbes en post levée des cultures génétiquement modifiées par exemple est d'ailleurs apparu dans ce contexte, rendant le semis direct des cultures pratiquement dépendant de ces technologies. Le travail réduit, le semis direct et l'usage des cultures de couverture peut aussi être conflictuel avec les meilleures méthodes pour valoriser les engrais organiques et réduire les risques d'émissions de NH_3 et le ruissellement des éléments nutritifs à la surface du sol. Sans vouloir élaborer sur tous effets synergiques ou antagonistes des meilleures pratiques, il importe d'en être conscient et de développer les meilleures solutions pour réduire les effets antagonistes et profiter des effets synergiques.

CONCLUSION

Globalement, les résultats obtenus dans la cadre de l'EESSAQ confirment que la santé des sols est fortement influencée par l'usage des sols et les pratiques agricoles utilisées. L'effet bénéfique des pratiques de conservation telles que le travail réduit (ou semis direct) et la couverture de sols, déjà observés en conditions de parcelles expérimentales, est bien mis en évidence dans l'ensemble du Québec dans les conditions réelles des exploitations agricoles. La présence de cultures pérennes dans la rotation améliore également la plupart des indicateurs de santé des sols, mais l'effet est confondant avec celui du climat puisqu'en régions plus méridionales les cultures annuelles sont prépondérantes.

Il apparaît évident que la teneur en M.O. de l'horizon de surface est un facteur clé du maintien de la santé des sols, ce facteur étant fortement lié à la plupart des autres indicateurs de la santé des sols. La dégradation des propriétés physiques est un autre enjeu à considérer. Elle se traduit sous plusieurs formes comme la dégradation de la structure, la compaction et la diminution de la porosité, la dégradation des propriétés dynamiques régulant les échanges d'air et les mouvements de l'eau, et finalement l'érosion des sols. Plusieurs pratiques agricoles influencent ces propriétés physiques et les plus importantes sont celles qui bouleversent intensivement le sol et qui le compactent, sans retourner ou maintenir la matière organique dans le sol. L'accumulation d'éléments nutritifs et la contamination des sols par des métaux lourds et aux autres contaminants d'intérêt émergent est aussi une préoccupation à avoir en tête pour maintenir les sols en santé. Traditionnellement, les sols ont été perçus comme des milieux filtrants capables de dégrader la matière organique et de recycler les effluents et autres matières exogènes apportées aux sols, mais cette vision doit être revue en considérant les problématiques soulevées ces dernières décennies avec des contaminants de diverses natures, dont certains sont même qualifiés d'éternel.

Nonobstant ces nouvelles problématiques, nous avons réunis dans sept domaines d'interventions les pratiques à mettre en place favorisant le maintien ou l'augmentation de la M.O., le maintien ou l'amélioration des propriétés physiques et une meilleure gestion des engrais pour éviter les accumulations d'éléments nutritifs dans le sol. La plupart des pratiques bénéfiques (travail réduit, apports de matière organique, couverture du sol, diversification des cultures, réduction de la compaction, fertilisation raisonnée, etc.) sont généralement bien connues, mais il existe des freins à leur adoption liés aux conditions pédoclimatiques ou socio-économiques. Il est donc essentiel que la recherche agronomique offre aux gestionnaires des politiques agricoles des solutions aux producteurs pour adapter et favoriser l'adoption de ces différentes pratiques aux conditions locales de sol et de climat, en tenant compte du contexte social. C'est particulièrement critique dans le contexte pédoclimatique québécois où la saison de croissance est limitée et les sols présentent des conditions relativement variables en termes de texture, de drainage et de fertilité naturelle.

RÉFÉRENCES

- Agomoh, I.V., Drury, C.F., Phillips, L.A., Reynolds, W.D. et Yang, X. 2020. Increasing crop diversity in wheat rotations increases yields but decreases soil health. *Soil Science Society of America Journal*, 84: 170-181.
- Agomoh, I.V., Drury, C.F., Yang, X., Phillips, L.A. et Reynolds, W.D. 2021. Crop rotation enhances soybean yields and soil health indicators. *Soil Science Society of America Journal*, 85: 1185-1195.
- Allard, F. et Gasser, M.O. 2022. Impact des céréales d'automne sur la rentabilité, l'amélioration de la santé du sol et la réduction de l'usage des pesticides par rapport aux céréales de printemps. Rapport final. IRDA. 62 p. <https://www.agrireseau.net/grandescultures/documents/109486>.
- Angers, D.A., Ouimet, R., Roy-Léveillé, P. et Garneau, M. 2022. Priorities for Management and Protection of Québec Soils. *Geoderma Regional*, 29. doi:10.1016/j.geodrs.2022.e00523.
- Angers, D.A., Bissonnette, N., Légère, A. et Samson, N. 1993a. Microbial and biochemical changes induced by rotation and tillage in a soil under barley production. *Canadian Journal of Soil Science*, 73: 39-50.
- Angers, D.A., Samson, N. et Légère, A. 1993b. Early changes in water-stable aggregation induced by rotation and tillage in a soil under barley production. *Canadian Journal of Soil Science*, 73: 51-9.
- Angers, D.A. 1992. Changes in soil aggregation and organic carbon under corn and alfalfa. *Canadian Journal of Soil Science*, 56: 1244-9.
- Angers D.A., Bolinder, M.A., Carter, M.R., Gregorich, E.G., Drury, C.F., Liang, B.C., Voroney, R.P., Simard, R.R., Donald, R.G., Beyaer, R.P. et Martel, J. 1997. Impact of tillage practices on organic carbon and nitrogen storage in cool, humid soils of eastern Canada. *Soil Tillage Research*, 41 : 191-201.
- 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: 545-51.
- Bourgeois, B., Charles, A., Van Eerd, L.L., Tremblay, N., Lynch, D., Bourgeois, G., Bastien, M., Bélanger, V. Landry et A. Vanasse. A. 2021. Interactive effects between cover crop management and the environment modulate benefits to cash crop yields: a meta-analysis. *Canadian Journal of Plant Science*, 102: 656-678. <https://doi.org/10.1139/cjps-2021-0177>.
- Brauman, A. et Thaumazeau, A. 2020. Biofunctool (R) : un outil de terrain pour évaluer la santé des sols, basé sur la mesure de fonctions issues de l'activité des organismes du sol. *Étude et Gestion des sols*, 27 : 289-303. ISSN 1252-6851.
- D'Amours, E., Chantigny, M.H., Vanasse, A., Maillard, É., Lafond, J. et Angers, D.A. 2021. Combining perennial grass-legume forages and liquid dairy manure contributes to nitrogen accumulation in a clayey soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 101: 378-388.
- Elustondo, J., Angers, D.A., Laverdiere, M.R., N'dayegamiye, A. 1990. Étude comparative de l'agrégation et de la matière organique associée aux fractions granulométriques de sept sols sous culture de maïs ou en prairie. *Canadian Journal of Soil Science*, 70: 395-402.

- Gasser, M.-O., Biswas, A., Bernard, C., A., Martinelli, G., Easher, T.H. et Ondoa Z.A. 2022. Projection de l'évolution de la matière organique et de la santé des sols sous climat futur à l'échelle du Québec et de l'Ontario. Rapport final. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement. Québec. 65 p. + annexes.
- Gasser, M.-O., Bossé, C., Clément, C.C., Bernard, C., Mathieu, J.-B. et Tremblay, M.-E. 2023a. Rapport 1 de l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec : État de santé des principales séries de sols cultivées. Rapport final. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement. Québec. 186 pages.
- Gasser, M.O., Occean, N.R., Wu, M., Mathieu, J.-B., Clément, C.C., Chavez, E. 2023. Réponses des cultures aux engrais comme indicateur de santé des sols. Rapport final. IRDA. Mandat spécifique 2020-2023. Annexe 6.
- Gélinas, B. et Ruel, D. 2016. Le seigle hybride, des possibilités de développement pour les producteurs agricoles et les transformateurs. Rapport PADAR présenté au MAPAQ. 26 p. https://www.agrireseau.net/documents/Document_94372.pdf.
- Giroux, M., Chassé, R., Deschênes, L. et Côté, D. 2005. Étude sur les teneurs, la distribution et la mobilité du cuivre et du zinc dans un sol fertilisé à long terme avec des lisiers de porcs. *Agrosolutions*, 16: 23-32.
- Keller, T. et Or, D. 2022. Farm vehicles approaching weights of sauropods exceed safe mechanical limits for soil functioning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 119. 10.1073/pnas.2117699119.
- Lajoie, P.G. 1975. Les terres agricoles du Québec méridional: distribution, étendue et qualité. Agriculture Canada, Publ. No. 1556. 62 p.
- Liang, C., Hao, X., Schoenau, J., Ma, B., Zhang, T., MacDonald, J. D. et Angers, D.A. 2021. Manure-induced carbon retention measured from long-term field studies in Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 321 doi:10.1016/j.agee.2021.107619.
- Maillard, É., Angers, D.A., Chantigny, M., Lafond, J., Pageau, D., Rochette, P., Lévesque, G., Leclerc, M.-L. et Parent, L.-E. 2016. Greater accumulation of soil organic carbon after liquid dairy manure application under cereal-forage rotation than cereal monoculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 233:171-8.
- Martel, S., Seydoux, S., Michaud, A., Beaudin, I. 2006. Évaluation des effets combinés des principales pratiques de gestion bénéfiques (PGB) Revue de littérature et schéma décisionnel pour la mise en œuvre de PGB Document rédigé dans le cadre de l'Initiative nationale d'élaboration de normes agroenvironnementales. IRDA. 118 p. + Annexes.
- Martel, Y. A. et Deschenes, J. M. 1976. Les effets de la mise en culture et de la prairie prolongée sur le carbone, l'azote et la structure de quelques sols du Québec. *Canadian Journal of Soil Science*, 56: 373-383.
- Massicotte, D., Chouinard, P., Ménard, O. et Laverdière, M.R. 2000. Module 2. Impacts sur la couverture de résidus. Feuille 2E. Dans Guide des pratiques de conservation en grandes cultures. Entente auxiliaire Canada-Québec pour un environnement durable en agriculture, CPVQ, FPCCQ, MAPAQ, MENV, AAC. Québec. 8 p.
- Mehuys, G. 1986. Mesures de la compaction: aspects physique et économique. pp. 19-34. 13^e Colloque de génie rural. Université Laval. R. Thériault (Ed.). 220 p.
- Poirier, V., Angers, D.A., Rochette, P., Chantigny, M.H., Ziadi, N., Tremblay, G. et Fortin, J. 2009. Interactive effects of tillage and mineral fertilization on soil carbon profiles. *Soil Science Society of America Journal*, 73: 255-61.

- Samson, M.-E., Chantigny, M. H., Vanasse, A., Menasseri-Aubry, S., Royer, I. et Angers, D. A. 2021. Response of subsurface C and N stocks dominates the whole-soil profile response to agricultural management practices in a cool, humid climate. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 320. doi:10.1016/j.agee.2021.107590.
- Schjørring, P., Lamandé, M., Keller, T., Perdesen J. et Stettler, M. 2012. Rules of thumb for minimizing subsoil compaction. *Soil Use and Management*, 28. DOI :10.1111/j.1475-2743.2012.00411.x.
- Tabi M., Tardif, L., Carrier, P., Laflamme, G. et Rompré, M. 1990. Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec. Rapport Synthèse. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. Publication no 90-130156. 65 pages.
- Turmel, M.S., Speratti, A., Baudron, F., Verhulst, N. et Govaerts, B. 2015. Crop residue management and soil health: a systems analysis. *Agricultural Systems*, 134: 6–16.
- Wood, S.A., Bowman, M. 2021. Large-scale farmer-led experiment demonstrates positive impact of cover crops on multiple soil health indicators. *Nature Food*, 2: 97–103. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00222-y>.
- Zheng, Z., Simard, R. R., Lafond, J. et Parent, L. E. 2001. Changes in phosphorus fractions of a Humic Gleysol as influenced by cropping systems and nutrient sources. *Canadian Journal of Soil Science*, 81: 175-183. <https://doi.org/10.4141/S00-666>.