

Rapport 2 de l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec
Effets des pratiques agricoles et des conditions biophysiques
sur la santé des sols et la productivité des cultures



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

Co-auteurs : Chedzer-Clarc Clément, Ph. D.
Eduardo Chavez Benalcazar, B. Sc.
Jean-Benoît Mathieu, M. Sc.
Marie-Ève Tremblay, agr., M. Sc.
Catherine Bossé, agr. B. Sc.

Collaborateurs : Claude Bernard, Ph. D.,
Francis Allard, agr., M. Sc.
Nyck Rochel Occean, agr., M. Sc.
Myck Wu, Ph. D.
Lucie Grenon, agr., B. Sc.
Michèle Grenier, M. Sc.

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

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., Clément, C.C., Mathieu, J.-B., Chavez, E., Bossé C., Bernard, C., Tremblay, M.-E. 2023. Rapport 2 de l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec : Effets des pratiques agricoles et des conditions biophysiques sur la santé des sols et la productivité des cultures. Rapport final présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). IRDA. 54 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.

Équipe de rédaction du rapport

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

Chedzer-Clarc Clément, Ph. D.

Jean-Benoît Mathieu, M. Sc.

Eduardo Chavez Benalcazar, B. Sc.

Catherine Bossé, agr. B. Sc.

Claude Bernard, Ph. D.,

Marie-Ève Tremblay, agr., M. Sc.

Collaborateurs IRDA

Myck Wu, Ph. D.

Nyck Rochel Occean, agr., M. Sc.

Michèle Grenier, 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., IRDA

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

Ce deuxième rapport présente une analyse des effets des pratiques agricoles et des conditions biophysiques sur la santé des sols et une analyse des effets de la santé des sols et des conditions biophysiques sur la productivité des cultures. L'effet des pratiques agricoles sur la santé des sols a été analysé dans un premier temps par systèmes de culture ou différents indicateurs de pression des pratiques agricoles (intensité de travail de sol, fréquence d'apport en amendements organiques, indice de risque de compaction) en interaction avec les matériaux parentaux et à chaque profondeur. Ces effets ont été mesurés sur dix indicateurs de santé des sols : masse volumique apparente, macroporosité, stabilité structurale, pH, teneur en matière organique et potentiel de minéralisation de N et C, ainsi que teneurs en P, Cu, Zn Mehlich-3. La plupart des indicateurs de santé de sols sont significativement affectés par le type de sol (matériau parental) aux trois profondeurs, mais l'interaction entre le type de sol et les systèmes de culture ou les différents indicateurs de pression des pratiques agricoles est moins souvent significative et interprétable. Les systèmes en cultures annuelles et maraîchères, plus intensifs en termes de travail de sol et de pratiques agricoles en général par rapport aux systèmes non cultivés, en friche ou avec des cultures pérennes entraînent la compaction et la dégradation de la structure des sols ainsi qu'une diminution de la teneur en matière organique et son potentiel de minéralisation. L'intensité du travail de sol affecte plus particulièrement la condition physique et les propriétés liées à la matière organique de l'horizon Ap1 de surface, mais moins celles des horizons Ap2 et B. On note toutefois une augmentation des teneurs en P, Cu et Zn dans ces horizons en profondeur sous travail plus intensif. La teneur en matière organique dans l'horizon Ap1, la quantité d'azote minéralisable dans les horizons Ap1 et Ap2, ainsi que les teneurs en P, Cu et Zn dans les trois horizons Ap1, Ap2 et B augmentent significativement avec la fréquence d'apports en amendements organiques. Le niveau de risque de compaction a quant à lui des effets significatifs sur les dix indicateurs de santé des sols mesurés dans les trois horizons. La macroporosité et la stabilité structurale entre autres sont négativement affectées par le risque de compaction. Bref, les résultats de cette analyse démontrent l'avantage à adopter des pratiques de conservation telles que l'inclusion de cultures pérennes dans la rotation, la réduction de l'intensité de travail de sol et des risques de compaction, de même qu'une gestion raisonnée des apports en amendements organiques pour améliorer la plupart des indicateurs de santé des sols.

Dans un deuxième temps, l'effet des conditions biophysiques liées au climat et à la physiographie du terrain, ainsi que de huit indicateurs de pression des pratiques agricoles (intensité de travail de sol, risque de compaction, apports en P, Cu et Zn liés aux amendements organiques, fréquence d'utilisation de pesticides, indice de sol à nu et biodiversité des cultures) a été analysé en corrélations canoniques avec les indicateurs de santé des sols. Dans la première paire de composantes canoniques formée, une augmentation de l'intensité des pratiques agricoles et plus particulièrement celle de l'indice de sol à nu se traduit par une diminution de la teneur en matière organique dans le sol et sa capacité à minéraliser le carbone et l'azote. Plus les sols sont travaillés et laissés sans couverture, plus les teneurs en matière organique 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 aussi mesurés dans l'horizon B. L'accumulation de P, Zn et Cu dans les horizons de surface est causée principalement par les applications excessives d'amendements et engrais organiques (AEO). Le zinc s'accumule préférentiellement dans les sols sableux, alors que le cuivre est plus retenu par les complexes organo-minéraux des sols argileux. Les sols sous cultures annuelles ainsi que sous travail intensif sont significativement plus chargés en ces éléments que les sols sous prairies. Bien que cette analyse de l'effet de huit indicateurs de pression des pratiques agricoles sur les dix indicateurs de santé des sols aie produit des résultats corroborant la nécessité de continuer de promouvoir les

pratiques de conservation, une analyse plus fine permettrait de nuancer les constats par type de sol ou de matériaux parental et raffiner les recommandations en conséquence.

Finalement, des régressions conduites avec des forêts aléatoires ont été utilisées pour analyser l'effet des indicateurs de santé des sols et des conditions biophysiques sur la productivité des cultures. De façon générale et attendue, la productivité des cultures est plus fortement corrélée aux variables climatiques qu'à celles reliées à la santé des sols, comme la condition physique ou l'état de la matière organique et de la chimie-fertilité. Toutefois de plus fortes relations ont été trouvées avec l'état structural évalué au champ et l'érosion des sols. Des relations entre la productivité des différentes cultures et les teneurs en certains éléments comme Fe, Cu et Zn Mehlich-3 ont aussi été observées, mais ne sont pas toujours cohérentes ou attendues. Ces relations inattendues ou incohérentes peuvent provenir d'effets confondants entre les variables, des hasards occasionnés par le faible nombre d'observations ou le regroupement des observations ne tenant pas compte des types des sols. En conclusion, une telle analyse de la santé des sols sur la productivité nécessite un grand nombre d'observations sur des cultures spécifiques, alors que le protocole de l'EESQAQ devait couvrir tout type de sols sans égard aux cultures en place. L'inclusion dans l'analyse d'autres facteurs pouvant affecter la productivité, comme celles définissant les pratiques culturales, les pratiques de conservation des sols, les apports en engrais minéraux et en amendements organiques, etc. serait aussi à essayer. Des travaux supplémentaires seront nécessaires pour analyser et interpréter plus à fond ces relations.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	i
Table des matières	iii
Liste des tableaux	iv
Liste des figures	v
Contexte de l'étude	6
Objectifs.....	6
Présentation des résultats en cinq rapports	6
Effet des conditions biophysiques et des pratiques agricoles	7
Introduction.....	7
L'effet des conditions biophysiques sur la santé de sols.....	7
L'effet des pratiques agricoles sur la santé des sols.....	9
Matériel et Méthodes	13
Traitements statistiques.....	20
Résultats	22
Effets des matériaux parentaux sur la santé de sols.....	22
Effets des pratiques agricoles sur la santé de sols	23
Effet des conditions pédoclimatiques et de l'intensité des pratiques agricoles sur la santé des sols.....	30
Conclusion	37
Effet de la santé des sols sur la productivité des cultures	39
Introduction.....	39
Matériel et méthodes.....	39
Résultats et discussion	41
Interprétation et discussion	45
Conclusion de l'effet de la santé des sols sur la productivité des cultures.....	46
Références.....	47
Annexe A.....	52
Résultats des analyses de variance	52

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Catégorisation des systèmes de cultures.....	14
Tableau 2 : Cote d'intensité du travail de sol (STIR) extraits de RUSLE2 pour les opérations de l'EESSAQ.	15
Tableau 3 : Indices d'opération, de parc de machinerie et de période attribués pour le calcul de l'indicateur de risque de compaction.	17
Tableau 4 : Facteur C par culture en fonction de la cote d'intensité du travail de sol (STIR).	18
Tableau 5 : Charges en Cu et Zn des principaux amendement et engrais organiques (AEO) (CRAAQ, 2010).	19
Tableau 6 : Charges en P des principaux amendement et engrais organiques (AEO) (CRAAQ, 2020).....	19
Tableau 7 : Indice de biodiversité attribué aux types de cultures.....	20
Tableau 8 : Effets du matériau parental sur les indicateurs de santé des sols.	22
Tableau 9 : Effet du système de culture sur les indicateurs de santé des sols.	24
Tableau 10 : Effets de l'intensité du travail de sol sur les indicateurs de santé des sols.	26
Tableau 11 : Effets de la fréquence d'apports en amendements organiques sur les indicateurs de santé des sols.	27
Tableau 12 : Effet du risque de compaction sur les indicateurs de santé des sols.	28
Tableau 13 : Corrélations canoniques entre Y : l'état de santé des sols et; X : le contexte pédoclimatique et les indicateurs de pression agricole de l'horizon Ap1.....	31
Tableau 14 : Corrélations canoniques entre Y : l'état de santé des sols et; X : la texture, le climat, le modèle numérique de terrain et les indicateurs de pression agricole de l'horizon Ap2.....	34
Tableau 15: Corrélations canoniques entre Y : l'état de santé des sols et; X : la texture, le climat, le modèle numérique de terrain et les indicateurs de pression agricole de l'horizon B.....	36
Tableau 16 : Effet des variables pédoclimatiques et de la santé des sols sur la productivité des cultures.	41
Tableau 17 : Effets du système de cultures et du matériau parental sur les indicateurs de santé des sols.....	52
Tableau 18 : Effets de l'intensité du travail de sol et du matériau parental sur les indicateurs de santé des sols dans les systèmes en cultures annuelles.....	52
Tableau 19 : Effets de la fréquence d'apport d'amendements organiques et son interaction avec le système de culture et les matériaux parentaux sur les indicateurs de santé des sols.	53
Tableau 20 : Effet du risque de compaction et du matériau parental sur les indicateurs de santé des sols.....	53

LISTE DES FIGURES

Figure 1 :	Moyenne des degrés-jours (base de 0°C) du 1 ^{er} avril au 31 octobre (1979-2008) (a) et cumul moyen des précipitations moins l'évapotranspiration potentielle du 1 ^{er} mai au 31 octobre (1974-2003) (b) (Agrométéo, 2023).....	7
Figure 2 :	Teneur en M.O. (a) et ratio de cultures pérennes (b) en moyenne par municipalité (Gasser et al., 2022).	8
Figure 3 :	Variables corrélées à moins de -0,3 ou plus de 0,3 à la première corrélation canonique de l'horizon Ap1.	30
Figure 4 :	Importance et comportement des cinq plus importantes variables exprimant le rendement des neuf cultures à partir des conditions climatiques et des propriétés de sol de l'horizon Ap1.	43
Figure 5 :	Importance et comportement des cinq plus importantes variables exprimant le rendement du maïs-grain à partir des conditions climatiques et des propriétés de sol de l'horizon B.....	44

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 défichées (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 ¹³⁷Cs

EFFET DES CONDITIONS BIOPHYSIQUES ET DES PRATIQUES AGRICOLES

Introduction

L'effet des conditions biophysiques sur la santé de sols

Le Québec présente à l'échelle de ses régions agricoles un important gradient climatique ainsi que des sols contrastants en termes de dépôt meuble, de texture, de conditions de drainage, de terrain et de genèse. L'effet des pratiques agricoles sur la santé des sols et leur productivité est donc très fortement influencée par ces conditions pédoclimatiques contrastantes qui à leur tour influence le choix des cultures et des pratiques. Les conditions socio-économiques régionales et leur historique conditionnent également l'ensemble des activités agricoles, dont les élevages, les cultures et les pratiques agricoles qui en découlent.

Au niveau climatique, on observe un gradient de température plus prononcé dans un axe nord-sud et à la diagonale en longeant la vallée du Saint-Laurent, avec la Montérégie et la plaine de Montréal ayant les températures moyennes les plus élevées, alors que les régions périphériques, tel que l'Abitibi, le nord du Saguenay-Lac-Saint-Jean et la Gaspésie ont un climat plus froid (Figure 1a). Au niveau des précipitations, la variation se trouve dans un axe est-ouest, les régions les plus à l'est étant caractérisées par un bilan hydrique plus élevé que les régions de l'ouest de la province (Figure 1b).

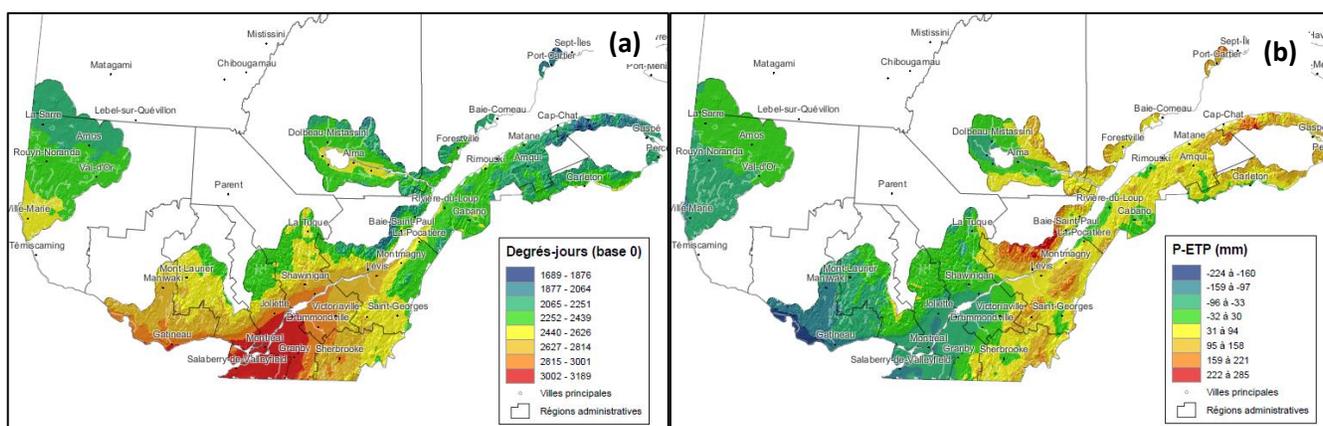


Figure 1 : Moyenne des degrés-jours (base de 0°C) du 1^{er} avril au 31 octobre (1979-2008) (a) et cumul moyen des précipitations moins l'évapotranspiration potentielle du 1^{er} mai au 31 octobre (1974-2003) (b) (Agrométéo, 2023).

Ces variations climatiques affectent les niveaux de base des indicateurs de santé des sols, et plus particulièrement les teneurs en matière organique et ses fonctionnalités. La productivité primaire des plantes et le retour au sol en résidus organiques sont potentiellement plus élevés en climat plus chaud, dépendant des cultures. Mais les températures plus élevées accélèrent le processus de minéralisation du carbone organique par une augmentation de la respiration microbienne, résultant en une plus faible accumulation dans les sols, alors que les processus microbiologiques sont plus lents sous climats froids, ce qui engendre une accumulation plus importante en M.O. (Smith et al., 2009). Tous les indicateurs de santé des sols liés à la matière organique (C actif, CO₂ dégagé, N potentiellement minéralisable, présence d'agrégats, DMP) sont influencés de manière proportionnelle par ces conditions climatiques. Comme en témoigne la Figure 2, les taux de M.O. des sols de surface du Québec sont

fortement influencés par ces gradients climatiques régis à la fois par la latitude et l'altitude, mais aussi selon les différents types de sols et leur mode de développement.

Le climat est tout de même le paramètre biophysique qui influence le plus directement le choix des cultures, et par le fait même les indicateurs de la santé des sols. Comme l'ont démontré les travaux de Gasser et al.(2022), il existe une forte corrélation spatiale entre les teneurs en M.O. et le ratio de plantes pérennes, relation qu'on peut observer aux Figure 2a et Figure 2b, les cultures annuelles se concentrant principalement dans les régions méridionales de la plaine du Saint-Laurent. Les climats plus chauds sont effectivement plus propices au développement des cultures annuelles que les climats froids. Cette corrélation spatiale entre la M.O. et le ratio de prairies concorde avec la littérature sur le sujet, les cultures pérennes permettant de plus grandes accumulations de carbone organique dans les sols que les cultures annuelles, en lien avec leur racines persistantes plus profondes et le retour en carbone des exsudats racinaires (Carter & Gregorich, 2010; Fan et al., 2019).

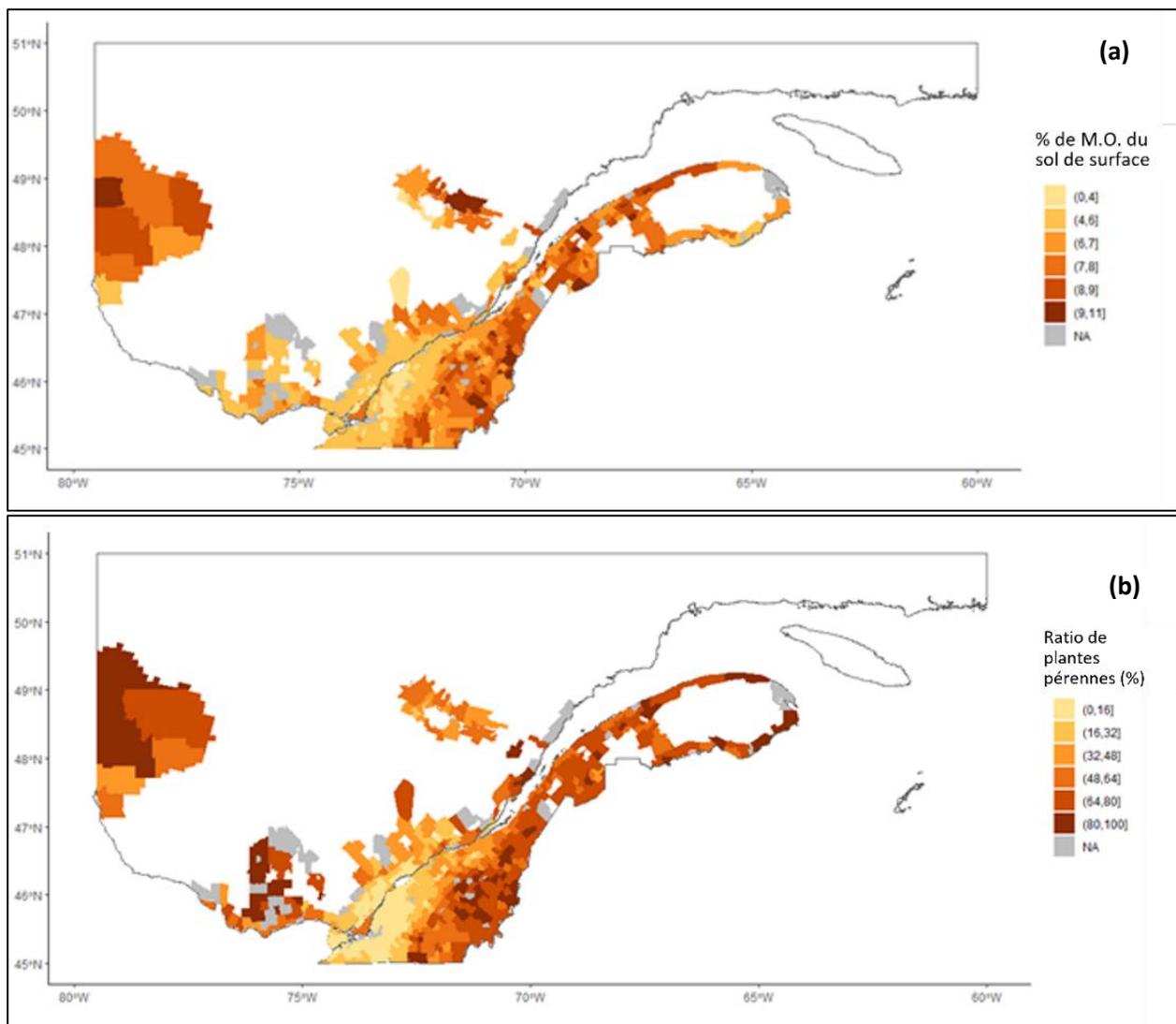


Figure 2 : Teneur en M.O. (a) et ratio de cultures pérennes (b) en moyenne par municipalité (Gasser et al., 2022).

Outre ces variations climatiques, les sols présentent également de fortes variations conditionnées par le type de dépôt meuble, la topographie (altitude, pente, exposition au soleil, etc.), la granulométrie du matériau, les conditions de drainage, la genèse, etc. Ces facteurs sont parfois intrinsèquement reliés, les sols argileux se retrouvant plus souvent en bas de pente dans la plaine, alors que des sols plus grossiers se retrouvent dans les endroits au relief plus accidenté. Cette composante granulométrique et texturale exerce une influence sur les indicateurs de santé des sols, notamment sur la stabilisation de la matière organique et la chimie-fertilité naturelle des sols. Les sols argileux sont naturellement mieux pourvus en éléments fertilisants liés à une capacité d'échange cationique plus élevée, tandis que les sols plus grossiers sont souvent plus acides et naturellement moins bien pourvus en éléments fertilisants. La composante texturale est aussi un déterminant majeur de la teneur en M.O., puisque l'argile et le limon stabilisent le carbone par la formation de complexes organo-minéraux (Matus, 2021; Veum et al., 2022).

Il est donc nécessaire, dans l'analyse de l'effet des pratiques agricoles sur les indicateurs de santé des sols, de distinguer les boucles de rétroactions climat – choix des cultures – santé des sols, ou encore topographie – texture – choix des cultures – santé des sols, de l'effet direct des pratiques agricoles sur les sols.

L'effet des pratiques agricoles sur la santé des sols

L'état de santé des sols est intimement lié aux pratiques agricoles. Par exemple, il est largement reconnu que l'intensité du travail de sol, le choix des cultures dans la rotation et les apports en amendements organiques ont un effet sur la teneur en matière organique du sol et que l'intensité du travail de sol et la couverture du sol ont une incidence sur l'érosion de sols. Plus récemment, on s'est intéressé à l'effet de la diversité des cultures, des cultures intercalaires et des prairies intercalaires en particulier sur le microbiome et la santé biologique des sols (Yang et al., 2020). Bien des travaux sur l'effet de ces pratiques agricoles ont été réalisés en conditions expérimentales contrôlées, mais des connaissances ont aussi été acquises à l'échelle des entreprises agricoles en évaluant l'effet de certains indicateurs de pression des pratiques agricoles sur des indicateurs de santé des sols (Williams et al., 2020; Nunes et al., 2020a; Nunes et al., 2020c; Telles et al., 2020).

Williams et al. (2020) ont évalué le lien entre la santé de sols de surface mesurée avec le *Comprehensive Assessment of Soil Health (CASH)* de vingt champs cultivés sous des régies diversifiées et un indice de la régie du sol composé d'indicateurs de la diversité des cultures (CDI), de la perturbation du sol (YSDI) et des apports en amendements et engrais organiques (AEO). Bien qu'une partie de la variance des indicateurs de santé des sols résultaient des indicateurs de pression des pratiques agricoles, l'inclusion de la proportion de sable dans le modèle en expliquait une autre part. Nunes et al. (2020c) ont évalué les effets de la profondeur du travail de sol (3 classes) et des systèmes de culture (6 classes) sur les teneurs en carbone des sols à l'échelle des États-Unis, mesurée avec le *Comprehensive Assessment of Soil Health (CASH)*. Ils ont aussi évalué ces pratiques avec des données de publications scientifiques pour comparer les tendances avec celles observées chez les producteurs. Bien que l'étude fasse ressortir l'importance des pratiques de conservation des sols pour augmenter la teneur en carbone organique des sols (COS), les auteurs soulignent la grande diversité des systèmes de cultures qui ne sont pas systématiquement distribués à travers les conditions pédoclimatiques des États-Unis, de même que l'effet de ces conditions pédoclimatiques sur la définition de niveaux de référence de COS pour des sols en santé. Par exemple, des teneurs plus élevées en COS ont été observées dans les sols argileux en climat froid et humide. Le même

constat est réalisé dans le Rapport 1 de l'EESSAQ; un gradient climatique semble conditionner la teneur en M.O. entre les différents groupes de séries de sols d'un même matériau.

Au Brésil, Nunes et al. (2020a) et Telles et al. (2020) ont évalué l'effet de l'adoption de pratiques de conservation des sols sur la santé des sols en quantifiant plusieurs indices liés à la diversité des cultures, la fréquence de travail du sol et la couverture du sol à l'aide d'un questionnaire faisant état des pratiques et des cultures des 3 années précédant la mesure de la santé des sols. Des relations ont été établies entre ces indicateurs de pression des pratiques et la santé des sols.

Effet de la diversité des cultures

À l'échelle des agroécosystèmes, une augmentation de la biodiversité des espèces végétales est liée à de nombreux services écosystémiques qui sont connus pour avoir des effets bénéfiques pour les cultures, notamment un meilleur contrôle des espèces nuisibles, une pollinisation accrue et un meilleur recyclage des éléments nutritifs par les organismes décomposeurs (Eisenhauer et al., 2019). Outre les services écosystémiques d'ordre général, une plus grande diversité des cultures dans la rotation, mesuré par l'indice de diversité des cultures, (CDI), a été identifiée comme étant un élément permettant d'augmenter la biomasse, la diversité et la structure des communautés microbiennes du sol, jouant un rôle par le fait même sur l'augmentation des taux de carbone organique et la quantité d'agrégats (Tiemann et al., 2015). Les systèmes de cultures à plantes pérennes sont d'ailleurs significativement plus riches en espèces végétales que les systèmes en monocultures, et avec cette diversité intrinsèque, contribuent significativement à améliorer ces fonctionnalités du sol (Bretagnolle et al., 2011; Werling et al., 2014).

Effet de l'intensité du travail du sol

Les pratiques culturales impliquant une diminution de l'intensité du travail du sol, notamment le travail réduit et le semis direct, ont été préconisées depuis quelques décennies pour limiter l'érosion et la détérioration de la structure, ainsi que limiter la décomposition de la M.O. du sol, entre autres. Selon la littérature, pour être considéré comme du travail réduit en conservation des sols, au moins 30 % des résidus de cultures devraient restés à la surface du sol après le semis, afin de diminuer l'exposition du sol à l'érosion et d'augmenter sa capacité à conserver l'humidité (Massicotte et al., 2000). Cependant, au cours des dernières années, cette pratique s'est fortement répandue dans le monde agricole en raison des économies de temps et de carburant qu'elle procure par rapport au labour à la charrue à versoir. La popularité du travail réduit a aussi été encouragée par le développement des plantes résistantes aux herbicides et le développement de nouveaux équipements aratoires toujours plus sophistiqués (Claassen et al., 2018). Cependant, les objectifs de protection du sol ont aussi évolué au cours des dernières années et visent désormais à couvrir le sol le plus souvent possible, avec des cultures diversifiées et des cultures de couverture, jumelées avec la diminution des perturbations du sol, dans un objectif de maintenir des racines vivantes dans le sol afin de favoriser l'activité biologique et le recyclage des nutriments. En conséquence, la caractérisation des pratiques de travail de sol en conservation devrait tenir compte à la fois de l'intensité du travail de sol et de la présence de résidus de cultures à la surface du sol.

Pour calculer une intensité de travail de sol dans un système ou une rotation donnée, la cote d'intensité du travail du sol (*Soil Tillage Intensity Rating*) emploie divers paramètres contenus dans la base de données RUSLE2 (Wall et al., 2002). Cette cote permet de donner un meilleur estimé de l'intensité des perturbations du sol en comparaison à la proportion des résidus laissés en surface puisqu'il prend en compte la vitesse d'opération, la profondeur de

travail, le type de labour, la proportion du sol dérangé, l'enterrement des résidus et les fractions ramenées en surface pour cinq classes de résidus, variant de résidus organiques fragiles à des fragments grossiers comme des roches.

Effet de l'application répétée d'amendements et engrais organiques (AEO)

Plusieurs études ont révélé que les apports en amendements et engrais organiques (AEO) jouent un rôle bénéfique sur la santé des sols, notamment en augmentant les teneurs en carbone organique et en améliorant la stabilité des agrégats (Williams et al., 2020). Or, les apports excessifs peuvent entraîner une surfertilisation des sols, qui peut à la fois diminuer les rendements des cultures et entraîner des conséquences environnementales non négligeables. Les sols du Québec étant généralement assez pauvres en phosphore, les teneurs élevées en P observées proviennent généralement des effluents d'élevage. D'autre part, le cuivre et le zinc ont été identifiés comme étant les éléments traces métalliques les plus présents dans les AEO, et surtout les plus susceptibles de s'accumuler dans les sols (Belon et al., 2012). Ces deux éléments réagissent toutefois différemment selon le type de sol récepteur, le zinc ayant tendance à se lier aux oxydes de fer tandis que le cuivre forme plus souvent des complexes avec la matière organique, rendant son accumulation dans les sols intimement relié aux taux de minéralisation du carbone organique (Tella et al., 2016).

Effet de la compaction du sol

La compaction est un problème de santé des sols d'envergure pouvant avoir de lourdes répercussions sur la productivité des cultures (Duiker, 2004). Ce phénomène avait déjà été identifié comme problématique lors de l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols effectué par Tabi et al. (1990) pour les sols argileux et loameux. Le Rapport 1 de l'EESSAQ a d'ailleurs mis en évidence un niveau de compaction des sols cultivés significativement plus élevé en profondeur dans l'horizon B pour les sols sableux et squelettiques, et significativement plus élevé aussi dans l'horizon Ap2 des sols argileux et loameux dans les régions plus méridionales du Québec caractérisées par une plus grande occurrence de cultures annuelles. L'augmentation de la grosseur du parc de machinerie agricole ainsi que la fréquence des passages au champ sont les facteurs ayant le plus d'influence sur l'augmentation de la compaction des sols cultivés (Ungureanu et al., 2017, Håkansson et Reeder, 1994).

Dans un sol compact, l'espace poral est réduit, occasionnant des limitations dans le développement racinaire des cultures et des problèmes de drainage. Cette perte d'espace poral inhibe la circulation de l'eau et de l'air, entraînant une baisse des teneurs en oxygène, entraînant des conséquences directes sur la croissance des plantes et le recyclage des éléments nutritifs par les microorganismes du sol (Ziyadeh et Roshani, 2012). La compaction peut être engendrée à la fois par la circulation de la machinerie ou par le piétinement des animaux en pâturage. Les sols à haute teneur en argile présentent un degré de sensibilité plus élevé, mais le Rapport 1 de l'EESSAQ a mis en évidence le fait que les sols sableux sont aussi à risque de compaction en profondeur. Le travail du sol dans des conditions d'humidité optimales, la limitation du poids à la roue, la réduction du nombre de passages par la machinerie et le trafic contrôlé sont des éléments clés dans la réduction de la compaction des sols agricoles. La compaction profonde, à plus de 40 cm de profondeur, est engendrée par un poids excessif à la roue et la pression des pneus alors que la compaction des horizons de surface est davantage causée par le nombre de passages, la vitesse de la machinerie et la pression des pneus (Duiker, 2004; Håkansson et Reeder, 1994).

Ainsi, le poids à la roue est un des principaux facteurs à prendre en considération quant à l'impact de la compaction profonde. Les résultats qu'ont présenté Håkansson et Reeder (1994) dans une revue sur des essais réalisés dans

plusieurs pays nordiques permettent de traduire la déformation du sol en profondeur en fonction du poids à la roue des équipements. Ainsi, un poids à la roue de 3 tonnes métriques (Mg) engendrait de la compaction à 40 cm de profondeur et un poids de 5 Mg à la roue engendrait de la compaction à 50 cm. 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.

Environ 75 % de l'augmentation de la masse volumique du sol est réalisée par le premier passage de tracteur. Toutefois, l'addition du nombre de passage augmente les dommages causés au sol puisque la compaction est déjà à un niveau critique pour la croissance des plantes (Duiker, 2004). Il a été démontré qu'au-delà de dix passages, les avantages d'employer un tracteur plus léger étaient perdus (Ungureanu et al., 2017). L'emploi de voies de circulation réservées a cependant un impact majeur sur ce paramètre puisque les passages sont concentrés au même endroit plutôt que répartis aléatoirement dans le champ. Botta et al., 2009 présentent des équations déterminant l'augmentation de la densité du sol en fonction du nombre de passage pour des sols cultivés de manière conventionnelle et en semis direct pour un tracteur de 6 Mg à l'essieu et un de 4 Mg à l'essieu. Les auteurs ont observé que 5 et 10 passages du tracteur de 4 Mg à l'essieu engendraient respectivement la même compaction que 1,5 et 3 passages du tracteur de 6 Mg à l'essieu.

L'objectif de cette partie de l'étude consiste à évaluer comment les différents indicateurs de pression des pratiques agricoles affectent une sélection d'indicateurs de la santé des sols tout en considérant la diversité des conditions pédoclimatiques prévalant à l'échelle du Québec.

Matériel et Méthodes

Cette section décrit la méthodologie utilisée pour catégoriser les systèmes de culture et quantifier les pratiques agricoles en termes d'indicateurs de pression ainsi que pour qualifier les conditions pédoclimatiques. Les méthodes de calcul des différents indicateurs sont détaillées, tout comme les différents traitements statistiques réalisés pour déterminer le niveau d'influence de ces variables sur la santé des sols. L'analyse est réalisée en deux étapes : 1) Une analyse de variance de l'effet des systèmes de cultures et des pratiques agricoles catégorisées sur la santé des sols; 2) Une analyse exploratoire avec des variables continues traduisant l'effet des conditions biophysiques et des indicateurs de pression des pratiques agricoles sur la santé des sols.

Les systèmes de cultures et les indicateurs de pressions des pratiques agricoles ont été définis ou calculés à partir des informations recueillies dans l'enquête menée auprès des producteurs portant sur les cultures et les pratiques agricoles déployées sur le site durant les cinq années précédant l'échantillonnage des sols en 2018 ou 2019. Les informations demandées lors de l'enquête sur les champs cultivés concernaient l'historique du champ en termes d'aménagements et de perception des problématiques, l'historiques des pratiques agricoles (successions des cultures et engrais verts, travail de sol, fertilisation minérale et organique, phytoprotection, rendements historiques, etc.), de même que des informations sur la machinerie utilisée dans le champ. Comme l'information sur les cultures et les pratiques agricoles sont identiques pour les quatre points d'échantillonnage (PE), l'analyse des résultats a été réalisée sur les valeurs moyennes issues de chaque site.

Catégorisation des systèmes de culture

Les types de cultures ou de plantes présentes sur l'ensemble des sites de l'EESQAQ varient de plantes herbacées ou arbustives sur les sites témoins à des cultures intensives en systèmes maraîchers ou de monoculture de maïs en passant par des systèmes de cultures diversifiées incluant ou non des prairies. En fonction du type de cultures présentes sur le site durant les cinq années précédant l'échantillonnage, six grands systèmes de cultures ont été définis : les friches et pelouses, les systèmes à dominance de cultures pérennes, les systèmes en grandes cultures, les cultures annuelles associés aux cultures pérennes, les cultures maraîchères et les sites non cultivés (Tableau 1).

Tableau 1 : Catégorisation des systèmes de cultures.

Systèmes de culture	Définition	Nombre de sites
Non-cultivés		
Contours de champs herbacés	Bandes riveraines, bords de champs et bords de clôtures	26
Haies brise-vent	Haies brise-vent	26
Boisés et plantations	Parcelle non-cultivées où dominant des espèces arbustives ou sous couvert arboré (Boisé, Plantation)	16
Friches et pelouses		
Friches, pelouses, jachères	Parcelles non-cultivées où domine les plantes de types herbacées	31
Systèmes à dominance de cultures pérennes		
Vergers/vignes	Sites en vergers ou vignes	6
Prairies/pâturages en rotations longues ou permanentes	Prairies de graminées ou pâturages sur plus de quatre années.	51
Praires en rotation moyenne	Site comptant au moins trois des cinq dernières années en prairie, pouvant inclure une à deux années en céréales.	51
Cultures annuelles associées aux cultures pérennes		
Grandes cultures associées aux cultures pérennes	Grandes cultures associées à une prairie sur une période de cinq ans.	34
Systèmes en grandes cultures annuelles		
Grandes cultures diversifiées	Grandes cultures multiples (maïs, soya, céréales, lin, canola, pomme de terre ou autre culture maraîchère).	17
Maïs/Soya/Céréales	Rotation ne comprenant que des cultures de maïs, soya ou céréale.	49
Maïs/Soya	Rotation maïs-soya sans autre culture.	44
Monoculture de maïs	Plus de quatre années en culture de maïs.	23
Cultures maraîchères		
Maraîcher pur	Quatre ou cinq années en production maraîchère ou de pomme de terre.	15
Maraîcher en rotation	Deux ou trois années en production maraîchère ou de pomme de terre, en rotation avec une grande culture.	11

Intensité de travail du sol (Soil tillage intensity rating, STIR)

Trois intensités de travail du sol (réduit, modéré et intensif) ont été définis en fonction de la cote d'intensité du travail de sol (*STIR*) calculée avec l'équation prévue dans le modèle RUSLE2 et en utilisant les données de l'enquête menée auprès des producteurs (Wall et al., 2002). Les paramètres pris en compte dans le calcul comprennent, entre autres, la vitesse opérationnelle de l'équipement de travail du sol, la profondeur de travail de sol, le type de labour et le pourcentage de la surface du sol perturbé.

Pour chaque opération, le *STIR* est calculé en multipliant ces paramètres et en leur affectant un poids :

$$STIR = 0,5 \text{ Vitesse d'opération} \times 3,25 \text{ Type de travail} \times 1,0 \text{ Profondeur} \times 1,0 \text{ Surface dérangée}$$

Où : La vitesse d'opération est la vitesse moyenne recommandée par le fabricant;

Le type de travail de sol fait référence au type d'outil (disque, dents, etc.) et au niveau de perturbation du sol qu'il engendre (1,0 : retournement avec léger mélange; 0,8 : mélange avec léger retournement; 0,4 soulèvement et fracturation; 0,7 mélange seulement; 0,15 compression);

La profondeur moyenne considérée est celle recommandée par le fabricant;

La proportion de la surface de sol dérangée accorde une valeur de 100 % pour les appareils travaillant toute la surface (charrue, herse, ...) et 10% pour les semoirs à semis direct travaillant une bande de 30 pouces sur 30 pouces par exemple.

Une valeur de *STIR* a été calculée pour chaque opération incluse dans un système de production : labour, fertilisation, semis, contrôle des ravageurs, récolte, gestion des résidus. Les valeurs *STIR* calculées pour chaque opération dans la base de données RUSLE2 sont présentés au Tableau 2.

Tableau 2 : Cote d'intensité du travail de sol (STIR) extraits de RUSLE2 pour les opérations de l'EESSAQ.

Travail du sol	STIR	Autres opérations grandes cultures	STIR
Sous-soleuse	33,00	Semoir conventionnel	2,40
Charrue	65,00	Semis direct	6,30
Chisel	46,00	Semoir à engrais vert à la volée	0,15
Zone-till ou Strip-till	19,00	Semoir à engrais vert dans l'entre-rang	1,60
Outil combiné	54,00	Andaineuse	1,00
Déchaumeuse	39,00	Batteuse	0,15
Offset	39,00		
Herse à disque	33,00		
		Marais et pomme de terre	STIR
Herse à disque (finition légère)	20,00	Semoir à légumes haute densité	0,73
Cultivateur	34,00	Planteur ou transplanteur de légumes	3,10
Rotobèche	18,00	Planteur a pommes de terre	29,00
Herse rotative	10,00	Billonneuse	26,00
Vibroculteur	31,00	Renhausseuse	3,30
Sarcler	16,50	Récolte de légumes racines et pommes de terre	5,20
Application d'amendements	STIR	Fourrages et prairies	STIR
Lisier	0,29	Andaineuse	1,00
Fumier solide	0,20	Faucheuse et faneur	0,15
Engrais minéral liquide	5,40	Presse à foin	0,15
Engrais minéral à la volée	0,15	Animaux au pâturage	0,49
Pesticide	0,15		

À chaque année de production déclarée par le producteur, l'ensemble des opérations comprises entre la récolte d'une précédente culture et celle de la culture en cours ont ensuite été additionnées afin d'obtenir une valeur annuelle pour la culture. La moyenne des cinq valeurs annuelles a ensuite été calculée. Les indices *STIR* moyens obtenus étaient distribués entre 0 et 200, les plus faibles valeurs indiquant moins de dérangement du sol (DeJong-Hughes et Daigh, 2017). Pour les besoins de l'analyse de variance, les valeurs de *STIR* ont été catégorisées en quatre classes. Une valeur de 0 a été attribuée artificiellement aux sols témoins non cultivés. Les sites cultivés ont été qualifiés en travail de sol réduit (incluant les cultures en semis direct), lorsque l'indice de *STIR* est inférieur ou égal à 30; en travail de sol modéré, avec un *STIR* supérieur à 30 et inférieur ou égal à 80; et en travail de sol intense, lorsque l'indice *STIR* était supérieur à 80.

Risque de compaction des sols

La compaction réelle engendrée par le passage des divers équipements au champ est influencée par une multitude de facteurs (poids à la roue, pression des pneus, modèle du pneu, humidité du sol au moment du passage, état de compaction initial, teneur en argile, etc.) qu'il n'a pas été possible de prendre en compte pour le présent projet. Par le biais de l'enquête auprès des producteurs, la marque et le modèle du plus gros tracteur employé dans le champ à l'étude ont été relevés, de même que l'emploi ou non de pneus radiaux sur l'ensemble de la machinerie, l'emploi de voies de circulation réservées et l'usage d'un système GPS-RTK pour guider les opérations au champ. De plus, le nombre de passage dans le champ a été déduit par l'addition des opérations de travail de sol, du nombre d'applications de pesticides et d'amendements organiques, de même que l'application d'engrais minéraux et d'amendements chaulant en dehors des opérations combinées avec les semis. Dans le cas où seule la puissance du tracteur était connue et non la marque et le modèle, son poids a été déduit par régression, suivant la puissance par rapport au poids total des essieux des autres tracteurs de l'étude.

L'indicateur de risque de compaction a ainsi été généré en combinant la plupart des facteurs précédemment mentionnés. Une valeur a été attribuée à chacune de ces pratiques en fonction de son intensité et son niveau de risque sur la compaction, une valeur basse étant une pratique à faible risque et une valeur élevée une pratique à risque élevé. Les sous-indices associés à de mauvaises pratiques sont les suivants :

I_p : L'indice de période de chacune opérations, dont les valeurs sont présentées au Tableau 3 ;

I_o : L'indice des opérations, qui évolue en fonction de la pression qu'exercent ces opérations sur le sol (Tableau 3);

I_m : L'indice de grosseur de parc de la machinerie, attribué en fonction du poids total des essieux, dont l'information a été colligée dans l'enquête auprès des producteurs (Tableau 3);

- I_{np} : L'indice de nombre de passages, basé sur les informations de l'enquête. Puisque l'effet de tassement de sol est un phénomène cumulatif et non proportionnel, une fonction exponentielle inverse a été élaborée pour diminuer l'effet des passages répétés (Botta et al., 2009) :

$$I_{np} = 1,6666(1 - \exp(nb \text{ passages} * 0,91^{0,55}))$$

Les trois sous-indices suivants sont basés sur des bonnes pratiques permettant l'atténuation du tassement du sol, et diminuent la valeur de l'indice de compaction final :

- I_{pr} : La valeur attribuée est de 0,5 si les équipements utilisés sont munis de pneus radiaux ou 1 dans le cas contraire;
- I_v : La valeur attribuée est de 0,9 s'il y a présence de voies réservées au champ ou 1,1 dans le cas contraire;
- I_{gps} : La valeur attribuée est de 0,9 si le producteur utilise un système de GPS RTK ou 1 dans le cas contraire.

Tous ces variables distinctes ont été multipliées pour créer un indice de risque de compaction pour chaque opération impliquant de la machinerie (ou un pâturage) au champ. Ces indices ont été additionnés pour créer un indice total annuel. La moyenne de ces indices annuels a été utilisée comme indicateur final attribué à chaque site. Dans le cas de l'analyse des pratiques agricoles, quatre classes de risque de compaction ont été créées selon le score final retenu afin de catégoriser les sites. Un indice de 0 représente les sites témoins non cultivés; un indice

compris entre 0 et 10 indique un risque faible de compaction; un indice compris entre 10 et 20 représente un sol à risque modéré; un indice supérieur à 20 indique un sol à risque élevé de compaction.

Tableau 3 : Indices d'opération, de parc de machinerie et de période attribués pour le calcul de l'indicateur de risque de compaction.

Type d'appareil	Indice d'opération	Poids total des essieux (kg)	Indice de parc de machinerie
Sous-soleuse	2	7500	1
Charrue	2	10000	2
Chisel	2	15000	3
Zone-till ou Strip-till	1	30000	4
Outil combiné	2		
Déchaumeuse	1		
Offset	2		
		Période	Indice de période
Herse à disque	1	Pré-semis	1,5
Cultivateur	1	Printemps	1,5
Rotobèche	1	Post-levée	1
Herse rotative	1	Saison de culture	1
Vibroculteur	1	Été	1
Sarcler	1	Après la 1 ^{ère} coupe	1
Lisier	4	Après 2 ^e coupe	1
Fumier solide	4	Après 3 ^e coupe	1
Engrais minéral liquide	1	Été post-récolte	1
Engrais minéral à la volée	1	Post-récolte	1
Pesticide	2	Automne hâtif	1
Semoir conventionnel	1	Automne	1
Semis direct	2	Automne tardif	1,5
Semoir à engrais vert à la volée	1		
Faucheuse et faneur	2		
Presse à foin	2		
Animaux au pâturage	1		
Andaineuse	2		
Batteuse	3		
Semoir à légumes haute densité	1		
Planteur a pommes de terre	2		
Billonneuse	1		
Renchasseuse	1		
Récolte de légumes racines et pommes de terre	3		

Indice de sol à nu

L'érosion des sols est un phénomène reconnu et relativement bien documenté, pouvant occasionner des pertes de productivité au champ tout comme des impacts majeurs au niveau de la qualité des eaux de surface. Certaines pratiques contribuent à rendre les sols agricoles plus vulnérables à la force de l'eau ou du vent alors que d'autres lui confèrent une certaine protection. Ainsi, le labour à l'automne, les surfaces sans résidus de culture, le travail du sol à répétition dans une jachère ou dans les cultures en rang laissent une grande surface de sol exposée et sans protection (Clearwater et al., 2016). L'exposition d'un sol aux intempéries sans mesure de protection est un indicateur de l'effet des pratiques agricoles qui est calculé dans le facteur C de l'équation universelle de perte de sol (RUSLE2) en mesurant l'efficacité des systèmes et pratiques culturales à prévenir l'érosion des sols par rapport

à un sol à nu (Wall et al., 2002). Les paramètres faisant partie de l'équation sont le type de culture, la couverture du sol (résidus de culture et couverture végétale), l'intensité du travail du sol et l'intensité des précipitations, dont l'indice a été déterminé pour chacune des grandes régions agricoles du Canada. Les valeurs de C pour chaque culture ont été généralisées pour l'ensemble du Québec (Tableau 4) en fonction de l'intensité du travail du sol : travail du sol classique, travail de conservation, et aucun travail, déterminé dans le cas de cette étude par l'indice de travail du sol STIR (voir Intensité de travail du sol (*Soil tillage intensity rating, STIR*)). Une valeur de STIR de 0 a été attribuée aux sols témoins non cultivés pour qu'ils aient une valeur de C identique aux prairies sans travail de sol. Plus la valeur de l'indice de sol à nu augmente, plus le risque de perte de sol augmente, les sols sous couvert forestiers permanent ayant le facteur C le plus faible. Comme certaines recherches ont fait état d'une diminution du risque d'érosion des sols de l'ordre de 15% lors de la présence de cultures de couvertures et intercalaires (Panagos et al., 2015), la valeur de C des sites où une culture associée était présente a été multipliée par 0,85.

Tableau 4 : Facteur C par culture en fonction de la cote d'intensité du travail de sol (STIR).

Culture	STIR > 80	STIR 30 - 80	STIR < 30	Culture	STIR > 80	STIR 30 - 80	STIR < 30
Grandes cultures				Cultures fourragères			
Autre petite céréale	0,41	0,36	0,15	Pâturage	0,02	0,02	0,02
Avoine	0,41	0,36	0,15	Prairie implantation	0,004	0,004	0,004
Blé de printemps	0,41	0,36	0,15	Prairie de graminées et mixte	0,004	0,004	0,004
Blé d'automne	0,27	0,22	n/a	Prairie de légumineuses	0,02	0,02	0,02
Canola	0,35	0,18	0,09	Engrais vert	0,46	0,40	0,28
Lin oléagineux	0,35	0,18	0,09	Millet perlé, sorgho, maïs ensilage	0,51	0,44	0,21
Maïs grain, maïs sucré	0,37	0,32	0,15	Cultures maraîchères et pomme de terre			
Orge	0,41	0,36	0,15	Culture maraîchère	0,56	0,42	n/a
Sarrazin	0,46	0,40	0,28	Pomme de terre	0,45	0,40	n/a
Seigle d'automne	0,27	0,22	n/a	Pois et Haricot	0,46	0,40	0,28
Seigle de printemps	0,41	0,36	0,15	Jachère d'été	0,50	0,34	n/a
Soya	0,46	0,40	0,28	Témoins non-cultivés			
Triticale	0,41	0,36	0,15	Plantation	0,20	0,20	0,20
				Pelouse	0,02	0,02	0,02
				Verger/Vigne	0,04	0,04	0,04
				Bande riveraine, bord de champ et de clôture, haie brise-vent, friche	n/a	n/a	0,01
				Boisé	n/a	n/a	0,003

Fréquence d'apports en amendements organiques (AEO) et apports en P, Cu et Zn des AEO

Le nombre d'applications d'amendements et d'engrais organiques (AEO) a été cumulé pour l'entièreté de la rotation de cinq ans, selon les informations des producteurs recueillies dans l'enquête. La fréquence d'apports a ensuite été divisée en trois classes distinctes : Sans apports (0), apports occasionnels (de 1 à 5) et apports fréquents (plus de 5). Aucune distinction n'a été faite selon le type d'AEO utilisé.

Afin de calculer les apports de ces trois éléments aux champs, les sources d'AEO mentionnées par les producteurs dans l'enquête ont été regroupées en cinq catégories pour lesquelles des données de charge en Cu et Zn étaient disponibles, et 12 catégories pour les teneurs en P₂O₅ (Tableau 5 et Tableau 6). Les teneurs sont détaillées dans les tableaux suivants. Les teneurs en Cu et Zn ont été converties en mg/kg sur une base de masse humide, et les teneurs en P₂O₅ ont été converties en P. Les charges épandues en P, Cu et Zn ont été calculées en multipliant les teneurs respectives en P, Cu et Zn selon la source d'AEO par des doses moyennes d'AEO épandues à l'hectare, en se fiant aux masses d'effluents d'élevage épandus dans la région de Chaudière-Appalaches (Gasser et al., 2019a). Les bilans de masse de P, Cu et Zn appliqués durant les cinq dernières années ont été calculés en cumulant les charges appliquées.

Tableau 5 : Charges en Cu et Zn des principaux amendement et engrais organiques (AEO) (CRAAQ, 2010).

Source des AEO	Porcin	Bovin	Avicole	Biosolides de papetières	Autres MRF
Cuivre (mg/kg M.S.)	839	36	192	34	402
Zinc (mg/kg M.S.)	1475	156	399	93	398

Tableau 6 : Charges en P des principaux amendement et engrais organiques (AEO) (CRAAQ, 2020).

Source des AEO	Lisier porcin	Lisier bovin	Fumier bovin	Lisier laitier	Purin laitier	Fumier laitier	Lisier veau	Fumier ovin	Fumier chevalin	Fumier avicole	Biosol. papet.	Autres MRF
P ₂ O ₅ (mg/kg M.H.)	2,1	2,38	3,13	3,4	0,5	3,6	1,15	6,61	2,0	28,07	2,98	0,5

Fréquence d'utilisation de pesticides

Cet indicateur a été calculé en additionnant le nombre d'applications d'herbicides, d'insecticides et de fongicides déclarés par les producteurs pendant les cinq années précédant l'échantillonnage des sols.

Biodiversité des cultures (IBC)

L'indicateur de biodiversité des cultures et dérivé des travaux de Tiemann et al. (2015) et rapporté par Williams et al. (2020). Il consiste en l'attribution d'un score en fonction du nombre de plantes présentes dans la rotation, un score élevé étant signe d'une plus grande biodiversité donc de bonnes pratiques agricoles. Cependant, puisque la présente étude s'étend sur des sols supportant une grande variété de cultures et de milieux, l'indicateur a été adapté pour prendre en considération la plus grande diversité d'espèces végétales que l'on retrouve dans les prairies ainsi que les sites non cultivés, tels que les haies brise-vent, friches, boisés, etc. (Werling et al., 2014). Le score a été rapporté pour chaque année dans la rotation de cinq ans, puis la moyenne de ces cinq années a été calculée pour chaque site. De plus, le score annuel a été additionné de 1 lorsqu'une culture associée (culture de couverture, engrais vert, etc.) était présente dans la saison. Les valeurs attribuées à l'indice selon les cultures sont présentées au Tableau 7.

Tableau 7 : Indice de biodiversité attribué aux types de cultures.

Culture concernée	Indice de biodiversité
Monoculture annuelle	1
Mélange de 2 cultures annuelles	2
Mélange de 3 cultures annuelles	3
Prairies (légumineuses et graminées) et pâturages	5
Prairies mixtes, témoins non cultivés (haies brise-vent, bords de champ, friches, etc.), systèmes agroforestiers, vignes et vergers	6
Boisés	7

+1 à l'indice s'il y a une culture associée dans la saison de culture

Traitements statistiques

L'enquête menée auprès des producteurs pour connaître les pratiques agricoles déployées durant les cinq années précédant l'échantillonnage a révélé une multitude de cultures et de pratiques culturales composant autant de cas de figure. Si toutes les spécificités concernant les pratiques agricoles mises en place devaient être prises en compte pour interpréter leurs effets sur les sols, l'analyse en serait très complexe, sinon impossible. Par conséquent, dans une première analyse quatre facteurs ont été retenus pour évaluer l'effet des pratiques sur la santé des sols : le système de cultures présent sur les sites échantillonnés, l'intensité du travail de sol, les apports d'amendements et engrais organiques et le risque de compaction du sol.

Effets simples des pratiques agricoles

Les effets du système de culture, de l'intensité du travail de sol, de la fréquence des apports en amendements et engrais organiques et du risque de compaction ont été évalués sur une dizaine d'indicateurs de santé des sols sélectionnés, avec un modèle linéaire à effets mixtes. Les principaux indicateurs de santé de sol retenus (Masse volumique apparente, macroporosité, diamètre moyen pondéré des agrégats, teneur en matière organique, N minéralisé, dégagement de CO₂, pH, teneurs en phosphore, cuivre et zinc) ont été analysés séparément comme variable dépendante. L'effet de chaque pratique agricole (système de culture, travail du sol, fréquence d'apports en amendements organiques et indice de risque de compaction) sur ces indicateurs a été analysé en considérant la pratique agricole comme effet fixe, alors que la série de sol a été considérée comme effet aléatoire. Le matériau parental ainsi que son interaction avec la pratique agricole analysée ont été ajoutées comme variables de contrôle dans chaque modèle dans le but d'éviter un biais dans l'estimation de l'effet de la pratique agricole sur les indicateurs de santé des sols.

Pour des raisons pratiques, l'analyse sur l'effet du travail de sol a été effectuée seulement pour les sites sous cultures annuelles, alors que celle sur l'effet de la fréquence des apports en amendements organiques a été réalisée sur un jeu de données incluant les systèmes en cultures annuelles, les systèmes en cultures pérennes et les systèmes en cultures annuelles associées aux cultures pérennes. Dans cette dernière analyse, le système de culture a été intégré comme variable de contrôle afin de prendre en compte la variabilité liée à ces trois systèmes de culture.

Pour chaque analyse, les hypothèses de normalité et d'homogénéité de la variance ont été vérifiées et lorsque nécessaire, une transformation logarithmique a été appliquée aux données avant de les analyser. Les modèles ont été ajustés par la méthode du maximum de vraisemblance restreint (méthode REML pour maximum restricted likelihood) en utilisant la fonction « lmer » dans la librairie lme4 de R. Une ANOVA de type III a été évaluée pour

chaque modèle avec la fonction « *anova* » dans la librairie lmerTest. Pour les facteurs significatifs ($P < 0.10$), des tests de comparaisons multiples ont été effectués sur les moyennes des traitements en utilisant la fonction « *emmeans* », également incluse dans la librairie lmerTest.

Indicateurs de pression agricole et conditions biophysiques

Une analyse complémentaire à celle réalisée sur l'effet des pratiques agricoles visait à analyser les effets combinés des pratiques agricoles avec des données quantitatives, en générant des indices qui permettent de mettre à l'échelle ces pratiques selon leur niveau d'intensité, et de déterminer leurs relations avec les principaux indicateurs de santé des sols. Des variables de terrain (altitude, pente, etc.) ainsi que des variables climatiques et texturales ont été ajoutés à l'analyse comme variables explicatives, au même titre que les indicateurs de pression des pratiques agricoles, pour déterminer l'ampleur de leur rôle dans l'évolution de la santé des sols du Québec et venir comme appui dans l'interprétation des résultats.

Les relations entre les différents paramètres ont été évalués par une analyse canonique des corrélations, en utilisant la fonction « *CCorA* » de la librairie *vegan* de R. L'analyse canonique des corrélations cherche à générer des composantes indépendantes, nommées *variables canoniques*, dans deux groupes de variables, de façon que les composantes des deux groupes soient le plus corrélées possible. La contribution de chaque variable aux composantes indépendantes, mesurée sur une échelle de 0 à 1, 1 étant une contribution maximale, permet de déterminer lesquelles ont le plus d'influence sur le modèle. Un seuil de 0,3 a été établi pour considérer une variable comme contribuant significativement à la composante, tel qu'utilisé par plusieurs auteurs (Vilsaint et al., 2013). Le premier groupe de variables est constitué des variables réponses, i.e. dépendantes, soit les indicateurs de la santé des sols. Les indicateurs retenus sont : la MVA, la macroporosité, le DMP, la M.O., le C actif, le CO₂ dégagé en 14 jours, l'azote potentiellement minéralisable, le pH, le phosphore, le cuivre le zinc et les mouvements de sol par érosion ou sédimentation.

Dans le groupe des variables explicatives, i.e. indépendantes, on retrouve deux sous-ensembles distincts, soit les variables d'origine naturelle et les indicateurs de pression des pratiques agricoles. Les variables d'origine naturelle sont :

- 1) La texture du sol (% argile; % sable);
- 2) Des variables issues du modèle numérique de terrain (Altitude; Pente; Facteur d'inclinaison LS, dont la méthodologie derrière le calcul est tirée de l'équation RUSLE2 (Wall et al., 2002)). Ces données ont été dérivées des relevés LIDAR dont la résolution spatiale initiale de 10 m a été agrégée à 250 m;
- 3) Des normales climatiques, soit la température moyenne annuelle et le bilan hydrique (différence de l'évaporation sur les précipitations totales), calculées à partir de données journalières de 1981 à 2010 et fournies par le consortium sur la climatologie Ouranos à une résolution spatiale de 10 km.

Résultats

Les résultats sont présentés en trois sections. La première rapporte l'effet des matériaux parentaux sur un nombre restreint d'indicateurs de santé des sols choisis. La deuxième rapporte les effets des systèmes de culture et de différentes pratiques agricoles catégorisées sur les mêmes indicateurs. La troisième section tente une analyse plus exploratoire des effets combinés des conditions pédoclimatiques et des indicateurs de pression des pratiques culturales sur les mêmes indicateurs de santé des sols.

Effets des matériaux parentaux sur la santé de sols

Les résultats présentés dans le Rapport 1 de l'EESSAQ ont démontré que le matériau parental influence plusieurs des indicateurs de santé des sols retenus dans cette étude. Les résultats de l'analyse de variance sur les matériaux parentaux sont présentés à l'Annexe A à travers les différentes analyses sur les effets des pratiques agricoles en interaction avec les matériaux (Tableau 17 à Tableau 20). Presque tous les indicateurs sont significativement affectés par le type de sol, ici révélé par la granulométrie ou l'origine du matériau parental. Seule la masse volumique apparente ne semble pas varier selon les matériaux (Tableau 8). Aussi, la teneur en matière organique varie de façon significative entre matériaux seulement dans l'horizon Ap1. Les sols sableux à squelettiques ont une teneur en matière organique et un potentiel de minéralisation plus faibles, mais une macroporosité plus élevée par rapport aux sols argileux, loameux et glaciaires. On note aussi des teneurs plus élevées en P et en Zn dans les sols sableux par rapport aux autres sols. Les sols sableux et loameux sont plus acides que les sols argileux et glaciaires. Quant au Cu, sa teneur est en général plus élevée dans les sols argileux et glaciaires par rapport aux autres types de sol. Les sols glaciaires ont une macroporosité de niveau intermédiaire entre les sols argileux/loameux et les sables dans les horizons Ap2 et B. En moyenne, les sols argileux et loameux ont une faible macroporosité, inférieure au seuil critique de $0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ dans l'horizon B.

Tableau 8 : Effets du matériau parental sur les indicateurs de santé des sols.

Horizon	Matériau parental†	MVA	Macro-porosité	DMP	M.O.	N _{minéralisé}	CO ₂ dégagé	pH	P	Cu	Zn
Ap1	Argileux	1,19 a*	0,145 b	3,47 a	5,54 a	59,10 ab	615 ab	6,27 a	29,8 c	2,87 a	2,67 b
	Loameux	1,20 a	0,154 b	2,45 b	4,38 ab	51,2 b	517 bc	5,97 b	39,3 b c	1,58 c	2,63 b
	Sableux à squelettiques	1,19 a	0,240 a	1,86 c	3,94 b	38,1 c	428 c	5,75 c	95,4 a	1,70 b c	4,42 a
	Glaciaires (till)	1,19 a	0,144 b	2,79 b	5,22 ab	76,0 a	688 a	6,03 b	51 b	2,46 ab	4,23 a
Ap2	Argileux	1,31 a	0,099 b		4,19 a	40,40 ab	443 a	6,34 a	20,5 c	2,77 a	1,96 b
	Loameux	1,30 a	0,112 b		3,69 a	36,30 b	373 a	6,06 b	32,3 b c	1,51 b	2,00 b
	Sableux à squelettiques	1,34 a	0,185 a		3,15 a	23,30 c	289 b	5,79 c	73,9 a	1,40 b	2,91 a
	Glaciaires (till)	1,29 a	0,137 ab		4,15 a	47,30 a	437 a	6,11 ab	36,2 b	1,80 b	2,72 ab
B	Argileux	1,45 a	0,062 c		2,13 a	11,79 a	245 a	6,89 a	8,4 c	2,43 a	1,37 a
	Loameux	1,55 a	0,070 c		1,42 a	7,02 a	163 b	6,31 b	16,5 b	1,20 b	1,23 a
	Sableux à squelettiques	1,47 a	0,205 a		1,48 a	6,37 a	141 b	5,96 c	33,1 a	0,61 c	1,12 a
	Glaciaires (till)	1,48 a	0,121 b		1,75 a	10,71 a	173 b	6,22 b	12,8 b c	0,98 b	1,47 a

*Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes à $P < 0,10$.

†Sites cultivés et non-cultivés (n = 310)

Effets des pratiques agricoles sur la santé de sols

L'effet des pratiques agricoles sur certains indicateurs de santé des sols semble varier d'un matériau à un autre tel qu'indiqué par l'interaction significative entre le matériau parental et les pratiques agricoles. Toutefois, en raison du faible nombre d'observations impliqué dans l'analyse des interactions et des effets plus souvent fortuits obtenus, l'interprétation des résultats se concentre essentiellement sur les effets simples des pratiques agricoles.

Effet des systèmes de culture sur la santé des sols

L'analyse de la variance a révélé que le système de culture affecte significativement la plupart des indicateurs de la santé des sols dans les trois horizons (voir Tableau 17 à l'Annexe A). L'effet de l'interaction du système de culture avec le matériau parental est aussi significatif sur plusieurs indicateurs, mais moins important que les effets simples du système de culture ou du matériau parental. Pour les raisons évoquées plus haut, l'interprétation des résultats se concentre essentiellement sur les effets simples.

La masse volumique apparente des sols dans l'horizon Ap1 est significativement plus élevée dans les systèmes maraîchers, en cultures annuelles, et en cultures annuelles associées aux pérennes que dans ceux non cultivés, en friche et en cultures pérennes, suggérant un problème de compaction des sols dans les trois premiers systèmes (Tableau 9). De plus, la macroporosité dans l'horizon Ap1 est plus faible dans les systèmes maraîchers et en cultures annuelles par rapport aux sols non cultivés et en friche. Dans les horizons Ap2 et B, les sols dans les systèmes maraîchers et en cultures annuelles sont aussi plus compacts par rapport aux sols des autres systèmes de culture tel qu'indiqué par leur masse volumique apparente plus élevée ainsi que leur plus faible macroporosité.

Le diamètre moyen pondéré des agrégats est significativement plus faible dans les systèmes en cultures annuelles et, surtout, dans les systèmes maraîchers par rapport aux autres systèmes non cultivés, en friche, en cultures pérennes et en cultures annuelles associées aux cultures pérennes, suggérant une dégradation de la structure dans ces systèmes sous cultures annuelles.

Dans l'horizon Ap1 des sols non cultivés, en friche et sous cultures pérennes, la teneur en matière organique est significativement plus élevée par rapport aux systèmes maraîchers, en cultures annuelles, et en cultures annuelles associées aux cultures pérennes. Quant aux sols sous cultures annuelles associées aux cultures pérennes, ils sont plus riches en matière organique que ceux sous cultures maraîchères et sous cultures annuelles, ce qui reflète les avantages d'avoir des cultures pérennes dans la rotation par rapport aux systèmes en cultures annuelles seules. En général, les mêmes tendances sont observées dans les horizons Ap2 et B, même si les différences ne sont pas toujours significatives. Des résultats similaires sont observés pour la capacité du sol à minéraliser de l'azote ($N_{\text{minéralisé}}$); elle est généralement plus faible dans les systèmes maraîchers et en cultures annuelles par rapport aux autres systèmes dans les trois horizons.

Il est bien reconnu qu'une plus grande occurrence des plantes pérennes dans un système, comme c'est le cas dans les prairies et les pâturages, améliore la santé des sols en augmentant, entre autres, la matière organique du sol et la stabilité des agrégats (Martel et Deschenes, 1976, Elustondo et al., 1990, Angers 1992; Nunes et al., 2020c). La persistance des racines des cultures pérennes dans le sol, les exsudats racinaires et l'activité microbienne que génèrent ces racines favorisent l'accumulation de matières organiques plus stabilisées par rapport aux cultures annuelles (Houde et al., 2020; Bolinder et al., 2012). Par ailleurs, les systèmes de cultures avec prairies se trouvent plus fréquemment dans des climats plus froids où l'activité microbienne est réduite, ce qui ralentit la décomposition des résidus par rapport aux systèmes annuels et maraîchers. Le climat, la proportion de culture

pérennes et la teneur en matière organique des sols présentent à cet effet de fortes corrélations à l'échelle du Québec (Gasser et al., 2022).

Tableau 9 : Effet du système de culture sur les indicateurs de santé des sols.

Horizon	Système de culture†	MVA	Macro-porosité	DMP	M.O.	N _{minéralisé}	CO ₂ dégagé	pH	P	Cu	Zn
		g/cm ³	cm ³ /cm ³	mm	%	mg/kg	mg/kg		mg/kg	mg/kg	mg/kg
Ap1	Non cultivé (n = 62)	1,07 b*	0,191 a	2,86 a	5,4 a	75,5 a	795 a	5,74 c	39,9 b	1,630 d	3,13 b
	Friche-pel.‡ (n = 31)	1,08 b	0,195 a	2,81 a	5,4 a	69,2 ab	730 a	5,67 c	32,2 b	1,660 cd	3,16 b
	Pérennes (n = 58)	1,14 b	0,158 b	2,89 a	5,7 a	87,1 a	810 a	5,95 bc	38,4 b	2,410 ab	4,71 a
	Ann.+pér.‡ (n = 93)	1,23 a	0,157 b	2,90 a	4,7 b	60,5 b	555 b	6,17 b	42,3 b	2,130 bc	2,93 b
	Annuelles (n = 143)	1,26 a	0,151 b	2,53 b	4,0 c	39,5 c	397 c	6,40 a	66,5 a	2,740 a	3,59 ab
	Maraîcher (n = 16)	1,35 a	0,154 ab	1,87 b	3,5 c	23,9 d	276 d	6,15 ab	97,8 a	2,160 abcd	3,08 ab
Ap2	Non cultivé	1,22 c	0,156 a	-	4,2 a	43,4 ab	467 a	5,82 c	26,3 b	1,450 b	2,06 b
	Friche-pelouse	1,25 bc	0,149 ab	-	3,9 ab	36,2 ac	418 ab	5,77 c	23,7 b	1,490 b	2,03 ab
	Pérennes	1,29 b	0,129 b	-	4,4 a	48,9 b	478 a	6,05 bc	25,9 b	1,900 ab	2,59 ab
	Ann.+pér.‡	1,32 b	0,126 b	-	3,8 ab	42,8 ab	406 b	6,26 ab	32,6 b	1,810 b	2,12 b
	Annuelles	1,37 a	0,106 c	-	3,5 b	31,2 c	315 c	6,37 a	50,9 a	2,370 a	2,75 a
	Maraîcher	1,43 a	0,118 abc	-	2,9 b	20,1 d	253 c	6,16 ab	87,5 a	1,940 ab	2,75 ab
B	Non cultivé	1,42 b	0,115 a	-	2,0 a	11,2 a	224 a	6,09 c	13,9 ab	1,008 b	1,14 a
	Friche-pelouse	1,49 ab	0,104 a	-	1,7 ab	9,3 ab	190 ab	6,11 c	12,2 ab	0,936 b	1,20 a
	Pérennes	1,47 ab	0,108 a	-	2,0 a	12,4 a	217 a	6,32 bc	11,6 b	1,162 ab	1,36 a
	Ann.+pér.‡	1,48 a	0,105 a	-	1,6 ab	9,2 ab	179 b	6,52 ab	15,3 ab	1,163 ab	1,17 a
	Annuelles	1,52 a	0,087 b	-	1,6 b	8,0 b	154 bc	6,60 a	17,8 a	1,350 a	1,33 a
	Maraîcher	1,54 a	0,092 ab	-	1,3 b	4,5 b	120 c	6,48 abc	26,6 a	1,347 ab	1,58 a

*Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes à P < 0,10.

†Sites cultivés et non-cultivés (n = 403)

‡ Friche-pel. : Friche-pelouse ; Ann.+pér. : Annuelles + pérennes.

La dégradation des sols sous cultures maraîchères et annuelles par rapport aux autres systèmes de culture avec plantes pérennes est reliée à plusieurs facteurs, notamment le travail du sol plus intensif, une plus faible diversité d'espèces, une absence de plantes en dehors de la saison de croissance, une croissance racinaire limitée ainsi qu'une architecture racinaire moins profonde et fibreuse (Nunes et al., 2020b).

Dans les systèmes en cultures maraîchères, le travail de sol est généralement plus intensif en raison des opérations plus fréquentes pour les semis, le sarclage et la récolte. Ce travail intensif laisse plus souvent le sol à nu, diminue la teneur en matière organique en accélérant sa minéralisation et favorise la minéralisation des résidus en les pulvérisant et en les incorporant au sol. Comme le montrent les résultats de la section suivante, le travail intensif du sol diminue la teneur en matière organique, favorise la compaction et diminue de la stabilité des agrégats. Dans les systèmes en cultures annuelles (grandes cultures), l'intensité du travail de sol est à géométrie variable, certains systèmes opèrent en travail réduit du sol avec herbicides et d'autres systèmes travaillent plus intensivement le sol avec des labours fréquents et des opérations de sarclage à répétition. Certains systèmes en

cultures annuelles utilisent des engrais verts et des cultures de couvertures qui peuvent apporter des bénéfices pour la santé des sols. En moyenne cependant les systèmes en cultures annuelles présentent de faibles teneurs en M.O., légèrement supérieures aux systèmes en cultures maraichères. Le pH à l'eau des sols en cultures annuelles est plus élevé que dans les autres systèmes de culture. Les systèmes en cultures maraichères incluent celle de la pomme de terre dans laquelle le pH du sol est plus souvent maintenu inférieur à 6,5 (Samson et al 2008). Certains sites sous cultures pérennes avec un pH inférieur à 6,0 pourraient en revanche bénéficier de chaulage pour améliorer leur productivité.

Les teneurs en P sont les plus élevées dans les cultures maraichères et les cultures annuelles, tandis que les teneurs en Cu et Zn sont les plus élevées dans les cultures annuelles et les cultures pérennes. Ces teneurs en Cu et Zn plus élevées résultent fort probablement d'apports plus fréquents en engrais et amendements organiques, tandis que dans les cultures maraichères les teneurs en P résultent plus probablement d'apports plus importants de P en lien avec la culture de pommes de terre dans les sols sableux et dans lesquels les teneurs en P étaient les plus élevées.

Effet de l'intensité du travail de sol sur la santé des sols

L'analyse de variance a montré que l'intensité du travail de sol a des impacts plus fréquents en surface dans l'horizon Ap1 sur des propriétés physiques comme le DMP et la macroporosité, et des propriétés liées à la matière organique comme l'azote potentiellement minéralisable ($N_{\text{minéralisable}}$) (Tableau 18 en Annexe A). Les effets du travail de sol semblent moins marqués en profondeur dans les horizons Ap2 et B. On note cependant des effets à ces profondeurs sur les teneurs en P et l'azote minéralisable, de même que des interactions significatives avec le matériau parental pour ce qui est de la MVA, de la matière organique et de la respiration microbienne.

Les sols en travail réduit tendent à avoir une plus faible macroporosité dans l'horizon Ap1, mais un DMP plus élevé par rapport aux sols plus intensivement travaillés, suggérant que le travail du sol favorise son aération, mais aussi une dégradation de sa stabilité structurale (Tableau 10). On note aussi une baisse significative de la teneur en matière organique dans l'horizon Ap1 des sols en travail de sol intense par rapport à ceux en travail modéré ou en travail réduit. Le travail du sol incorpore les résidus de culture au sol et aère le sol, augmentant ainsi la vitesse et le degré de décomposition en plaçant les résidus près des décomposeurs et dans un environnement avec des températures et des conditions d'humidité plus favorables à leur décomposition qu'en surface. À l'opposé, le semis direct et le travail réduit laissent les résidus en surface et couvrent le sol, ce qui réduit la température et augmente l'humidité du sol, qui à son tour peut limiter la décomposition de la matière organique (Roberts et Chan, 1990). Par conséquent, plus l'intensité de travail d'un sol est élevée, plus la matière organique est décomposée ; ce qui se traduit par une baisse significative de la teneur en matière organique dans l'horizon de surface des sols en travail de sol intense par rapport à ceux en travail modéré et en travail réduit.

Il est généralement reconnu que le travail plus intensif du sol réduit la teneur en matière organique et diminue le nombre d'agrégats stables à l'eau (Elustondo et al., 1990; Angers, 1992; Six et al., 1999). En effet, la stabilité des agrégats est un indicateur de qualité de la structure du sol qui est directement lié à la matière organique. Le travail du sol détruit les agrégats de deux façons : (1) en les brisant physiquement et (2) en incorporant de l'air dans le sol, stimulant les microorganismes pour accélérer la décomposition de la matière organique. Cette minéralisation de la matière organique diminue la quantité de substrats organiques disponible pour lier les agrégats entre eux.

Tableau 10 : Effets de l'intensité du travail de sol sur les indicateurs de santé des sols.

Horizon	Travail de sol†	MVA	Macro-porosité	DMP	M.O.	N _{minéralisé}	CO ₂ dégagé	pH	P	Cu	Zn
		g/cm ³	cm ³ /cm ³	mm	%	mg/kg	mg/kg		mg/kg	mg/kg	mg/kg
Ap1	Intense‡ (n = 61)	1,28 a*	0,165 a	2,38 b	3,8 b	36,7 b	373 a	6,47 a	107,6 a	3,01 a	3,62 a
	Modéré (n = 45)	1,29 a	0,143 ab	2,69 ab	4,1 ab	37,6 b	405 a	6,84 b	92,3 a	2,62 a	3,19 a
	Réduit (n = 37)	1,25 a	0,132 b	2,77 a	4,5 a	47,5 a	414 a	6,31 a	78,2 a	2,94 a	3,58 a
Ap2	Intense	1,28 a	0,108 a	-	3,5 a	30,9 ab	327 a	6,28 a	63,5 a	2,74 a	2,94 a
	Modéré	1,29 a	0,103 a	-	3,5 a	27,6 b	307 a	6,52 a	54,1 ab	2,22 a	2,44 a
	Réduit	1,25 a	0,109 a	-	3,9 a	34,1 a	327 a	6,37 a	39,5 b	2,39 a	2,44 a
B	Intense	1,54 a	0,090 a	-	1,4 a	7,1 a	159 a	6,53 a	19,9 a	1,47 a	1,38 a
	Modéré	1,49 a	0,089 a	-	1,6 a	6,7 a	183 a	6,66 a	18,7 ab	1,27 a	1,16 a
	Réduit	1,51 a	0,094 a	-	1,7 a	8,2 a	147 a	6,65 a	13,4 b	1,44 a	1,17 a

*Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes à P < 0,10.

†Sites cultivés en cultures annuelles seulement (n = 143)

‡Travail de sol intense : indice STIR > 80; modéré : indice STIR > 30 et ≤ 80; Réduit : indice STIR ≤ 30.

L'azote potentiellement minéralisable du sol est significativement plus faible en travail de sol modéré ou intense qu'en travail réduit dans les horizons Ap1 et Ap2. La quantité de matière organique et de celle plus facilement décomposable jouent un rôle prépondérant dans la capacité du sol à minéraliser de l'azote et du carbone organique. Le travail du sol stimule l'activité microbienne, le métabolisme et la décomposition de la matière organique. Plus le travail du sol est intensif, plus les pools de C et N minéralisable s'épuisent. La quantité et la localisation de la matière organique qui constitue une source d'alimentation pour les organismes du sol diffère selon le type de travail du sol. Maintenus en surface sous travail réduit et semis direct en particulier, les résidus de récolte sont graduellement décomposés et leur matière organique est intégrée au sol sans subir une décomposition accélérée par le travail du sol.

L'intensité du travail du sol influence aussi les teneurs en P dans le profil, avec des tendances similaires pour Cu et Zn. Le travail du sol plus intensif associé au labour conventionnel conduit à des teneurs plus élevées en P dans les horizons Ap2 et B et à des tendances similaires dans l'horizon Ap1. Sous une gestion similaire des engrais, on devrait s'attendre à un enrichissement de ces éléments à la surface du sol sous travail réduit. Il est possible que les sols qui reçoivent plus souvent des apports d'engrais de ferme chargés en P, Cu et Zn sont plus souvent labourés ou sous travail de sol intensif, ce qui expliquerait cet enrichissement en P, Cu et Zn sur tout le profil. On doit toutefois surligner l'importance d'incorporer les effluents d'élevage au moins à la surface du sol pour limiter les pertes d'azote ammoniacal sous forme gazeuse et de phosphore vers les eaux de surface.

Effet de la fréquence d'apports en amendements organiques

La fréquence d'apports en amendements organiques influence significativement la teneur en matière organique dans l'horizon Ap1, la quantité d'azote minéralisable dans les horizons Ap1 et Ap2, ainsi que les teneurs en P, Cu et Zn dans les trois horizons Ap1, Ap2 et B (Tableau 19 en Annexe A). L'effet de l'interaction avec le système de culture est significatif pour Cu (Ap1, Ap2 et B) et Zn (Ap1 et Ap2), P et N minéralisé (Ap2). On note aussi un effet

significatif de l'interaction avec le matériau parental sur le CO₂ dégagé dans l'Ap1 et l'Ap2, et sur la masse volumique apparente (MVA) dans le B.

Les apports fréquents en amendements organiques résultent en une augmentation significative du niveau de matière organique dans l'horizon Ap1 et de la quantité d'azote minéralisable dans les horizons Ap1 et Ap2, par rapport aux apports occasionnels et en absence d'apport (sans apport) (Tableau 11). La quantité de CO₂ dégagée a aussi tendance à être plus élevée lorsque les apports en amendements organiques sont plus fréquents. Il en est de même pour les teneurs en P, Cu et Zn qui sont plus élevées dans les sols ayant reçu des apports fréquents en amendements organiques par rapport à ceux sans apport et avec apports occasionnels.

Tableau 11 : Effets de la fréquence d'apports en amendements organiques sur les indicateurs de santé des sols.

Horizon	Fréquence d'apports†	MVA	Macro-porosité	DMP	M.O.	N _{minéralisé}	CO ₂ dégagé	pH	P	Cu	Zn
		g/cm ³	cm ³ /cm ³	mm	%	mg/kg	mg/kg		mg/kg	mg/kg	mg/kg
Ap1	Sans apport	1,21 a*	0,147 a	2,79 a	4,8 ab	58,2 ab	576 a	6,07 a	37,2 b	2,12 b	2,99 b
	Occasionnels‡	1,21 a	0,160 a	2,75 a	4,5 b	57,0 b	544 a	6,11 a	40,2 b	1,88 b	3,08 b
	Fréquents	1,18 a	0,162 a	2,77 a	5,1 a	66,2 a	604 a	6,18 a	63,5 a	3,14 a	4,68 a
Ap2	Sans apport	1,31 a	0,117 a	-	3,9 a	39,7 ab	399 a	6,12 a	27,8 b	1,84 b	2,1 b
	Occasionnels	1,33 a	0,117 a	-	3,7 a	38,8 b	375 a	6,14 a	31,9 b	1,65 b	2,19 b
	Fréquents	1,30 a	0,121 a	-	4,1 a	44,5 a	410 a	6,24 a	44,1 a	2,41 a	2,92 a
B	Sans apport	1,47 a	0,099 a	-	1,7 a	8,5 a	174 a	6,38 a	12,3 b	1,18 ab	1,14 b
	Occasionnels	1,48 a	0,099 a	-	1,7 a	10,9 a	180 a	6,41 a	14,0 ab	1,05 b	1,19 b
	Fréquents	1,48 a	0,099 a	-	1,9 a	11,3 a	200 a	6,47 a	18,3 a	1,37 a	1,5 a

*Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes à P < 0,10.

†Sites cultivés en cultures annuelles et pérennes (sans cultures maraichères) (n = 291)

‡Apports occasionnels : 5 fois et moins sur 5 ans; Apports fréquents : plus de 5 fois sur 5 ans

D'autres effets bénéfiques connus des amendements organiques incluent la diminution de la masse volumique apparente, l'augmentation de la stabilité des agrégats et du taux d'infiltration des sols (Maillard et al., 2016; Martens and Frankenberger, 1992; Turner et al., 1994). Les apports fréquents en amendements organiques présentent dans nos résultats des tendances similaires sur ces propriétés physiques du sol, mais les différences ne sont pas significatives. Parmi les facteurs qui pourraient expliquer cette absence d'effet, il convient de retenir la quantité et la composition des amendements organiques apportés. En effet, la présente analyse tient compte du nombre de fois que les agriculteurs ont appliqué des amendements organiques, mais ne tient pas compte ni des quantités ni de la composition des amendements apportés. De plus, l'EESSAQ porte sur une large variété de sols provenant des diverses régions climatiques du Québec, contrairement à des études réalisées en conditions expérimentales contrôlées sur un type de sol en particulier. Par ailleurs, l'effet bénéfique des apports d'amendements organiques sur les propriétés physiques des sols pourrait être amenuisé par l'effet des passages répétés de la machinerie pour les épandre et du travail de sol pour les incorporer au sol.

Effet du risque de compaction sur les indicateurs de la santé des sols.

L'indicateur de risque de compaction (IRC) des sols a des effets significatifs sur tous les indicateurs de santé de sols dans les trois horizons (Tableau 20 en Annexe A). De plus, son effet sur la plupart des indicateurs varie d'un matériau à un autre tel qu'indiqué par un effet significatif de son interaction avec le matériau parental.

L'IRC se révèle être un excellent indicateur de la compaction, de l'aération et de la stabilité structurale du sol. Les sols non cultivés qui ont un IRC nul ont une masse volumique nettement plus faible, une macroporosité ainsi qu'un DMP plus élevés par rapport aux sols cultivés dont l'IRC varie de faible à élevé (Tableau 12). Les sols cultivés avec un IRC élevé ont une masse volumique plus élevée par rapport à ceux dont l'IRC est faible ou moyen. Quant à la macroporosité, elle a tendance à être plus faible lorsque l'IRC est faible par rapport à un IRC moyen ou élevé. Il en est de même pour le DMP qui est plus élevé lorsque l'IRC est plus faible (Faible >Moyen>Élevé). En profondeur dans l'horizon B, un indice de risque de compaction moyen à élevé se traduit par une macroporosité inférieure à $0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ou 10 % et donc un manque d'aération pour l'ensemble des sols.

Tableau 12 : Effet du risque de compaction sur les indicateurs de santé des sols.

Horizon	Risque de compaction †	MVA	Macro-porosité	DMP	M.O.	N _{minéralisable} e	CO ₂ dégagé	pH	P	Cu	Zn
		g/cm ³	cm ³ /cm ³	mm	%	mg/kg	mg/kg		mg/kg	mg/kg	mg/kg
Ap1	Élevé ‡ (n = 89)	1,28 a*	0,175 b	2,42 c	3,7 c	38,8 d	401 d	6,35 a	73,9 a	2,81 a	4,29 a
	Moyen (n = 110)	1,22 b	0,172 b	2,65 b	4,5 b	48,9 c	470 c	6,26 a	65,1 a	2,55 a	3,66 ab
	Faible (n = 103)	1,23 b	0,159 b	2,80 ab	4,6 b	58,2 b	557 b	6,10 b	41,6 b	2,06 b	2,88 c
	Non cultivé (100)	1,08 c	0,199 a	2,91 a	5,7 a	77,0 a	803 a	5,74 c	39,1 b	1,78 b	3,41 bc
Ap2	Élevé	1,41 a	0,107 b	-	3,2 b	29,1 c	310 d	6,33 a	57,2 a	2,35 a	3,09 a
	Moyen	1,35 b	0,111 b	-	3,8 a	35,8 b	356 c	6,33 a	48,2 a	2,16 a	2,61 a
	Faible	1,31 b	0,118 b	-	3,9 a	41,4 a	398 b	6,14 b	31,8 b	1,80 b	2,13 b
	Non cultivé	1,23 c	0,152 a		4,1 a	41,9 a	460 a	5,82 c	24,5 c	1,50 b	2,12 b
B	Élevé	1,53 a	0,090 b	-	1,5 b	7,7 b	148 c	6,57 a	19,9 a	1,28 a	1,43 a
	Moyen	1,51 a	0,092 b	-	1,7 a	8,5 ab	172 b	6,60 a	17,6 ab	1,29 a	1,28 ab
	Faible	1,47 b	0,100 b	-	1,7 a	10,2 ab	177 b	6,39 b	14,8 bc	1,16 ab	1,19 b
	Non cultivé	1,44 b	0,113 a		1,9 a	10,9 a	215 a	6,09 c	12,6 c	1,03 b	1,17 b

*Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes à P < 0,10.

†Sites cultivés et non cultivés (n = 402)

‡Voir matériel et méthodes pour le calcul de l'indice de risque de compaction

La teneur en matière organique du sol, tout comme le potentiel de minéralisation du N (N_{minéralisable}) et du C (CO₂ dégagé), diminue avec l'augmentation de l'indice de risque de compaction (IRC). À l'inverse, les indicateurs de chimie-fertilité (pH, P, Cu, Zn) sont plus élevés lorsque l'IRC des sols est plus élevé. Ces résultats inverses traduisent l'effet des opérations de travail de sol, d'amendements organiques et de chaulage qui sont prises en compte dans le calcul de l'IRC. En effet, comme il a été démontré précédemment, le travail du sol diminue la teneur en matière organique du sol en accélérant sa décomposition. Le pH plus élevé dans les sols avec un IRC élevé et moyen suggère que ces sols ont reçu des apports plus fréquents en produits chaulants par rapport aux autres avec un IRC

faible ou nul. Les sols avec un indice de compaction élevé semblent donc subir des effets de plusieurs pratiques intensives confondus, soit le travail intensif du sol, des apports élevés en engrais organiques et des apports en chaux plus fréquents.

Toutefois, il peut aussi s'agir d'un effet confondant avec le système de cultures. Les sols avec un IRC nul sont non cultivés (non cultivé, friches) alors que ceux avec un IRC faible sont majoritairement occupés par des plantes pérennes (prairies longues et courtes) sous régie extensive. L'analyse effectuée sur les systèmes de culture a montré que les sols non cultivés et les systèmes en cultures pérennes ont une teneur en matière organique ainsi qu'un potentiel de minéralisation plus élevés, et un pH plus faible par rapport aux autres systèmes cultivés. Quant aux teneurs en P, Cu et Zn, elles sont liées aux apports en amendements organiques dont la fréquence est plus élevée dans les sols avec un IRC élevé.

L'indice de risque de compaction (IRC) inclut, outre la fréquence des opérations culturales et la période à laquelle elles sont réalisées, un certain nombre de facteurs qui traduisent l'intensité des pratiques agricoles comme la grosseur du parc de machinerie et les mesures mises place pour atténuer les risques de compaction. Vu l'effet significatif qu'a cet indice sur tous les indicateurs de santé de sols jusqu'en profondeur, de la même façon que l'effet du système de culture, mais plus que les effets de l'intensité de travail sol et de la fréquence d'apports d'amendements organiques, cet indicateur semble pertinent pour dégager une influence générale de l'intensité des pratiques agricoles, tout comme les systèmes de cultures.

Conclusions sur l'effet des pratiques agricoles sur la santé des sols

Les résultats de cette étude confirment que la santé des sols est sensible aux changements induits par les pratiques agricoles et leur intensité. Le système de culture mis en place affecte grandement les propriétés physiques (masse volumique apparente, macroporosité et stabilité structurale), de chimie-fertilité (pH, P, Cu, Zn) ainsi que celles liées à la matière organique du sol (matière organique, potentiel de minéralisation en N et C). Les systèmes plus intensivement travaillés comme les systèmes en cultures annuelles et maraîchères entraînent la compaction et la dégradation de la stabilité structurale des sols ainsi qu'une baisse de leur teneur en matière organique et de leur potentiel de minéralisation par rapport aux systèmes non cultivés, en friche ou avec des cultures pérennes (seules ou associées aux cultures annuelles). La réduction de l'intensité du travail dans ces sols cultivés augmente leur stabilité structurale ainsi que leur teneur en matière organique. Les amendements organiques, en plus d'apporter du phosphore, du zinc et du cuivre au sol, améliorent la fertilité du sol en augmentant sa teneur en matière organique et en améliorant son potentiel de minéralisation. Ces résultats reflètent les avantages des pratiques de conservation telles que la rotation des cultures pérennes avec des cultures annuelles, les apports en amendements organiques et la réduction de l'intensité de travail du sol, et soulignent le potentiel d'amélioration de la santé des sols grâce à leur adoption. De plus, ils suggèrent que l'effet des pratiques agricoles sur la santé des sols peut varier selon plusieurs facteurs inhérents comme le matériau parental et la région climatique dont il faudra tenir compte lors de futures études.

Effet des conditions pédoclimatiques et de l'intensité des pratiques agricoles sur la santé des sols

L'analyse par corrélation canonique a permis de mettre en relation d'une part les indicateurs de santé des sols mesurés à chaque horizon et d'autre part les conditions pédoclimatiques et des indicateurs révélant la pression ou l'intensité des pratiques agricoles. Les coefficients de détermination (R^2) des modèles obtenus diminuent de 0,40 pour l'horizon Ap1, à 0,36 pour l'horizon Ap2 et à 0,33 pour l'horizon B (Tableau 13).

Horizon Ap1

Se basant sur les valeurs propres (Eigen value), trois variables canoniques ont été reconnues significatives dans l'horizon Ap1 et ont été retenues pour fin de discussion.

Première variable canonique

La Figure 3 permet de visualiser la première paire de variables canoniques exprimant la forte relation entre les indicateurs liés à l'intensité des pratiques agricoles en général et les variables clés de santé des sols.

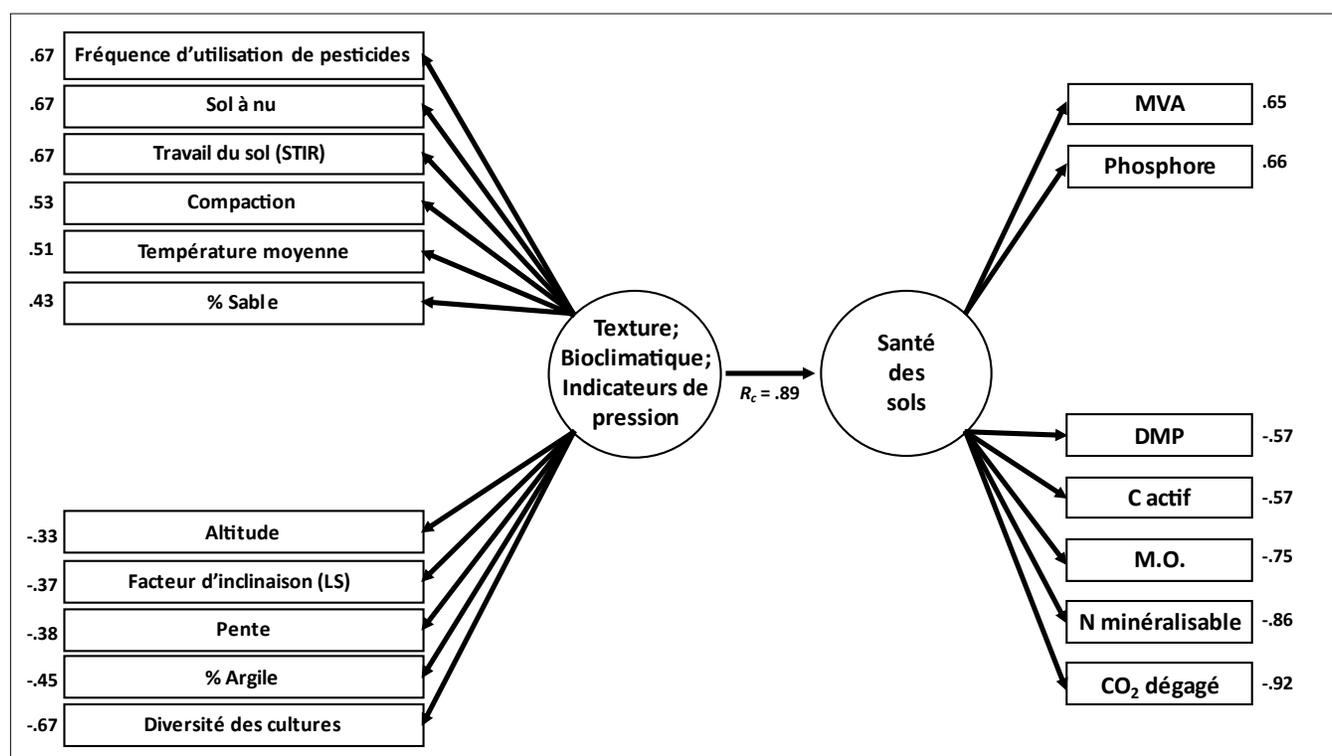


Figure 3 : Variables corrélées à moins de -0,3 ou plus de 0,3 à la première corrélation canonique de l'horizon Ap1.

En détail, une utilisation plus fréquente des pesticides, une plus grande intensité du travail du sol, une faible couverture du sol et dans une moindre mesure un indice de risque de compaction élevé sont corrélés aux indicateurs indiquant une condition physique dégradée des sols (MVA élevée et plus petit DMP) et des teneurs

plus faibles en matière organique (% M.O), ainsi que ses fonctionnalités reliées (Carbone actif, N minéralisable et CO₂ dégagé). À l'inverse, les sites présentant une plus grande diversité d'espèces végétales ont des indicateurs de l'état physique et des teneurs en matière organique du sol en meilleures conditions.

Tableau 13 : Corrélations canoniques entre Y : l'état de santé des sols et; X : le contexte pédoclimatique et les indicateurs de pression agricole de l'horizon Ap1

Variables		Corrélation avec la 1 ^{ère} variable canonique	Corrélation avec la 2 ^e variable canonique	Corrélation avec la 3 ^e variable canonique		
Variables dépendantes (Indicateurs de santé des sols)	M.O.	-0,75	-0,03	-0,09		
	C actif	-0,57	-0,12	-0,19		
	CO ₂ dégagé 14 jours	-0,92	-0,20	-0,18		
	N minéralisable	-0,86	-0,27	-0,32		
	Masse volumique apparente	0,66	0,25	-0,19		
	Macroporosité	0,00	-0,51	0,49		
	Diamètre moyen pondéré des agrégats	-0,57	0,55	-0,27		
	pH	0,28	0,59	-0,21		
	Phosphore	0,65	-0,29	-0,37		
	Cuivre	0,15	0,35	-0,75		
	Zinc	0,16	-0,35	-0,69		
	Mouvement de sol	-0,10	0,08	0,25		
	Variables indépendantes	Contexte pédoclimatique : texture, terrain et climat	Sable (%)	0,43	-0,57	-0,04
			Argile (%)	-0,45	0,60	-0,01
Altitude			-0,33	-0,32	-0,09	
Pente			-0,38	-0,39	-0,13	
Facteur d'inclinaison (LS)			-0,37	-0,40	-0,13	
Température moyenne			0,51	0,09	-0,23	
Bilan hydrique			0,03	-0,44	-0,35	
Indicateurs de pression des pratiques agricoles			Apports en phosphore	0,12	-0,08	-0,28
		Apports en cuivre	0,18	-0,07	-0,36	
		Apports en zinc	0,14	-0,09	-0,36	
		Fréquence d'utilisation de pesticides	0,67	0,19	0,03	
		Sol à nu	0,67	0,31	0,00	
		Intensité de travail de sol (STIR)	0,67	0,25	0,03	
		Risque de compaction	0,53	0,11	-0,15	
		Biodiversité des cultures	-0,67	-0,30	0,07	
		Valeur propre des composantes (Eigen value)		0,79	0,56	0,46
		Corrélations canoniques (R _c)		0,89	0,75	0,68
R ² de l'ensemble du modèle		0,40				

Corrélation négative forte [1 – 0,65[Corrélation négative modérée]0,65 – 0,3]	Corrélation faible]-0,3 – 0,3[Corrélation positive modérée]0,3 – 0,65]	Corrélation positive forte]0,65 – 1]
--	--	------------------------------------	--	--

Fait intéressant à souligner, le CO₂ dégagé est l'indicateur de santé des sols le plus fortement et négativement corrélé à cette première variable canonique (corr. -0.92), indiquant une baisse importante de la capacité du sol à minéraliser du C plus l'intensité des pratiques augmente. De fait, l'activité biologique des sols est étroitement reliée à l'intensité des pratiques culturales, puisque la mise en culture et le travail du sol participent à la diminution des stocks en M.O. facilement dégradables en accélérant leur minéralisation (Franzluebbers et al., 2018; Franzluebbers et Stuedemann, 2015). Le phénomène a aussi été mis en évidence dans le Rapport 1 de l'EESQAQ. La teneur en M.O et la quantité de CO₂ dégagé en incubation entre groupes de séries de sols d'un même matériau évoluent en fonction des régions pédoclimatiques qui dictent les cultures et l'intensité des pratiques agricoles.

Les conditions pédoclimatiques (texture, climat et modelé du terrain) jouent cependant un rôle important dans cette première variable canonique. Plus le pourcentage de sable et la température augmentent, plus la MVA augmente et la teneur en matière organique et ses fonctionnalités reliées diminuent. La teneur en argile agit à l'inverse. Elle est positivement corrélée à la teneur en M.O. Basées sur des analyses de sol de producteurs, les teneurs en M.O. à l'échelle de la province évoluent de la même façon par rapport à la texture et au climat (Gasser et al., 2022). Dans une moindre mesure, l'altitude, la pente et l'inclinaison sont aussi reliées positivement à des teneurs en M.O. plus élevées, qui peuvent être reliées à des pratiques agricoles moins intensives.

Curieusement, le phosphore est aussi fortement corrélé à cette première variable canonique, alors que l'indicateur d'apport en phosphore des amendements organiques ne l'est pas. Cet indicateur ne semble donc pas être un indice efficace pour détecter une potentielle saturation en P dans les sols, alors que les indicateurs liés à l'intensité des pratiques culturales semblent plus corrélés. Tel que souligné dans le Tableau 8, les sols de matériaux sableux à squelettiques ont des teneurs plus élevées en P_{M3} que les sols argileux et loameux, ce qui pourrait expliquer la corrélation entre le phosphore, la MVA et le sable dans cette variable canonique.

Deuxième variable canonique

La deuxième variable canonique regroupe des propriétés du sol reliées à la composante texturale. Le pourcentage d'argile, le paramètre le plus corrélé à cette variable canonique, est relié à un DMP élevé, une plus faible macroporosité (Tableau 8), un pH plus élevé, des teneurs plus élevées en cuivre et plus faibles en zinc. Tous ces indicateurs sont étroitement liés à de plus faibles altitudes et des plus faibles pentes, où les sols argileux se concentrent en majorité. Le sable, à l'opposé, indique exactement le contraire concernant les indicateurs de santé des sols.

Troisième variable canonique

La troisième variable canonique obtient un score de corrélation suffisamment élevé (corr. 0,68) pour faire partie de la discussion, d'autant plus qu'elle permet de regrouper les variables de santé des sols indiquant des excès de fertilisation, soit la teneur en cuivre, en zinc et en phosphore. En variables explicatives, les indicateurs d'apports en cuivre et zinc provenant des amendements organiques sont corrélés à ces teneurs, indiquant qu'il existe un lien entre l'épandage de fumiers et de lisiers et l'accumulation de ces éléments traces dans les sols. L'indicateur d'apports en phosphore des amendements organiques évolue aussi dans le même sens que la teneur en P_{M3} des sols, bien que la corrélation à cette variable canonique soit assez faible (-0,28). On remarque également une relation positive entre les indicateurs reliés aux apports en Cu et Zn et la teneur en azote potentiellement minéralisable, mais une relation inverse avec la macroporosité.

Horizon Ap2

Se basant sur les valeurs propres (Eigen value), trois variables canoniques ont été reconnues significatives dans l'horizon Ap2 et ont été retenues pour fin de discussion (Tableau 14).

Première variable canonique

La première variable canonique de l'horizon Ap2 est composée essentiellement des mêmes variables que pour l'horizon Ap1 (Tableau 14). Ce constat apparaît logique, puisque les processus influençant la santé des sols sont semblables entre les deux horizons, puisqu'il s'agit de deux couches affectées par le travail du sol. Le CO₂ dégagé reste toujours l'indicateur de santé des sols le plus affecté par les pratiques culturales, suivi des autres paramètres liés à la M.O., diminuant alors que l'intensité des pratiques augmentent et au contraire augmentant lorsque la biodiversité des espèces végétales s'accroît. L'influence des indicateurs de pression indiquant des mauvaises pratiques (fréquence des pesticides, sol à nu, travail du sol et compaction) sur les variables de santé des sols est légèrement plus faible que dans l'horizon Ap1, mais reste très importante. Au contraire, l'influence de la température moyenne tend à être plus importante sur les variables de l'Ap2 que dans la couche de surface.

La seule différence majeure entre les éléments de cette variable canonique est l'ajout du zinc comme indicateur de santé des sols corrélé à l'intensité des pratiques, tout comme le P et la MVA. Il peut s'agir d'un effet combiné des pratiques culturales et d'un effet de texture, le sable étant un facteur déterminant de fortes concentrations en Zn et en P.

Deuxième variable canonique

La deuxième variable canonique de l'horizon Ap2, composée des variables naturelles influençant les sols, est pratiquement identique à celle de l'Ap1, à l'exception du lien encore plus fort entre le pourcentage de sable et la macroporosité. La composante texturale est d'ailleurs très importante, un lien fort se dégageant entre l'argile et les teneurs élevées en cuivre, tout comme les pH plus élevés.

Troisième variable canonique

La troisième variable canonique regroupe les sols sous forte densité d'élevage, caractérisés par des épandages plus fréquents d'AEO. Les indicateurs d'apports de P, Cu, Zn sont particulièrement corrélés avec les teneurs en zinc, qui se démarque des autres variables de santé des sols. Les concentrations en Zn sont effectivement élevées dans les AEO, et son accumulation dans les sols pourrait être un signe de surfertilisation. Dans la même suite logique, l'azote potentiellement minéralisable est aussi fortement corrélé aux apports, ceux-ci étant une bonne source d'azote rapidement disponible pour les cultures. Sont également corrélés aux apports mais dans une moindre mesure le cuivre, signe de surfertilisation, ainsi que la M.O. et le C actif, signe que les AEO peuvent tout de même contribuer à améliorer certains aspects de la santé des sols.

Tableau 14 : Corrélations canoniques entre Y : l'état de santé des sols et; X : la texture, le climat, le modèle numérique de terrain et les indicateurs de pression agricole de l'horizon Ap2.

Variables		Corrélation avec la 1 ^{ère} variable canonique	Corrélation avec la 2 ^e variable canonique	Corrélation avec la 3 ^e variable canonique		
Variables dépendantes (Indicateurs de santé des sols)	M.O.	-0,61	0,03	0,32		
	C actif	-0,36	-0,05	0,35		
	CO ₂ dégagé 14 jours	-0,87	0,07	0,22		
	N minéralisable	-0,76	0,03	0,51		
	Masse volumique apparente	0,74	0,27	-0,20		
	Macroporosité	-0,27	-0,80	-0,08		
	pH	0,26	0,63	-0,05		
	Phosphore	0,72	-0,23	0,21		
	Cuivre	0,23	0,62	0,38		
	Zinc	0,42	-0,06	0,67		
	Mouvement de sol	-0,13	0,00	-0,19		
Variables indépendantes	Contexte pédoclimatique : Texture, terrain et climat	Sable (%)	0,42	-0,57	0,02	
		Argile (%)	-0,39	0,61	-0,08	
		Altitude	-0,33	-0,37	0,27	
		Pente	-0,36	-0,33	0,29	
		Facteur d'inclinaison (LS)	-0,35	-0,34	0,30	
		Température moyenne	0,57	0,25	-0,03	
		Bilan hydrique	0,08	-0,32	0,39	
		Indicateurs de pression des pratiques agricoles	Apports en phosphore	0,12	-0,04	0,30
	Apports en cuivre		0,21	0,00	0,32	
	Apports en zinc		0,16	-0,03	0,34	
	Fréquence d'utilisation de pesticides		0,59	0,09	-0,04	
	Sol à nu		0,59	0,20	0,02	
	Intensité de travail de sol (STIR)		0,56	0,14	0,00	
	Risque de compaction		0,49	0,09	0,14	
	Biodiversité des cultures		-0,61	-0,22	-0,05	
	Valeur propre des composantes (Eigen value)		0,72	0,59	0,35	
	Corrélations canoniques (R_c)		0,85	0,77	0,59	
	R^2 de l'ensemble du modèle		0,36			

Corrélation négative forte [1 – 0,65[Corrélation négative modérée]0,65 – 0,3]	Corrélation faible]-0,3 – 0,3[Corrélation positive modérée]0,3 – 0,65]	Corrélation positive forte]0,65 – 1]
--	--	------------------------------------	--	--

Horizon B

Se basant sur les valeurs propres (Eigen value), trois variables canoniques ont été reconnues significatives dans l'horizon B et ont été retenues pour fin de discussion (Tableau 15).

Première variable canonique

L'analyse des corrélations canoniques permet de bien distinguer la différence entre les principaux processus influençant les différents horizons de sol : alors que les horizons AP1 et Ap2 étaient plus influencés par l'intensité des pratiques culturales, l'horizon B est nettement plus influencé par la composante texturale (sable : corr. 0,84; argile :corr. -0,84) (Tableau 15). Les liens sont beaucoup plus étroits entre, d'une part, les teneurs élevées en sable avec une macroporosité et des teneurs en P élevées, et d'autre part, les teneurs élevées en argile avec un pH plus alcalin et de fortes teneurs en cuivre. L'altitude, la pente et le facteur d'inclinaison, facteurs influençant la variabilité de la distribution spatiale de la texture des sols, sont logiquement reliés à ces mêmes indicateurs de santé des sols précédemment mentionnés. Le bilan hydrique aussi semble plus influencer les propriétés du sol que dans les autres horizons

Deuxième variable canonique

Le lien entre l'intensité des pratiques agricoles et la dégradation de l'état de santé des sols se manifeste dans la deuxième variable canonique, où les faibles indicateurs liés à la M.O. et les MVA élevées sont corrélés aux indices de pesticides, de sol à nu, de travail du sol et de compaction. Cependant, il convient de nuancer puisque ces effets sur les sols sont aussi substantiellement corrélés à la température moyenne (corr : 0,55, Tableau 15). Il pourrait s'agir d'un effet plus climatique que cultural, puisque les températures sont un facteur déterminant le type de cultures présentes sur le territoire, influençant par le fait même l'intensité des pratiques, puisque l'on retrouve plus de cultures annuelles dans les climats chauds.

Troisième variable canonique

Le modèle calculé par l'analyse canonique est moins robuste dans l'horizon B que dans les autres horizons de surface, avec un R^2 de 0,33 pour l'ensemble des corrélations entre les variables. La troisième variable canonique ne permet pas de faire de liens significatifs entre les indicateurs de pression agricole et les paramètres de santé des sols. Le lien avec le bilan hydrique est peut-être fortuit, étant donné qu'il soit peu probable que cette variable ait, à elle seule, un lien avec la santé des sols. On remarque cependant que les valeurs élevées en M.O. sont liées aux teneurs élevées en P et en Zn.

Tableau 15: Corrélations canoniques entre Y : l'état de santé des sols et; X : la texture, le climat, le modèle numérique de terrain et les indicateurs de pression agricole de l'horizon B.

Variables		Corrélation avec la 1 ^{ère} variable canonique	Corrélation avec la 2 ^e variable canonique	Corrélation avec la 3 ^e variable canonique	
Variables dépendantes (Indicateurs de santé des sols)	M.O.	0,06	-0,68	0,58	
	C actif	0,02	-0,62	0,47	
	CO ₂ dégagé 14 jours	0,29	-0,78	0,21	
	N minéralisable	0,07	-0,61	0,41	
	Masse volumique apparente	-0,03	0,61	-0,34	
	Macroporosité	-0,85	-0,29	0,02	
	pH	0,47	0,45	-0,35	
	Phosphore	-0,47	0,25	0,47	
	Cuivre	0,75	0,13	0,21	
	Zinc	0,08	0,04	0,76	
	Mouvements de sol	0,04	-0,16	-0,14	
Variables indépendantes	Contexte pédoclimatique : Texture, terrain et climat	Sable (%)	-0,84	0,16	0,00
		Argile (%)	0,82	-0,17	-0,02
		Altitude	-0,31	-0,31	0,16
		Pente	-0,30	-0,36	0,13
		Facteur d'inclinaison (LS)	-0,31	-0,35	0,14
		Température moyenne	0,06	0,55	-0,13
		Bilan hydrique	-0,44	-0,04	0,45
		Valeur propre des composantes (Eigen value)	0,80	0,54	0,36
	Indicateurs de pression des pratiques agricoles	Apports en phosphore	-0,14	0,11	0,21
		Apports en cuivre	-0,13	0,18	0,23
		Apports en zinc	-0,14	0,14	0,24
		Fréquence d'utilisation de pesticides	0,01	0,48	0,11
		Sol à nu	0,10	0,54	0,10
		Intensité de travail de sol (STIR)	0,05	0,51	0,10
		Risque de compaction	-0,02	0,42	0,17
		Biodiversité des cultures	-0,10	-0,55	-0,11
		Corrélations canoniques (R _c)	0,89	0,73	0,60
		R ² de l'ensemble du modèle	0,33		

Corrélation négative forte [1 – 0,65[Corrélation négative modérée]0,65 – 0,3]	Corrélation faible]-0,3 – 0,3[Corrélation positive modérée]0,3 – 0,65]	Corrélation positive forte]0,65 – 1]
--	--	------------------------------------	--	--

Conclusion de l'effet des pratiques agricoles sur la santé des sols

Cette première partie du rapport visait à évaluer comment l'intensité des pratiques agricoles et les conditions biophysiques affectent l'état de santé des sols. Globalement, les effets combinés du contexte pédo-climatique et de l'intensité des pratiques culturales exercent une pression importante sur l'état de santé des sols du Québec.

L'analyse de l'effet des matériaux parentaux sur les indicateurs de santé des sols, jumelé à l'analyse des conditions pédoclimatiques, permet aussi de constater l'importance que génère les matériaux sur les niveaux de base des indicateurs de santé de sols et de leur interaction avec les pratiques agricoles. Les tendances dégagées dans le cadre du Rapport 1 de l'EESQAQ ont pu dans la plupart des cas être validées par cette analyse.

Les sols sableux et squelettiques se distinguent nettement des autres types de sols pour l'ensemble des indicateurs retenus à l'exception de la masse volumique apparente qui n'est pas significativement différente entre types de sols. L'état structural des sols sableux et squelettiques est significativement plus faible que ces ceux des sols plus fins, mais l'aération, révélée par la macroporosité, y est supérieure. Les sols sableux et squelettiques ont des teneurs en matière organique généralement plus faibles et un potentiel de minéralisation du carbone et de l'azote plus faible également, et ce dans tous les horizons. À contrario, les sols argileux ont un meilleur état structural, des teneurs en M.O. nettement plus élevées, un pH plus neutre et une capacité d'échange cationique plus élevée. Les sols issus de matériaux glaciaires (tills) ont les potentiels de minéralisation de l'azote et les taux de respiration microbienne les plus élevés, suivis des sols argileux et loameux, probablement en lien avec une exploitation plus marginale par rapport aux autres sols.

Le climat et la topographie du terrain jouent également un rôle prépondérant sur les indicateurs de santé des sols, notamment sur les teneurs en M.O. et ses fonctionnalités associées. Les sols sous climat plus chaud ayant un cycle de minéralisation du carbone et de la matière organique beaucoup plus rapide que les sols sous climat plus froid des régions nordiques ou situés plus en altitude. Les effets de ces variables climatiques et de terrain peuvent parfois être confondants, l'altitude étant un paramètre qui a une répercussion à la fois sur le climat et sur la texture, alors que la pente et le facteur d'inclinaison sont des indicateurs qui affectent le dépôt initial des matériaux et par conséquent ont une influence sur la granulométrie du sol.

L'analyse des corrélations canoniques entre d'une part les indicateurs de santé des sols et d'autre part les variables pédoclimatiques, soit la texture, le terrain et le climat (résultats non présentés) a permis de constater que le contexte pédoclimatique a certes une influence considérable sur l'état de santé des sols, et ce surtout dans l'horizon B, mais le modèle produit est moins puissant pour expliquer les phénomènes que lorsque l'intensité des pratiques agricoles est prise en considération. L'intensité de ces pratiques agricoles influence plus particulièrement l'état des horizons de surface, se manifestant dans quatre phénomènes de dégradation distincts, soit la compaction, la dégradation de la structure, la diminution de la matière organique et la surfertilisation; des phénomènes de dégradation similaires à ceux que Tabi et al. (1990) avait rapporté dans leur inventaire. Seule l'acidification des sols ne semble plus un phénomène aussi préoccupant.

La compaction des sols est attribuée principalement à la grosseur du parc de machinerie, à la fréquence et la période des passages de machinerie et à l'intensité des opérations, tel que démontré par la relation entre l'indice de risque de compaction (IRC) et son effet sur les sols. L'effet de ces pratiques se fait même sentir jusque dans l'horizon B, indiquant des phénomènes de compaction profonde des sols. Cette situation est plus préoccupante à cause de la persistance du phénomène ainsi que de la complexité et des coûts engendrés pour décompacter le sol en profondeur. Les systèmes de cultures ont aussi un effet significatif sur la compaction, les sols sous cultures

pérennes étant moins compacts que les sols sous cultures annuelles ou maraîchères, et ce dans tous les horizons également.

L'état de la structure du sol est fortement influencé par le système de culture et de l'intensité du travail de sol qui en découle. Les sols non cultivés, sous friche, sous cultures pérennes, et même ceux où les cultures pérennes ne sont présentes que quelques années dans la rotation ont un meilleur état structural que les sols exclusivement sous cultures annuelles ou maraîchères. Les cultures pérennes avec des systèmes racinaires plus profonds et permanents, ainsi que les exsudats racinaires favorisent l'agrégation des particules minérales et organiques, tout en réduisant la fréquence ou l'intensité de travail du sol. Dans le cas des cultures annuelles, une réduction du travail de sol peut avoir un effet bénéfique sur la structure, puisque les sols sous travail réduit ont un DMP significativement plus élevé que les sols sous travail intensif.

La diminution de la teneur en matière organique, et par le fait même la diminution du potentiel de minéralisation de l'azote ainsi que de la respiration microbienne, sont les paramètres les plus affectés par l'intensité des pratiques culturales. Les apports fréquents en amendements organiques et la réduction de l'intensité du travail de sol permettent d'accumuler plus de M.O. dans les horizons de surface, et dans une moindre mesure dans l'horizon B. Ce sont toutefois les systèmes de cultures qui ont l'effet le plus significatif sur la M.O., les cultures pérennes accumulant plus de matière organique que les sols sous cultures annuelles et maraîchères en lien avec leurs systèmes racinaires plus profonds et permanents. Les apports d'amendements organiques et la fertilisation dans les prairies cultivées permettent d'augmenter les teneurs en M.O. au-delà même des teneurs obtenues dans les sols non cultivés et sous friche et pelouses.

L'accumulation de phosphore et d'éléments traces métalliques dans les sols est causée principalement par les applications excessives d'amendements et engrais organiques (AEO) dans des sols étant déjà près de leur seuil de saturation. Le cuivre et le zinc sont les principaux éléments traces provenant des AEO s'accumulant dans tout le profil de sol, le zinc s'accumulant préférentiellement dans les sols sableux alors que le cuivre est plus retenu par les complexes organo-minéraux des sols argileux. L'intensité des autres pratiques affecterait aussi les accumulations en P, Cu et Zn dans les horizons de surface; les sols sous cultures annuelles ainsi que sous travail intensif sont significativement plus chargés en ces éléments que les sols sous prairies. L'effet des matériaux parentaux est d'ailleurs considérable dans le cas du phosphore, les sols sableux accumulant significativement plus de P dans le profil que les sols à granulométrie plus fine. Bien que les apports en AEO puissent avoir des effets bénéfiques importants sur l'état de santé des sols par l'augmentation des teneurs en M.O. et les éléments fertilisants qu'ils apportent, une application abusive peut annuler ces effets par la surfertilisation, ainsi que la compaction et la dégradation de la qualité structurale occasionnées par le passage répété des équipements d'épandage.

L'analyse de l'effet des pratiques agricoles a certes permis d'identifier les principales causes des phénomènes de dégradation des sols de la province, mais elle présente toutefois quelques angles morts qu'il convient d'analyser plus en profondeur pour être en mesure de formuler des recommandations plus ciblées. Un suivi plus rapproché auprès des producteurs pour connaître les sources et les doses d'amendements organiques permettrait de déterminer plus précisément quelles pratiques de fertilisation sont plus à risque de causer une accumulation en phosphore et en éléments traces dans les sols. Plus de détails dans la régie des cultures permettraient également de déterminer si l'application de pratiques de conservation, tel que l'inclusion de cultures de couverture vivantes, de cultures intercalaires ou d'engrais vert et la réduction du travail de sol permettent une diminution à grande échelle des pertes de sol et une meilleure accumulation de matière organique et de carbone dans le profil dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques.

EFFET DE LA SANTÉ DES SOLS SUR LA PRODUCTIVITÉ DES CULTURES

Introduction

La productivité des cultures est intimement liée aux pratiques agricoles que les producteurs déploient pour maintenir les sols productifs et rentables pour la production d'aliments, de biocombustibles et autres produits utiles pour les humains (Doran et Parkin, 2015; Lehmann et al., 2020). Par le passé, la chimie-fertilité des sols a été le principal élément de diagnostic pour ajuster la fertilisation en regard de la productivité des cultures. Or, la disponibilité des nutriments n'est qu'un des aspects de la santé des sols qui affecte la croissance et le développement des plantes et qui définit la productivité des cultures. En fait, plusieurs autres facteurs au niveau du sol peuvent affecter la productivité des cultures, comme la condition physique qui régule les échanges d'air et d'eau et l'activité biologique.

L'objectif de cette analyse était de voir comment la santé des sols définie par des indicateurs de la condition physique des sols, de l'état de la matière organique et de la chimie-fertilité affecte la productivité des principales cultures mesurée dans le cadre de l'EESQAQ. La texture des sols et des variables climatiques ont été incluses dans le but de quantifier leur influence et de distinguer leurs effets de ceux de la condition ou de l'état de santé des sols plus facilement influencés par les différentes pratiques agricoles.

Matériel et méthodes

L'effet de la santé des sols sur la productivité des cultures a été analysé en intégrant un plus grand nombre d'indicateurs de santé des sols que ceux présentés dans les analyses précédentes afin d'identifier quels indicateurs de santé des sols sont reliés à la productivité des sols. En raison du nombre restreint de champs (sites) et de la diversité de cultures échantillonnées, l'analyse statistique n'a pu être réalisée en considérant le matériau parental ou la classe texturale. Toutefois, les teneurs en argile et en sable ont été ajoutées dans les modèles prédictifs pour estimer leur influence. Les indicateurs de santé des sols utilisés dans l'analyse sont les suivants : MVA, macroporosité, agrégats stables à l'eau, DMP, pH eau, teneurs en P, K, Ca, Mg, Na, Al, B, Cu, Fe, Mn, Zn extraits Mehlich-3, N minéralisable, C total, C actif/C total, argile, sable, mouvement de sol (indice d'érosion ou de sédimentation de sol, mesuré au C_{137}) et l'indicateur de qualité physique des sols minéraux (IQPSM) basé sur les caractéristiques pédomorphologiques relevées dans le profil de sol par les équipes d'échantillonnage.

Les rendements des cultures ont été mesurés lors de l'année de l'échantillonnage des sols soit en 2018 ou 2019 à chacun des quatre points d'échantillonnage sur le site. Les rendements des cultures ont été mesurés sur la plupart des cultures présentes sauf les cultures maraichères avec un protocole d'échantillonnage détaillé (Gasser et al., 2019). Les rendements rapportés sur base sèche ont été standardisés par culture avec les méthodes décrites plus bas. L'analyse a été conduite sur quatre groupes de cultures. Un premier groupe inclut les neuf cultures, tandis que les trois autres groupes sont formés de cultures spécifiques dont le nombre d'observations était suffisant : les prairies, le maïs-grain et le soya.

Les variables climatiques ont été calculées avec des données journalières du 1^{er} mai au 31 octobre de 2018 ou 2019, selon l'année d'échantillonnage des sols. Seulement deux variables climatiques ont été choisies pour interpréter la productivité des cultures en fonction du climat : les unités thermiques maïs (UTM) calculées avec la bibliothèque Python de XCLIM de Ouranos (Logan et al., 2023) et un bilan hydrique (PPT-ETP), qui est la différence

entre les précipitations totales et l'évapotranspiration potentielle pour la même période et dont les unités sont en mm.

La manipulation et l'analyse finales des données ont été réalisées dans l'environnement de programmation *R* pour les statistiques (R Core Team, 2021). La colinéarité entre les variables explicatives a été vérifiée. Dans le cas où les variables étaient fortement corrélées entre elles, seulement une d'entre elles a été retenue, en fonction de son importance sur le rendement. Ensuite, toutes les variables du modèle ont été normalisées avec la fonction *transformTukey* de la librairie *rcompanion* dans *R*, puis standardisées (moyenne centrée à 0 avec 1 écart type) avec la fonction *scale* de la librairie de base de *R*. Une standardisation supplémentaire a été appliquée aux valeurs de rendements du premier groupe « G1 : 9 cultures » par culture, dans le but de rendre comparables les rendements entre cultures ayant de grands écarts de production de matière sèche.

Les effets des indicateurs de santé des sols sur la productivité des cultures ont été analysés en régression multiple avec une technique d'apprentissage machine, de forêts aléatoires « Random forest » en utilisant la librairie *caret* de *R*. Cette technique exploite les effets non-linéaires entre les variables prédictives soit les indicateurs de santé des sols et les variables climatiques sur la variable prédite, soit le rendement des cultures. Cette technique est aussi couramment utilisée en pédologie numérique pour cartographier les propriétés des sols comme la texture en fonction de covariables dérivées du modèle numérique de terrain ou d'imageries satellitaires (Heung et al., 2016; Padarian et al., 2019; Chen et al., 2022). Les travaux de Jeong et al. (2016) et Sajid et al. (2022) ont aussi démontré que la productivité des cultures comme le maïs grain, le blé et la pomme de terre peuvent être prédites avec précision à partir des variables climatiques et biophysiques avec ces techniques d'apprentissage machine.

Douze régressions indépendantes ont été réalisées en considérant les quatre groupes de cultures et les trois horizons de sol. Pour chaque régression, les données ont été partitionnées aléatoirement en deux groupes : un premier, composé de 75% des observations servant à la calibration des modèles, et un deuxième, composé des 25% restantes, servant à la validation. Cette partition aléatoire a été répétée 8 fois et 8 modèles distincts ont été créés pour chacune des 12 analyses. Chaque modèle a été entraîné avec la fonction *train* de la librairie *caret* en utilisant comme critère d'optimisation l'écart quadratique moyen, le RMSE (*Root mean square error*). La validation croisée a été réalisée avec la méthode « K-fold » en répétant 8 fois l'itération. La moyenne des 8 modèles a été retenue comme résultat final, et le R^2 *out of the bag* a été calculé pour valider la performance du modèle final. La fonction *varImpPlot* de la librairie *randomForest* a été utilisée pour analyser les formes de relation entre le rendement et les cinq variables les plus importantes dans le modèle final.

Résultats et discussion

Le Tableau 16 présente les résultats des 12 analyses réalisées par groupe de cultures et par horizon de sol. Pour chaque analyse, on y présente le coefficient de détermination de la régression (R^2), ainsi que l'influence des cinq premières variables d'importance reliées aux conditions pédoclimatiques ou à l'état de santé des sols, sur la productivité des cultures. En considérant les neuf cultures ou le maïs-grain seulement, on remarque que les unités thermique maïs (UTM) ou la chaleur accumulée pendant la saison de croissance exerce une influence majeure et positive sur la productivité de l'ensemble des cultures principales du Québec, et ce pour tous les horizons du profil de sol. Le premier graphique à la Figure 4 présente l'importance des variables dans l'horizon Ap1 permettant de prédire le rendement des neuf cultures. Les UTM atteignent le plus haut niveau d'importance, et ce pour toutes les itérations du modèle. Ce constat n'est pas surprenant, considérant que la chaleur a un effet majeur sur les rendements des cultures en climat tempéré, et surtout dans ce contexte où les sites sont répartis sur un territoire avec une grande amplitude thermique.

Tableau 16 : Effet des variables pédoclimatiques et de la santé des sols sur la productivité des cultures.

Cultures	Ap1		Ap2		B	
9 cultures <i>n</i> Ap1 = 1040 <i>n</i> Ap2 = 965 <i>n</i> B = 1046	UTM*	+**	UTM	+	UTM	+
	IQPSM***	+	Bilan hydrique	+	Bilan hydrique	+
	Mouv. sol***	+	Mouv. sol	+	B	-
	Bilan hydrique	+	B	-	Mouv. sol	+
	Zn	+	N minéralisé	+	IQPSM	+
	$R^2 = 0,39$		$R^2 = 0,38$		$R^2 = 0,33$	
Maïs-grain <i>n</i> Ap1 = 174 <i>n</i> Ap2 = 174 <i>n</i> B = 176	UTM	+	UTM	+	UTM	+
	N minéralisé	-	Fe	+/-	Bilan hydrique	-
	Fe	+/-	Bilan hydrique	-	Al	-
	Bilan hydrique	-	N minéralisé	+/-	Fe	+/-
	Al	-	Al	+/-	Macroporosité	+/-
	$R^2 = 0,67$		$R^2 = 0,69$		$R^2 = 0,66$	
Prairie <i>n</i> Ap1 = 396 <i>n</i> Ap2 = 347 <i>n</i> B = 396	Zn	+	Bilan hydrique	+	Bilan hydrique	+
	IQPSM	+	Cu	+	UTM	+/-
	UTM	+	Macroporosité	-	Mouv. sol	+
	Cu	+	Mouv. sol	+	B	-
	Macroporosité	-	Zn	+	K	-
	$R^2 = 0,40$		$R^2 = 0,48$		$R^2 = 0,43$	
Soya <i>n</i> Ap1 = 164 <i>n</i> Ap2 = 160 <i>n</i> B = 164	Bilan hydrique	-	Bilan hydrique	-	Bilan hydrique	-
	Argile	+	UTM	+	UTM	+
	UTM	+	pH	-	Macroporosité	+
	Al	-	Argile	+	Al	-
	Sable	+	Al	-	Mouv. sol	+
	$R^2 = 0,49$		$R^2 = 0,50$		$R^2 = 0,44$	

* Les variables en gras ont une importance relative supérieure à 50 %.

** + = effet positif sur le rendement; - = effet négatif sur le rendement; +/- = effet non linéaire sur le rendement.

*** IQPSM = Indice de qualité physique des sol minéraux; Mouv. sol = perte ou gain de sol par érosion ou sédimentation.

Le bilan hydrique influence également positivement la productivité des neuf cultures regroupées, et de manière plus importante dans les horizons Ap2 et B. Cette influence est aussi positive lorsqu'on considère seulement les prairies, mais négative pour le soya et le maïs-grain. On peut donc considérer que les rendements à l'échelle de la province sont positivement reliés aux températures plus élevées, mais pour le bilan hydrique la réaction n'est pas

la même selon les cultures. Une partie de la réponse pourrait provenir du fait que les rendements de maïs-grain et de soya ont été mesurés plus souvent dans la vallée du Saint-Laurent qui présente un gradient de bilan hydrique corrélé aux UTM, tandis que ceux des prairies ont été mesurés dans plusieurs autres régions où cette corrélation est moins importante et donc les prairies réagissent à un bilan hydrique positif.

Outre les paramètres climatiques, l'indicateur de qualité physique des sols (IQPSM) arrive en deuxième position parmi les variables d'importance dans l'horizon Ap1, suggérant que l'état de la structure des sols a un effet prépondérant sur les rendements des cultures, au-delà même des paramètres de chimie-fertilité qui sont plus souvent étudiés et cités dans la littérature. Rappelons que l'indicateur de qualité physique des sols a été développé par l'équipe pédologique de l'IRDA dans le cadre des travaux de l'EESSAQ et à partir des descripteurs pédomorphologiques relevés pendant la caractérisation des profils et l'échantillonnage des sols.

Le mouvement de sol, autre indicateur relié intimement à la santé physique des sols, est la troisième variable d'importance influençant le rendement dans les horizons Ap1 et Ap2 et la quatrième dans le B, indiquant que les sols prompts à l'érosion ont des rendements moins élevés que ceux où l'on observe au contraire une accumulation de sol (Figure 4). L'érosion des sols peut effectivement conduire à des pertes de rendement, puisque les pertes des sols affectent principalement l'horizon de surface qui est dans la plupart des cas plus riche en matière organique et possède une meilleure capacité de rétention en eau (Mokma et Sietz, 1992; Verity et Anderson, 1990). Verity et Anderson (1990) ont d'ailleurs noté que l'azote potentiellement minéralisable est un indicateur réagissant rapidement aux pertes de sol, plus que l'azote total. Le phosphore des sols érodés se trouve aussi plus sous forme inorganique et plus difficilement assimilable par les plantes que dans les sols avec un horizon de surface intact. Au contraire, les sols situés en bas de pente, où il y a une accumulation du matériel érodé en amont, sont caractérisés par des teneurs en M.O. et en nutriments plus élevées ainsi qu'une part plus importante de particules fines, facteurs améliorant les rendements (Bernard et al., 1992).

Fait intéressant à noter, une plus forte accumulation de zinc dans les sols de l'Ap1 coïncide avec des rendements plus élevés, ce qui pourrait paraître *a priori* contradictoire puisque de trop fortes concentrations en cet oligo-éléments peuvent être toxiques aux plantes (Giroux, 2008). Cependant, ces niveaux de Zn élevés et leur effet positif sur les rendements pourraient être reliés aux apports en amendements organiques. Ces derniers sont reconnus pour améliorer les rendements des cultures par l'apport d'une large gamme de nutriments aux plantes et combler certaines déficiences, mais sont aussi vecteurs d'accumulation de Zn dans les sols, et les sols sableux en particulier (Tella et al., 2016; Rapport 1 de l'EESSAQ). Dans l'horizon Ap2, l'effet positif de l'azote potentiellement minéralisable sur les rendements pourraient aussi résulter des apports en engrais organiques. L'analyse de l'effet des conditions pédoclimatiques et de l'intensité des pratiques agricoles sur la santé des sols présentée à la page 30 de ce rapport a aussi révélé des corrélations positives dans la 3^e variable canonique, entre les apports en P, Cu et Zn provenant des apports en engrais organiques et les teneurs élevées en N minéralisable dans les horizons Ap1 et Ap2. Cet effet n'est peut-être pas exclusif aux apports en engrais organiques, mais pourrait aussi être lié à des pratiques culturales moins intensives, reconnues pour avoir un effet bénéfique sur les teneurs en N minéralisable également (Figure 4). Finalement, on note un impact négatif des quantités de bore dans les sols sur les rendements dans les horizons Ap2 et B, qui nous apparaît fortuit ou difficile à expliquer.

Mentionnons aussi que la prédiction des rendements sur les neuf principales cultures à l'échelle de la province a une incertitude élevée (R^2 de 0,33 à 0,39) par rapport à celle des rendements du maïs par exemple (R^2 de 0,66 à 0,69). Ce manque de précision du modèle général peut s'expliquer par la diversité des cultures et la grande distribution spatiale des observations, entraînant une grande variabilité des conditions climatiques, des types de

sol et des pratiques culturales. La difficulté d'interpréter les variations dans la productivité des cultures sur de grands territoires est un phénomène documenté par d'autres chercheurs (Xu et al., 2019), notamment dans le *corn belt* des états du Midwest des États-Unis (Wade et al., 2020; Sajid et al., 2022), où des conditions similaires de variabilité pédoclimatique ont été rencontrées.

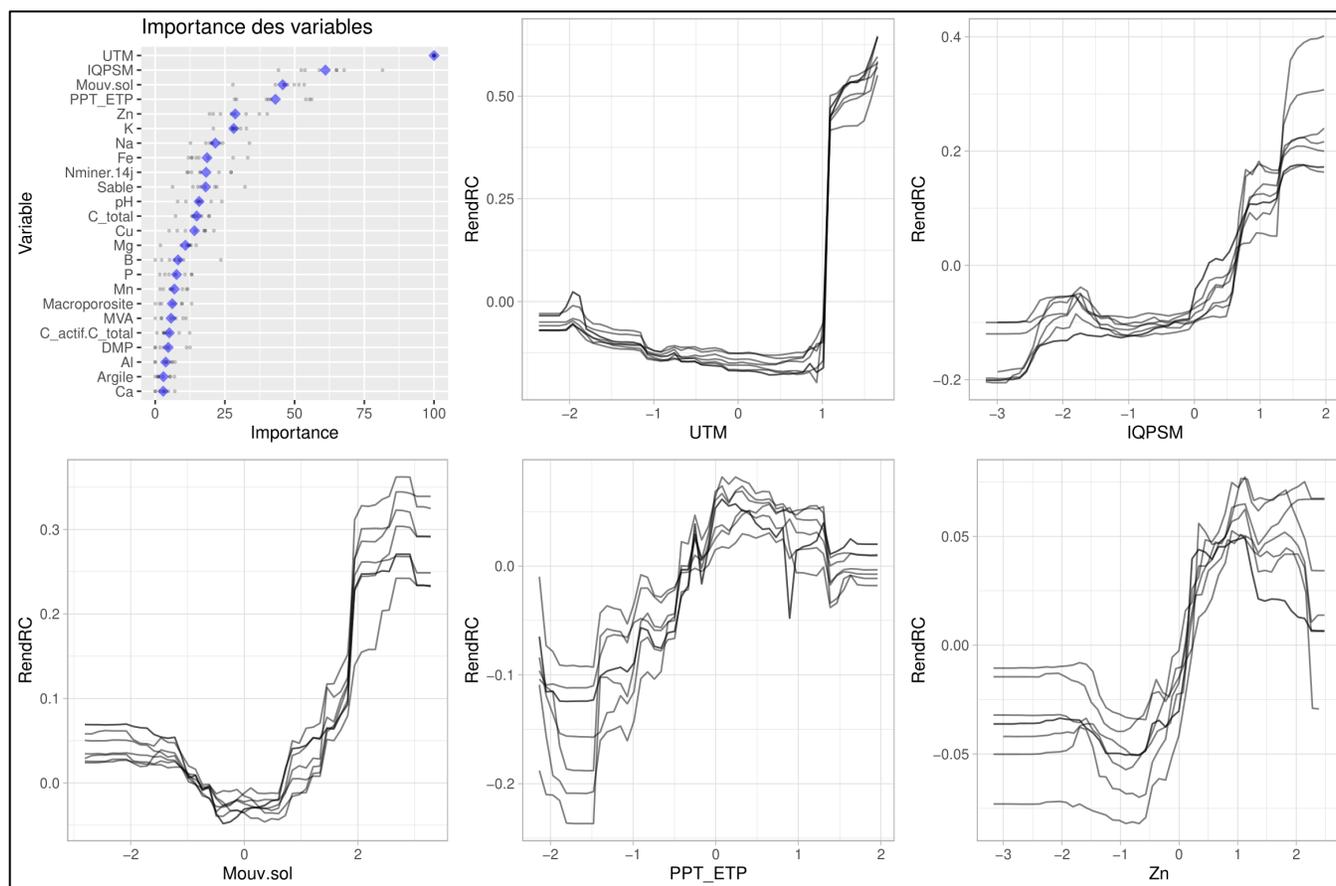


Figure 4 : Importance et comportement des cinq plus importantes variables exprimant le rendement des neuf cultures à partir des conditions climatiques et des propriétés de sol de l'horizon Ap1.

Le cas de figure du maïs-grain présenté au Tableau 16 illustre la difficulté d'évaluer l'effet de la santé des sols et du climat sur la productivité des cultures à l'échelle du Québec avec un nombre restreint d'observation et des conditions pédoclimatiques aussi variables. Effectivement, malgré des coefficients de régression plus robustes pour la prédiction des rendements du maïs (R^2 de 0,66 à 0,69) que pour la prédiction de l'ensemble des cultures (R^2 de 0,33 à 0,39) (Tableau 16), les relations obtenues entre les indicateurs de santé des sols et les rendements en maïs-grain ne sont pas toutes attendues ni cohérentes. Les UTM qui ont la plus grande importance dans tous les horizons, présentent une relation positive et cohérente avec le rendement (Tableau 16 et Figure 5). Le bilan hydrique présente une relation négative inverse à celle qu'on s'attendrait avec les rendements du maïs-grain dans tous les horizons. Un excès d'eau pourrait-il expliquer cette relation inverse avec la productivité du maïs-grain; ce ne semblait pas être le cas en 2018 et 2019. Cet effet négatif du bilan hydrique provient plutôt du fait qu'il est

confondu avec celui des UTM qui varient dans le même sens entre la Montérégie où les rendements et les UTM sont plus élevés et le bilan hydrique plus faible par rapport aux régions de Chaudière-Appalaches et du Bas Saint-Laurent où les rendements et les UTM sont plus faibles et le bilan hydrique plus élevé. L'ETP est une composante négative dans le bilan hydrique qui réduit ce dernier en étant plus élevée en région méridionale et en climat plus chaud.

L'azote potentiellement minéralisable présente une relation négative avec les rendements dans les deux horizons de surface (Tableau 16), alors qu'on s'attend comme pour plusieurs autres indicateurs de santé biologique des sols à un effet positif sur la croissance des plantes et leur productivité (Wade et al., 2020). La Figure 5 illustre comment les cinq premières variables d'importance affecte le rendement du maïs-grain, et permet aussi de constater la variabilité entre les huit modèles prédictifs réalisés, notamment pour l'aluminium, le fer et la macroporosité dans l'horizon B. Ce qui reflète le niveau d'incertitude engendré par certaines propriétés des sols comme la macroporosité par exemple, pour prédire le rendement.

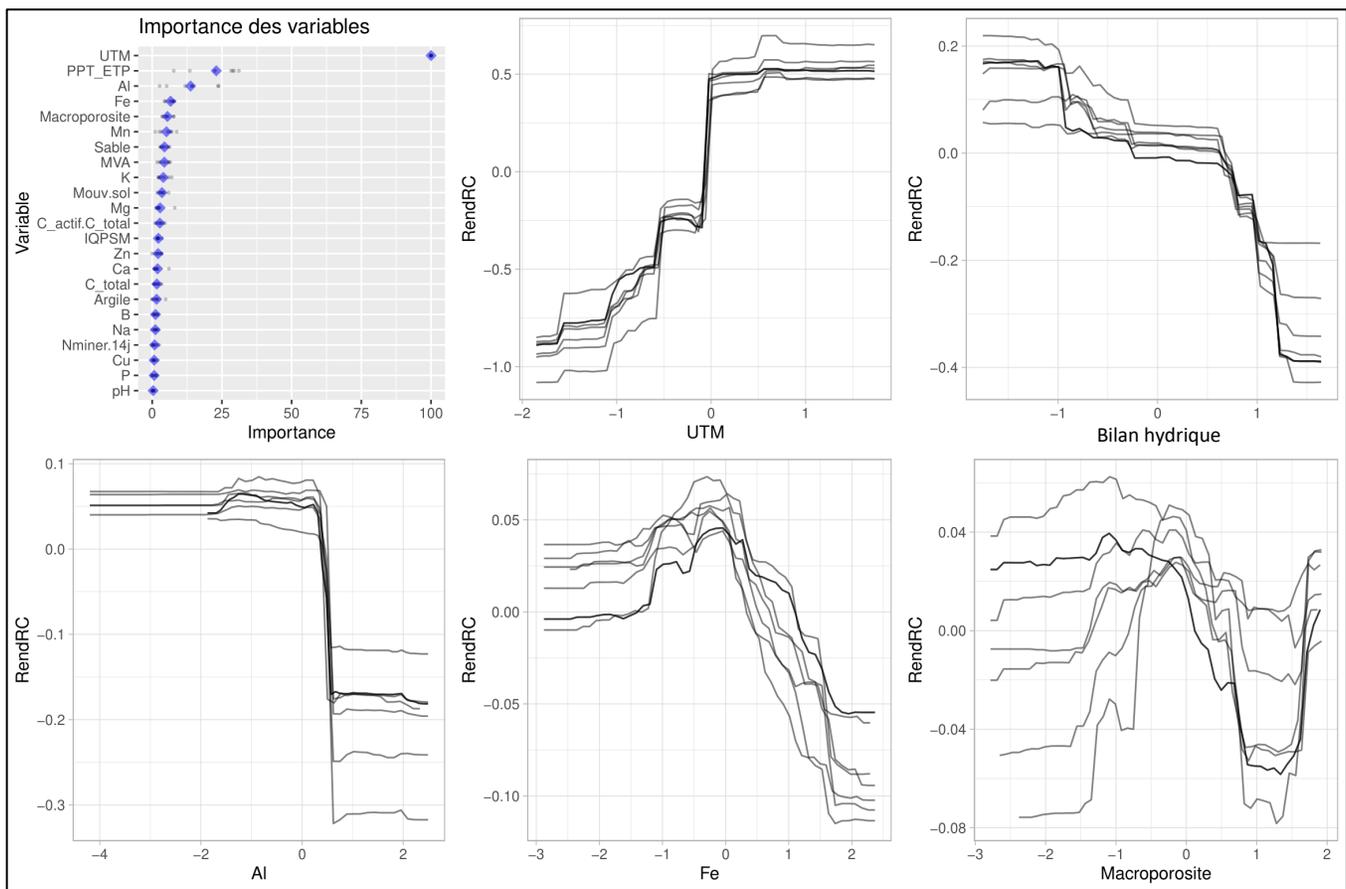


Figure 5 : Importance et comportement des cinq plus importantes variables exprimant le rendement du maïs-grain à partir des conditions climatiques et des propriétés de sol de l'horizon B.

Les teneurs en Fe et Al Mehlich-3 apparaissent aussi comme des variables d'importance pour expliquer la productivité du maïs dans tous les horizons, alors qu'on pourrait les considérer généralement moins influentes

sur la productivité (Tableau 16). Parmi les variables d'importance dans l'horizon B ressortait également les teneurs en sable et en Mn (Figure 5). L'effet négatif de ces teneurs en Fe et Al révèle probablement l'effet des sols plus podzolisés dans lesquels les teneurs en sesquioxydes de Fe et d'Al en profondeur peuvent être toxiques ou limitant pour la croissance des plantes.

Interprétation et discussion

Bien d'autres paramètres, notamment la génétique exprimée par le cultivar ou l'hybride de la culture, la régie phytosanitaire, etc. peuvent influencer l'expression des rendements d'une culture, particulièrement dans le cas du maïs-grain (Xu et al., 2019). D'autre part, l'effet de la condition physique et de la santé biologique des sols peut être diminué par des mesures correctives comme des apports plus élevés d'engrais de synthèse. Des effets climatiques régionaux, tel que des précipitations intenses, des gels, des périodes de sécheresses, peuvent affecter les rendements, phénomènes que le bilan hydrique ou les UTM cumulées pendant la saison ne permettent pas de distinguer, à plus grande échelle (Sajid et al., 2022).

Malgré quelques effets probants du climat et de quelques propriétés des sols sur le rendement des cultures, l'analyse n'a pas révélé beaucoup d'influence de la condition physique des sols ou de la santé biologique révélée par des indicateurs liés à la matière organique. Les rendements sont apparus positivement reliés à l'IQPSM révélant la structure du sol et négativement reliés au mouvement de sol indiquant le niveau d'érosion des sols. Les rendements apparaissent tantôt négativement tantôt positivement reliés à la macroporosité. D'autres fois, des relations apparaissent avec des éléments (Cu et Zn, par exemple) sans raison apparente. En incluant toutes les conditions climatiques et pédologiques avec un faible nombre d'observations, des effets confondants apparaissent ne permettant pas de détecter les effets anticipés de la santé des sols et du climat sur les rendements. Par exemple, les gradients de chaleur et de bilan hydrique semblent confondus pour le maïs et le soya. L'effet des différents types de sols (podzols vs gleysols et teneurs en Al et Fe, par exemple) semble prendre plus d'importance que les autres propriétés plus variables des sols. Les teneurs en Cu et Zn qui présentent un lien positif avec les rendements des prairies pourraient simplement identifier des sols qui reçoivent plus souvent des engrais de ferme et donc d'autres éléments fertilisants.

Pour être en mesure de détecter des effets plus probants de la santé de sols, il aurait fallu pouvoir réaliser les analyses dans des conditions pédoclimatiques particulières comme on le fait habituellement en dispositif expérimental ou de disposer d'un plus grand nombre d'observations pour réaliser des analyses indépendantes par type de sols et conditions climatiques ou espérer une meilleure distribution aléatoire des observations sous toutes les conditions pédoclimatiques. À cet effet, on pourrait avoir besoin de 7 500 à 10 000 observations pour générer des relations plus concluantes entre les indicateurs de la santé des sols et le rendement. Par exemple, Jeong et al. (2016) ont bénéficié pour établir ces relations d'environ 23 000 obs. dans le maïs-grain, 1 044 obs. dans la pomme de terre et 1 512 obs dans le maïs-ensilage. Sajid et al. (2022) ont bénéficié d'un nombre d'observations du même ordre de grandeur (> 10 000 obs.) dans le maïs-grain. En revanche, Svedin et al. (2023) ont réussi à tirer des conclusions satisfaisantes sur un nombre d'observations similaires à notre réalité (446 obs.).

D'autre part, l'analyse de la productivité des cultures n'a pas pris en compte les différentes pratiques agricoles. Cependant, il se peut que cette omission entraîne des erreurs au niveau de l'interprétation des corrélations entre les variables explicatives et le rendement, notamment au niveau des mouvements de sol. Effectivement, une méta analyse portant sur des résultats de sites expérimentaux à l'échelle planétaire a mis en évidence que l'érosion des

sols a un effet négatif sur la productivité des cultures, mais cet effet est variable en fonction des types de cultures et des conditions pédo-climatiques, et surtout très variable selon les différentes pratiques culturales (den Biggelaar, 2003). Or, les pratiques de conservation des sols ont certes un effet sur l'érosion mais aussi sur beaucoup d'autres indicateurs de santé des sols qui peuvent à leur tour influencer positivement le rendement, d'où le risque bien réel de créer un biais d'interprétation. Il serait donc périlleux d'attribuer la baisse de productivité des cultures uniquement à l'érosion comme variable de santé des sols dans ce contexte. Une analyse plus détaillée prenant en considération plus d'attributs régionaux, ou encore un plus grand nombre d'observations, ainsi que d'autres types de régression ou de méthodes d'analyses des données serait nécessaire pour isoler plus clairement les liens entre ces variables.

Conclusion de l'effet de la santé des sols sur la productivité des cultures

Les analyses réalisées avec une technique d'apprentissage machine « Random forest » dans les différentes cultures et horizons de sol ont permis d'identifier parmi des variables pédoclimatiques ou liées à la santé des sols, lesquelles affectent le plus la productivité des cultures. Tel qu'attendu, les effets plus importants sont obtenus avec les variables climatiques. La chaleur et la température (UTM) ont une influence positive et la plus importante, tandis que le bilan hydrique a parfois des effets confondants avec la chaleur et négatifs avec les rendements, dans les régions de production du maïs et du soya, notamment. Les relations entre les variables de santé de sols (condition physique des sols et celles liées à l'état de la matière organique et de la chimie-fertilité) et la productivité des cultures sont plus faibles et les effets sont parfois confondants, mais deux variables présentent des relations plus importantes et attendues. L'état structural révélé par l'IQPSM dans l'horizon Ap1 a un effet positif sur la productivité, tandis que l'érosion des sols a un effet négatif. Les teneurs en Al et Fe Mehlich-3 ont des effets négatifs sur les rendements soulignant l'effet des sols podzolisés. Les teneurs en Cu et Zn Mehlich-3 ont un effet positif sur les rendements probablement en lien avec des apports plus importants d'engrais de ferme qui pourraient avoir un effet plus bénéfique pour les cultures dans des sols moins fertiles comme les sols sableux.

Il ressort dans cette analyse des relations parfois inattendues ou incohérentes qui peuvent être liées à des effets confondants entre les variables et des hasards liés au faible nombre d'observations. Malgré les coûts déjà importants et ce faible nombre d'observations recueillies dans le cadre de l'EESSAQ, il est suggéré, dans de futures études, d'augmenter le nombre d'observations et d'inclure d'autres facteurs pouvant affecter la productivité, comme celles définissant les pratiques culturales, les pratiques de conservation des sols, les apports en engrais minéraux et en amendements organiques, entre autres. Par ailleurs, des événements météorologiques imprévus comme les précipitations ponctuelles intenses, peuvent influencer et fausser les interprétations de l'effet du bilan hydrique, et d'autres indicateurs climatiques pourraient être inclus, tout comme des variables catégoriques représentant les différents types de sols si le nombre d'observations le permet.

RÉFÉRENCES

- Agrométéo Québec. 2023. Moyenne des degrés-jours (base 0°C) du 1^{er} avril au 31 octobre. Consulté en ligne : <https://www.agrometeo.org/index.php/atlas/map/moyenne30/base0/1979-2008/false>,
- Agrométéo Québec. 2023. Cumule moyen des précipitations (P) moins l'évapotranspiration potentielle (ETP) du 1^{er} mai au 31 octobre. Consulté en ligne : <https://www.agrometeo.org/index.php/atlas/map/moyenne12/precipetp/1974-2003/false>
- Angers, D.A., Changes in soil aggregation and organic carbon under corn and alfalfa. 1992. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:1244-9.
- Belon, E., Boisson, M., Deportes, I.Z., Eglin, T.K., I. Feix, I., Bispo, A.O., Galsomies, L., Leblond, S. et Guellier, C.R. 2012. An inventory of trace elements inputs to French agricultural soils. *Sci. Total Environ.*, 439: 87–95. doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.09.011.
- Bernard, C., Laverdière, M.R. 1992. Spatial redistribution of Cs-137 and soil erosion on Orléans Island, Québec. *Can. J. Soil Sci.*, 72:543-554.
- Bolinder, M.A., Kätterer T., Andrén O., Parent L.E. 2012. Estimating carbon inputs to soil in forage-based crop rotations and modeling the effects on soil carbon dynamics in a Swedish long-term field experiment. *Can J Soil Sci*, 92:821–833. <https://doi.org/10.1139/CJSS2012-036>
- Botta, G.F., Becerra, A.T. et Tourn, F.B. 2009. Effect of the number of tractor passes on soil rut depth and compaction in two tillage regimes. *Soil Tillage Res*, 103: 381–386. doi: 10.1016/j.still.2008.12.002.
- Bretagnolle, V., B. Gaufre, H. Meiss, and I. Badenhauer. 2011. The Role of Grassland Areas within Arable Cropping Systems for the Conservation of Biodiversity at the Regional Level. Dans *Grassland productivity and ecosystem services*. Lemaire, G., Hodgson, J. et Chabbi, A. (Eds). Pp 251-260.
- Claassen, R., Bowman, M., McFadden, J., Smith, D. et Wallander, S. 2018. Tillage intensity and conservation cropping in the United States. United State Department of Agriculture. Economic Information Bulletin Number 197.
- Clearwater, R.L., T. Martin et T. Hoppe (Eds). 2016. L'agriculture écologiquement durable au Canada : Série sur les indicateurs agroenvironnementaux - Rapport no 4. Ottawa, Ontario : Agriculture et Agroalimentaire Canada.
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2010. Guide de référence en fertilisation. 2e Édition. 473 pages.
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2020. Valeurs références pour les volumes et les concentrations d'éléments fertilisants dans les effluents d'élevage, 39 p.
- Chen, S., Arrouays, D., Leatitia Mulder, V., Poggio, L., Minasny, B., Roudier, P., Libohova, Z., Lagacherie, P., Shi, Z., Hannam, J., Meersmans, J., Richer-de-Forges, A.C. et Walter, C. 2022. Digital mapping of Global Soil Map soil properties at a broad scale: A review. *Geoderma*, 409: 115567. doi: 10.1016/j.geoderma.2021.115567.
- DeJong-Hughes, J. et Daigh, A. 2017. Upper Midwest tillage guide. University of Minnesota Extension Service et North Dakota State University.
- den Biggelaar, C., Lal, R., Wiebe, K. et Breneman, V. 2003. The Global Impact of Soil Erosion on Productivity. I: Absolute and Relative Erosion-induced Yield Losses. *Adv. Agron.*, 81: 1–48. doi: 10.1016/S0065-2113(03)81001-5.

- Doran, J.W. et Parkin, T.B. 2015. Defining and Assessing Soil Quality. In: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., and Stewart, B.A. (Eds), SSSA Special Publications. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA. p. 1–21.
- Duiker, S.W. 2004. Avoiding Soil Compaction. Penn State Extension, College of Agricultural Sciences, Agricultural Research and Cooperative Extension.
- Eisenhauer, N., Schielzeth, H., Barnes, A., Barry, K., Bonn, A., Brose, U., Bruehlheide, H., Buchmann, N., Buscot, F., Ebeling, A., Ferlian, O., Freschet, G.T., Giling, D.P., Hättenschwiler, S., Hillebrand, H., Hines, J., Isbell, F., Koller-France, E., König-Ries, B., Kroon, H. et Jochum, M. 2019. A multitrophic perspective on biodiversity–ecosystem functioning research. *Adv Ecol Res*, 61: 1–54. doi: 10.1016/bs.aecr.2019.06.001.
- Elustondo, J., Angers, D.A., Laverdière, 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. *Can. J. Soil Sci.*, 70:395-402.
- Fan, J., McConkey, B.G., Liang, B.C., Angers, D.A., Janzen, H.H., Kröbel, R., Cerkowniak, D.D. et Smith, W.N. 2019. Increasing crop yields and root input make Canadian farmland a large carbon sink. *Geoderma*, 336: 49–58. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.08.004.
- Franzluebbers, A.J., Pershing, M.R., Crozier, C., Osmond, D. et Shroeder-Moreno, M. 2018. Soil-Test Biological Activity with the Flush of CO₂ : I. C and N Characteristics of Soils in Corn Production *Soil Sci Soc Am J*, 82 : 685–695.
- Franzluebbers, A.J., et Stuedemann, J.A. 2015. Does grazing of cover crops impact biologically active soil carbon and nitrogen fractions under inversion or no tillage management? *J Soil Water Cons*, 70 : 365–373.
- Gasser, M.-O. Biswas, A., Bernard, C., A., Martinelli, G., Easher, T.H., 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. Bolinder, M., Martel, S., Poulin, D., Beaudin, I., Michaud, A.R. et Drouin, A. 2010. Impacts agroenvironnementaux associés à la culture et au prélèvement de biomasses végétales agricoles pour la production de bioproduits industriels. Rapport final. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement. Québec. 197 p. + annexes.
- Gasser, M.-O., Bossé C., Clément, C.C., Bernard, C., Mathieu, J.-B., Tremblay, M.-E. 2023. 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. 197. 186 pages.
- Gasser, M.-O., Tremblay, M.-E. et Allard, F. 2019a. Validation des outils préconisés pour réduire la saturation des sols en phosphore par une analyse de l'état des sols et du bilan de phosphore dans une région à forte densité animale. Rapport final. IRDA. 34 pages + Annexes.
- Gasser, M.-O., Allard, F., Bernard, C., Bossé, C. et Tremblay, M.-E. 2019b. Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec – Protocole pour l'échantillonnage des sols. IRDA. 35 p.
- Giroux, M., Deschênes, L., Chassé, R. 2008. Les éléments traces métalliques (ÉTM) – Leur accumulation dans les sols agricoles du Québec. Consulté en ligne : <https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/75071/les-elements-traces-metalliques-etm-leur-accumulation-dans-les-sols-agricoles-du-quebec>
- González-Rosado, M., Parras-Alcántara, L., Aguilera-Huertas, J., Lozano-García, B. 2022. Crop Diversification Effects on Soil Aggregation and Aggregate-Associated Carbon and Nitrogen in Short-Term Rainfed Olive

Groves under Semiarid Mediterranean Conditions. *Horticulturae*, 8 : 618. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8070618>.

- Hay, H. 2012. Top seven factors in Crop production. University of Nebraska-Lincoln Extension in Gage County, Lincoln, Nebraska, États-Unis.
- Håkansson, I. et Reeder, R.C. 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load extent, persistence and crop response. *Soil Tillage Res*, 29: 277-304.
- Heung, B., Ho, H.C., Zhang, J., Knudby, A., Bulmer, C.E. et Schmidt, M.G. 2016. An overview and comparison of machine-learning techniques for classification purposes in digital soil mapping. *Geoderma*, 265: 62–77. doi: 10.1016/j.geoderma.2015.11.014.
- Houde, S., Thivierge, M.-N., Fort, F., Bélanger, G., Chantigny, M.H., Angers, D.A., et Vanasse, A. 2020. Root growth and turnover in perennial forages as affected by management systems and soil depth. *Plant and Soil*, 451. 10.1007/s11104-020-04532-1.
- Jeong, J.H., Resop, J.P., Mueller, N.D., Fleisher, D.H., Yun, K., Butler, E.E., Timlin, D.J., Shim, K.-M., Gerber, J.S., Reddy, V.R. et Kim, S.-H. 2016. Random Forests for Global and Regional Crop Yield Predictions (J.L. Gonzalez-Andujar, editor). *PLoS ONE* 11(6): e0156571. doi: 10.1371/journal.pone.0156571.
- Karlen, D.L. 2005. Productivity. In: Hillel, D., editor, *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Elsevier, Oxford. p. 330–336
- Lajoie, P.G. 1975. Les terres agricoles du Québec méridional: distribution, étendue et qualité. Agriculture Canada, Publ. No. 1556. 62 p.
- Lehmann, J., Bossio, D.A., Kögel-Knabner, I. et Rillig, M.C. 2020. The concept and future prospects of soil health. *Nat Rev Earth Environ*, 1: 544–553. doi: 10.1038/s43017-020-0080-8.
- Logan, T., Aoun, A., Bourgault, P., Dupuis, É., Huard, D., Lavoie, J., Rondeau-Genesse, G., Smith, T. James, Alegre, R., Biner, S., Caron, D., Ehbrecht, C., Fyke, J., Keel, T., Labonté, M.-P., Lierhammer, L., Jwen-Fai, L., Quinn, J., Roy, P., Squire, D., Ag, S., Tanguy, M. et Whelan, C. 2023. Ouranosinc/xclim: v0.40.0 (v0.40.0). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7535677>.
- Maillard, É., Angers, D.A., Chantigny, M., Lafond, J., Pageau, D., Rochette, P., Lévesque, G., Leclerc, M.-L., Parent, L.-E. 2016. Greater accumulation of soil organic carbon after liquid dairy manure application under cereal-forage rotation than cereal monoculture. *Agric Ecosyst Environ*; 233:171-8.
- 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. *Can. J. Soil Sci.*, 56: 373-383.
- Martínez-Mena, M.; Carrillo-López, E.; Boix-Fayos, C.; Almagro, M.; Franco, N.G.; Díaz-Pereira, E.; Montoya, I.; de Vente, J. 2020. Long-term effectiveness of sustainable land management practices to control runoff, soil erosion, and nutrient loss and the role of rainfall intensity in Mediterranean rainfed agroecosystems. *Catena*, 187, 104352.
- Massicotte, D., Chouinard, P., Ménard, O. Laverdière, M.R. 2000. Module 2. Impacts sur la couverture de résidus. Feuillet 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.
- Matus, F.J. 2021. Fine silt and clay content is the main factor defining maximal C and N accumulations in soils: a meta-analysis. *Sci Rep*, 11. doi: 10.1038/s41598-021-84821-6.
- Mokma, D.L., Sietz, M.A. 1992. Effects of soil erosion on corn yields on Marlette soils in south-central Michigan. *J. Soil Water Cons.*, 47: 325-327.

- Nunes, A.L., Bartz, M.L., Mello, I., Bortoluzzi, J., Roloff, G., Fuentes Llanillo, R., Canalli, L., Wandscheer, C.A.R. et Ralisch, R. 2020a. No-Till System Participatory Quality Index in land management quality assessment in Brazil. doi : 10.1111/ejss.12943.
- Nunes, M.R., Karlen, D.L. et Moorman., T.B. 2020b. Tillage intensity effects on soil structure indicators – A US meta-analysis. *Sustainability*, 12, 2071.
- Nunes, M.R., van Es, H.M., Veum, K.S., Amsili, J.P. et Karlen, D.L. 2020c. Anthropogenic and Inherent Effects on Soil Organic Carbon across the U.S. *Sustainability*, 12: 5695. <https://doi.org/10.3390/su12145695>.
- Padarian, J., Minasny, B., et McBratney, A.B. 2020. Machine learning and soil sciences: a review aided by machine learning tools. *SOIL*, 6: 35–52. doi: 10.5194/soil-6-35-2020.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Alewell, C., Lugato, E. et Montanarella, L. 2015. Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land use policy*, 48: 38–50. doi: 10.1016/j.landusepol.2015.05.021.
- Perron, V. et Hébert, M. 2007. Caractérisation des boues d'épuration municipales. Partie I : Paramètres agronomiques. *Vecteur Environnement*, 40 : 48-52.
- R Core Team. 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>
- Rigon, J.P.G., Franzluebbbers, A.J., Calonego, J.C. 2020. Soil aggregation and potential carbon and nitrogen mineralization with cover crops under tropical no-till. *J. Soil Water Conserv.*, 75: 601–609.
- Roberts, W.P. et Chan, K.Y. 1990. Tillage-induced increases in carbon dioxide loss from soil. *Soil Tillage Res.*, 17: 143-151.
- Sajid, S.S., Shahhosseini, M., Huber, I., Hu, G. et Archontoulis, S.V. 2022. County-scale crop yield prediction by integrating crop simulation with machine learning models. *Front Plant Sci*, 13. doi: 10.3389/fpls.2022.1000224.
- Samson, N., Parent, L.-E., Pellerin, A. Khiari, L. et Landry. C. 2008. Fertilisation en phosphore de la pomme de terre - Recommandations. CRAAQ. Publication EVC-028. 10 p.
- Schjønning, 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.
- Sivakumar, M.V.K., Manu, A., Virmani, S.M. et Kanemasu, E.T. 2015. Relation between Climate and Soil Productivity in the Tropics. In: Lal, R. and Sanchez, P.A., editors, *SSSA Special Publications*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA. p. 91–119
- Six, J., Elliot, E.T. et Paustian, K. 1999. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63:1350–1358.
- Smith, W.N., Grant, B.B., Desjardins, R.L., Qian, B., Hutchinson, J. et Gameda, S. 2009. Potential impact of climate change on carbon in agricultural soils in Canada 2000-2099. *Clim Change*, 93: 319–333. doi: 10.1007/s10584-008-9493-y.
- Svedin, J.D., Veum, K.S., Ransom, C.J., Kitchen, N.R. et Anderson, S.H. 2023. An identified agronomic interpretation for potassium permanganate oxidizable carbon. *Soil Science Soc of Amer J* 87(2): 291–308. doi: 10.1002/saj2.20499.

- Tabi, M., Tardif, L., Carrier, D., 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. Québec, Canada. 65 pages et annexes.
- Tella, M., Bravin, M.N., Thuriès, L., Cazevielle, P., Chevassus-Rosset, C., Collin, B., Chaurand, P., Legros, S. et Doelsch, E. 2016. Increased zinc and copper availability in organic waste amended soil potentially involving distinct release mechanisms. *Environ Pollution*, 212: 299–306. doi: 10.1016/j.envpol.2016.01.077.
- Telles, T.S., Righetto, A.J., Lourenço, M.A.P. et Barbosa, G.M.C. 2020. No-tillage system participatory quality index. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.*, 24 : 128-133.
- Tiemann, L.K., Grandy, A.S., Atkinson, E.E., Marin-Spiotta, E. et Mcdaniel, M.D. 2015. Crop rotational diversity enhances belowground communities and functions in an agroecosystem. *Ecol Lett*, 18: 761–771. doi: 10.1111/ele.12453.
- Ungureanu, N., Vladut, V., Biris, S-S., Cujbescu, D., Vladut, D.I., Gheorghita, N.E. et Caba, I. 2017. Influence of the number of passes on soil compaction – A review. Conférence: 6th International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development (TE-RE-RD). A: Moieciu de Sus, Roumanie.
- Verity, C.E. et Anderson, D.W. 1990. Soil erosion effects on soil quality and yield. *Can. J. Soil Sci.*, 70: 471–484.
- Veum, K.S., Zuber, S.M., Ransom, C., Myers, R.L., Kitchen, N.R. et Anderson, S.H. 2022. Reduced tillage and rotational diversity improve soil health in Missouri. *Agron. J.*, 114: 3027–3039. doi: 10.1002/agj2.21156.
- Vilsaint, C.L., Aiyer, S.M., Wilson, M.N., Shaw, D.S. et Dishion, T.J. 2013. The ecology of early childhood risk: A canonical correlation analysis of children's adjustment, family, and community context in a high-risk sample. *J Primary Prev*, 34: 261–277. doi: 10.1007/s10935-013-0305-4.
- Wade, J., Culman, S.W., Logan, J.A.R., Poffenbarger, H., Demyan, M.S., Grove, J.H., Mallarino, A.P., McGarthj, J., Ruark, M. et West, J.R. 2020. Improved soil biological health increases corn grain yield in N fertilized systems across the Corn Belt. *Sci Rep*, 10. doi: 10.1038/s41598-020-60987-3.
- Wall, G.J., Coote, D.R., Pringle, E.A. et Shelton I.J. (éditeurs). 2002. RUSLE-CAN — Équation universelle révisée des pertes de sol pour application au Canada. Manuel pour l'évaluation des pertes de sol causées par l'érosion hydrique au Canada. Direction générale de la recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada, No de la contribution AAC2244F, 117 p.
- Werling, B.P., Dickson, T.L., Isaacs, R., Gaines, H., Gratton, C., Gross, K.L., Liere, H., Malmstrom, C.M., Meehan, T.D., Ruan, L., Robertson, B.A., Robertson, G.P., Schmidt, T.M., Schrotenboer, A.C., Teal, T.K., Wilson, J.K et Landis, D.A. 2014. Perennial grasslands enhance biodiversity and multiple ecosystem services in bioenergy landscapes, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111 : 1652–1657.
- Williams, H., Colombi, T. et Keller, T. 2020. The influence of soil management on soil health: An on-farm study in southern Sweden. *Geoderma*. 114010.
- Xu, X., Gao, P., Zhu, X., Guo, W., Ding, J., Li, C., Zhu, M. et Wu, X. 2019. Design of an integrated climatic assessment indicator (ICAI) for wheat production: A case study in Jiangsu Province, China. *Ecol Indic*, 101: 943–953. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.01.059.
- Yang, T., Siddique, K. H. M., et Liu, K. 2020. Cropping systems in agriculture and their impact on soil health-A review. *Global Ecol Cons*, 23. doi : 10.1016/j.gecco.2020.e01118
- Ziyae, A. et Roshani, M.R. 2012. A survey study on Soil compaction problems for new methods in agriculture. *Int. Res. J. App. Basic Sci.*, 3:1787-1801.

ANNEXE A

Résultats des analyses de variance

Tableau 17 : Effets du système de cultures et du matériau parental sur les indicateurs de santé des sols.

Effets		MVA	Macro-porosité	DMP	M.O.	N _{minéralisé}	CO ₂ dégagé	pH	P	Cu	Zn
		----- Probabilité de F -----									
Ap1	Système de cultures (C)	<0,001*	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,003
	Matériau parental (M)	NS	<0,001	<0,001	0,09	0,001	0,01	<0,001	<0,001	0,06	0,02
	C × M	0,04	0,002	0,05	0,02	0,02	NS	0,02	0,07	0,10	NS
Ap2	Système de cultures (C)	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,003
	Matériau parental (M)	NS	0,002		NS	<0,001	0,005	0,004	<0,001	0,03	0,11
	C × M	0,002	NS		0,01	0,002	NS	NS	NS	NS	NS
B	Système de cultures (C)	<0,001	<0,001		0,002	0,001	<0,001	<0,001	0,001	<0,001	NS
	Matériau parental (M)	NS	<0,001		NS	NS	0,08	<0,001	0,004	<0,001	NS
	C × M	0,12	0,05		0,07	0,10	NS	0,06	0,18	NS	NS

*Les valeurs de probabilité de F en gras sont inférieures à 0,10. Les autres valeurs entre 0,10 et 0,20 sont présentées pour indiquer des tendances
NS : non-significatif

Tableau 18 : Effets de l'intensité du travail de sol et du matériau parental sur les indicateurs de santé des sols dans les systèmes en cultures annuelles.

Effets		MVA	Macro-porosité	DMP	M.O.	N _{minéralisé}	CO ₂ dégagé	pH	P	Cu	Zn
		----- Probabilité de F -----									
Ap1	Travail de sol (T)	NS	0,02*	0,03	0,05	< 0,001	0,15	0,04	0,19	NS	NS
	Matériau parental (M)	NS	0,004	< 0,001	0,05	0,005	0,01	0,04	0,04	0,08	0,03
	T × M	NS	NS	NS	NS	0,15	NS	NS	NS	NS	NS
Ap2	Travail de sol (T)	NS	NS		NS	0,004	NS	0,16	0,02	NS	NS
	Matériau parental (M)	NS	0,015		0,15	0,007	0,02	0,03	0,015	0,08	0,04
	T × M	NS	NS		0,20	NS	NS	NS	NS	0,09	NS
B	Travail de sol (T)	0,15	NS		0,18	NS	NS	NS	0,08	NS	NS
	Matériau parental (M)	NS	< 0,001		NS	NS	< 0,001	0,05	0,05	0,002	NS
	T × M	0,03	NS		0,05	NS	0,08	NS	0,17	NS	NS

*Les valeurs de probabilité de F en gras sont inférieures à 0,10. Les autres valeurs entre 0,10 et 0,20 sont présentées pour indiquer des tendances
NS : non-significatif

Tableau 19 : Effets de la fréquence d'apport d'amendements organiques et son interaction avec le système de culture et les matériaux parentaux sur les indicateurs de santé des sols.

Effets		MVA	Macroporosité	DMP	M.O.	N minéralisé	CO ₂ dégagé	pH	P	Cu	Zn
		----- Probabilité de F -----									
Ap1	Fréquence d'apport (AO)	NS	NS	NS	0,09	0,04	0,15	NS	< 0,001	< 0,001	< 0,001
	Système de cultures (C)	< 0,001*	NS	0,002	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,002
	Matériau parental (M)	NS	< 0,001	< 0,001	0,02	< 0,001	< 0,001	0,001	< 0,001	0,13	0,002
	C x AO	NS	NS	0,11	NS	NS	NS	NS	0,11	0,008	0,004
	AO x M	NS	NS	NS	NS	NS	0,01	NS	NS	0,19	NS
Ap2	Fréquence d'apport AO	NS	NS		0,17	0,05	0,13	NS	0,001	< 0,001	0,004
	Système de cultures (C)	< 0,001	0,007		0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
	Matériau parental (M)	NS	< 0,001		0,03	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,01	0,02
	C x AO	NS	0,18		NS	NS	NS	NS	NS	0,06	0,03
	AO x M	NS	NS		NS	NS	0,08	NS	0,16	0,16	NS
B	Fréquence d'apport AO	NS	NS		NS	0,13	0,16	NS	0,02	0,01	0,009
	Système de cultures (C)	0,006	0,001		0,02	0,002	< 0,001	0,001	0,001	0,001	0,16
	Matériau parental (M)	NS	< 0,001		NS	NS	0,05	0,02	0,02	< 0,001	NS
	C x AO	NS	NS		NS	NS	NS	NS	NS	0,05	NS
	AO x M	0,03	NS		NS	0,13	NS	NS	0,16	0,15	NS

*Les valeurs de probabilité de F en gras sont inférieures à 0,10. Les autres valeurs entre 0,10 et 0,20 sont présentées pour indiquer des tendances
NS : non-significatif

Tableau 20 : Effet du risque de compaction et du matériau parental sur les indicateurs de santé des sols.

Effets		MVA	Macro-porosité	DMP	M.O.	N _{minéralisé}	CO ₂ dégagé	pH	P	Cu	Zn
		----- Probabilité de F -----									
Ap1	Risque de compaction (RC)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,001
	Matériau parental (M)	NS*	< 0,001	< 0,001	0,03	< 0,001	0,0004	< 0,001	< 0,001	0,006	< 0,001
	RC x M	NS	0,05	NS	NS	0,05	NS	0,10	NS	NS	0,12
Ap2	Risque de compaction (RC)	< 0,001	< 0,001		< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
	Matériau parental (M)	NS	< 0,001		0,06	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
	RC x M	0,007	NS		0,09	0,14	NS	NS	NS	NS	NS
B	Risque de compaction (RC)	< 0,001	< 0,001		< 0,001	0,01	< 0,001	< 0,001	0,0001	0,005	0,04
	Matériau parental (M)	NS	< 0,001		NS	NS	0,01	< 0,001	< 0,001	< 0,001	NS
	RC x M	0,02	0,12		NS	NS	0,18	0,19	0,14	NS	NS

*Les valeurs de probabilité de F en gras sont inférieures à 0,10. Les autres valeurs entre 0,10 et 0,20 sont présentées pour indiquer des tendances
NS : non-significatif