

Rapport 4 de l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec Recommandations pour le suivi de la santé des sols au Québec



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

Co-auteur : Denis Angers, Ph.D.

Collaborateurs : Catherine Bossé, agr. B. Sc.
Chedzer-Clarc Clément, Ph. D.
Eduardo Chavez Benalcazar, B. Sc.
Jean-Benoît Mathieu, M. Sc.
Nyck Rochel Occean, agr., 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., Angers, D. 2023. Rapport 4 de l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec : Recommandations pour le suivi de la santé des sols au Québec. Rapport final présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). IRDA. 18 pages.

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

Équipe de réalisation du projet

Responsable scientifique

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

Chargés de projet et prof. de recherche :

Catherine Bossé, agr. B. Sc.

Marie-Ève Tremblay, agr., M. Sc.

Francis Allard, agr., M. Sc.

Chedzer-Clarc Clément, Ph. D.

Jean-Benoît Mathieu, M. Sc.

Équipe de rédaction du rapport

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

Denis, Angers, Ph. D.

Collaborateurs IRDA

Michèle Grenier, M. Sc.

Myck Wu, Ph. D.

Eduardo Chavez Benalcazar, B. Sc.

Nyck Rochel Océan, agr., M. Sc.

Pierre-Luc Lemire, Tech. A.

Rachelle Fecteau, Tech. A.

Philippe Fortin, Tech. A.

Collaborateurs externes

Lucie Grenon, agr., B. Sc.

Michaël Leblanc, Ph. D.

Mikaël Guillou, M.Sc.

Denis Angers, Ph.D.

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

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

Le maintien de la santé des sols est un enjeu vital. Il est donc essentiel de se doter d'un système de suivi dans le temps à long terme de l'état de santé des sols du Québec. Après avoir passé en revue quelques exemples de système de suivi de la santé/qualité des sols, nous proposons quelques approches qui pourraient être adaptées aux conditions biophysiques et socio-économiques du Québec.

On peut définir trois grands types de suivi de la santé des sols. D'abord, les systèmes de suivi systématique de la santé des sols qui impliquent la mise en place de sites d'observation géolocalisés et qui font l'objet de mesures répétées dans le temps de la santé des sols, généralement de 5 à 10 ans. Les sites de mesure peuvent être répartis de façon systématique (par exemple une grille) ou de façon raisonnée en tenant compte de l'importance et de la répartition des types de sol ou d'usage des terres et du climat. Deuxièmement, les systèmes de suivi rétrospectif qui font appel à des données existantes et permettent d'évaluer l'évolution de la santé des sols au cours des années ou décennies passées. Enfin, on pourrait faire appel à des systèmes participatifs pour valoriser la prise de données chez les producteurs effectuée soit à l'aide de kits de mesure de la santé des sols ou à l'aide d'application de téléphone intelligent.

Nous dégageons donc trois propositions pour le suivi de la santé des sols du Québec.

1. Suivi à long-terme des sites de l'EESSAQ avec un retour périodique sur les sites cultivés à tous les 10 ans.
2. Une analyse rétrospective de l'évolution de la santé des sols du Québec en valorisant les données existantes d'analyse de fertilité des sols effectuées par les producteurs (par exemple dans le cadre des PAEFs).
3. Une étude de faisabilité des approches participatives en évaluant le potentiel qu'offrent les mesures de santé des sols effectuées par les producteurs soit à l'aide de kits de la santé des sols ou à l'aide d'applications sur téléphone intelligent.

TABLE DES MATIERES

Résumé	i
Liste des tableaux	iii
Liste des figures	iii
Contexte de l'étude	4
Objectifs.....	4
Présentation des résultats en cinq rapports	4
Revue de littérature.....	5
Les systèmes de suivi systématique	6
Les systèmes de suivi rétrospectif faisant appel à des données existantes.....	7
Les systèmes participatifs.....	9
Kits de mesure de la santé des sols	9
Applications sur téléphone intelligent	9
Proposition d'une méthode de suivi (monitoring) de la santé des sols agricoles du Québec	11
Suivi à long-terme des sites de l'EESSAQ.....	11
Choix des indicateurs.....	11
Récurrence du suivi	12
Capitalisation des analyses de sols des exploitations agricoles	12
Approche participative du suivi de la santé des sols.....	13
Conclusion	14
Références	15

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Liste des indicateurs retenus et des propriétés analysées pour la suite de l'EESSAQ.	12
Tableau 2 : Liste des indicateurs non-retenus pour la suite de l'EESSAQ.	12
Tableau 3 : Liste des indicateurs et des propriétés analysées à ajouter pour la suite de l'EESSAQ.	12

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Distribution spatiale de la MOS des sols agricoles du Québec 1995-1999 (Beaudet <i>et al.</i> 2004).	8
Figure 2 : Distribution spatiale de la MOS des sols agricoles du Québec 2010-2018 (Gasser <i>et al.</i> 2022).	8

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 agricoles 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

REVUE DE LITTÉRATURE

Les sols sont généralement considérés comme une ressource non-renouvelable à l'échelle de la vie humaine. Étant donné leur importance capitale dans la production alimentaire et les divers services écosystémiques (préservation de la ressource en eau, régulation du climat, réservoir de biodiversité) qu'ils rendent (FAO et ITPS, 2016), leur préservation est essentielle.

La surface de sol occupée par les activités agricoles était estimée à environ 3,4 millions d'hectares au Québec en 2011 ([Statistiques Canada](#)). Les superficies cultivées occupaient quant à elles 1,75 millions d'ha en 2021, soit près de 1 % du territoire ([Statistiques Canada 2022](#)). C'est donc une ressource précieuse essentielle, voire vitale, pour la production alimentaire du Québec et son autonomie à long terme.

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

Le maintien de la qualité ou de la santé des sols est donc un enjeu vital. Plusieurs définitions de la santé ou qualité des sols ont été proposées. Quoique certains utilisent indifféremment les expressions santé et qualité des sols (Acton et Gregorich, 1995), d'autres, proposent que la qualité des sols mette l'accent sur les caractéristiques intrinsèques (permanentes) du sol, alors que la santé des sols met l'emphase sur l'aspect dynamique et gérable du sol (Alain Brauman, IRD, France, Comm. personnelle). Par ailleurs, la FAO définit la santé des sols comme étant la capacité continue du sol à fonctionner comme un système vivant vital, dans les limites des écosystèmes et de l'utilisation des terres, pour soutenir la productivité biologique, promouvoir la qualité de l'air et de l'eau, et maintenir la santé végétale, animale et humaine (FAO et ITPS, 2016).

Dans cette définition de la FAO, la notion de « capacité continue du sol à fonctionner » met l'emphase sur une des caractéristiques essentielles des sols, c'est son évolution dans le temps. Ce suivi dans le temps repose sur le suivi (monitoring) de son évolution sur une échelle de temps long (>10 ans). L'importance de mettre en place un tel système au Québec avait déjà été soulevée à la suite du rapport de Tabi et al. (1990) par la mise en place d'un

observatoire de la qualité des sols (Rompré, 1994). Mais à notre connaissance, cet observatoire n'existe plus. L'importance du suivi de la qualité des sols a récemment été réitérée (Angers et al., 2022).

Le suivi dans le temps des propriétés du sol définissant sa santé ou sa qualité pose de nombreux défis. Certaines propriétés n'évoluent pas significativement à l'échelle de la vie humaine, par exemple la granulométrie ou la minéralogie des argiles. D'autres, telles que le pH, la teneur en carbone (ou matière organique) ou la teneur en P disponible, évoluent à l'échelle de quelques années, généralement sous l'influence du climat ou des pratiques de gestion. Certaines sont beaucoup plus variables dans le temps et peuvent varier de façon importante à l'intérieur d'une même saison. On pense ici aux éléments ou composés solubles tels que les teneurs en nitrate ou C soluble, ainsi qu'à certaines propriétés physiques telles que le taux d'infiltration de l'eau ou la porosité dans l'horizon de surface. Les propriétés biologiques (et microbiologiques) comme la biomasse microbienne ou les populations de vers de terre, varient aussi dans des pas de temps très variables et souvent très courts. Cette sensibilité temporelle est à prendre en compte dans le choix des indicateurs de santé/qualité des sols qui seront retenus dans un dispositif de suivi à long-terme. Il s'agit de s'assurer que certaines variations temporelles rapides ne viennent pas masquer des évolutions et tendances à long-terme. L'évolution dans les méthodes d'échantillonnage et d'analyses vient aussi ajouter un élément d'incertitude à prendre en compte en prévision d'un suivi temporel à moyen ou long terme.

Après avoir passé en revue quelques exemples de système de suivi de la santé/qualité des sols, nous proposons quelques approches qui pourraient être adaptées aux conditions biophysiques et socio-économiques du Québec.

Les systèmes de suivi systématique

L'un des plus connus et exhaustifs systèmes de suivi est le RMQS (Réseau de Mesure de la Qualité des Sols) français (Arrouays et al., 2003). Mis en place autour de 2002, le RMQS a l'ambition de mesurer une très large gamme d'indicateurs de la qualité des sols sur un horizon de temps très long. Il repose sur le suivi de 1650 sites régulièrement répartis sur le territoire agricole métropolitain (28 millions d'ha), selon une grille systématique de maille carrée de 16 km de côté. Les prélèvements sont prévus environ tous les 10 ans. En plus de la description pédologique (profil pédologique), une très large gamme de propriétés chimiques, biologiques et physiques sont analysées. Des échantillons dans tous les horizons décrits sont prélevés et conservés au Conservatoire national d'échantillons de sol de France. Les objectifs du RMQS (Arrouays et al., 2021) impliquent des choix stratégiques en vue de: (i) pouvoir disposer de statistiques non biaisées sur l'état des sols à l'échelle nationale (fonction de bilan et d'état des lieux initial); (ii) couvrir toutes les occupations des sols; (iii) réaliser un suivi de cet état et de détecter des évolutions temporelles; (iv) détecter d'éventuels gradients (par exemple de contamination diffuse) et de pouvoir produire des cartes de l'état des sols de France; (v) constituer une banque d'échantillons de sols pour pouvoir faire (ou refaire) des analyses a posteriori. À ces objectifs généraux s'ajoutent des préoccupations majeures provenant d'enjeux émergents considérés comme prioritaires comme le suivi des stocks de carbone dans les sols ou la problématique des sites pollués, en particulier, en ETM dans les sols.

La Nouvelle-Zélande a tout récemment mis en place un système de suivi des stocks de carbone du sol. Le carbone organique (composant essentiel de la matière organique du sol) est généralement considéré comme le meilleur indicateur de la santé/qualité des sols (Liptzin et al., 2022). Étant donné certaines similitudes dans les contextes bio-physiques et socio-économiques entre la NZ et le Québec, il est intéressant de passer en revue ce système. Ce nouveau système consiste à suivre (monitor) les stocks de carbone sur 500 sites sur le territoire agricole (13,5 millions d'ha) de la Nouvelle-Zélande. Des échantillons de sols sont prélevés jusqu'à une profondeur de 60 cm par

couche de 10 cm. Environ une centaine de sites sont échantillonnés dans chacune des cinq grandes classes d'usage des terres. Débuté en 2018, il est prévu que le suivi se fera à tous les cinq ans.

(<https://www.landcareresearch.co.nz/publications/soil-horizons/soil-horizons-articles/an-update-on-the-national-soil-carbon-benchmarking-and-monitoring-system-for-agricultural-land-in-new-zealand/>).

Les systèmes de suivi rétrospectif faisant appel à des données existantes

En France, la Base de Données des Analyses de Terre (BDAT) regroupe les résultats des analyses de sol (terre) demandées par les agriculteurs depuis 1990, soit plus de 2 millions d'échantillons d'horizons de surface de sols cultivés, prélevés en France entre 1990 et 2014. Ce sont ainsi plus de 26 millions de résultats d'analyses qui sont regroupées dans la base de données. (<https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/base-de-donnees-danalyses-des-terres-bdat-62>). La BDAT regroupe au total 31 paramètres permettant d'évaluer les propriétés physico-chimiques des sols (pH, carbone, capacité d'échange cationique, taux de saturation), leur fertilité (azote, carbone organique, phosphore, potassium, magnésium, sodium), leurs teneurs en métaux et métalloïdes (bore, cuivre, fer, manganèse, zinc) et enfin, leur texture (argile, limon, sable). Les données statistiques agrégées par canton, sont disponibles pour 5 périodes : 1990-1994, 1995-1999, 2000-2004, 2005-2009, 2010-2014. La répartition des résultats d'analyses est hétérogène sur le territoire métropolitain : à l'inverse des régions de montagnes, les grandes régions céréalières sont bien pourvues. La BDAT a été utilisée pour estimer et cartographier, entre autres, l'évolution temporelle des teneurs en C du sol (Saby et al., 2008) ou du phosphore (Lemercier et al., 2006).

En Suisse, on a aussi valorisé les analyses de sols effectuées chez les producteurs pour mesurer l'évolution de l'indicateur carbone du sol. Par exemple, Dupla et al. (2021) ont utilisé 32,000 analyses de C de la couche arable de sols sous culture annuelle de 1993 à nos jours. Cette approche a permis de mettre en évidence des variations significatives des teneurs en C du sol variant de -5‰ en 1995 à +6‰ en 2015. Les auteurs insistent sur l'intérêt de valoriser ces analyses effectuées chez les producteurs et que parfois elles contredisent les tendances observées en parcelles expérimentales.

Au Québec, le MAPAQ fait l'acquisition, depuis plusieurs années, des données de laboratoires privés à tous les deux ans pour fin de suivis à l'interne (Lagha, 2011). La Figure 1 présente la distribution de la matière organique à l'échelle du Québec provenant des données acquises par le MAPAQ entre 1995 et 1999 (Beaudet *et al.* 2004). Les données avaient été compilées par municipalité et publiées sur Internet. Les analyses de sols plus récentes (2010-2018) provenant d'un de ces laboratoires privés et géoréférencées à la municipalité ont permis de modéliser l'effet des changements climatiques sur l'évolution de la santé des sols et publier une nouvelle carte de la distribution de la matière organique à l'échelle du Québec (Figure 2) (Gasser et al., 2022). L'un des enjeux de ce type d'approche est l'accès aux données des analyses de sol issues des laboratoires.

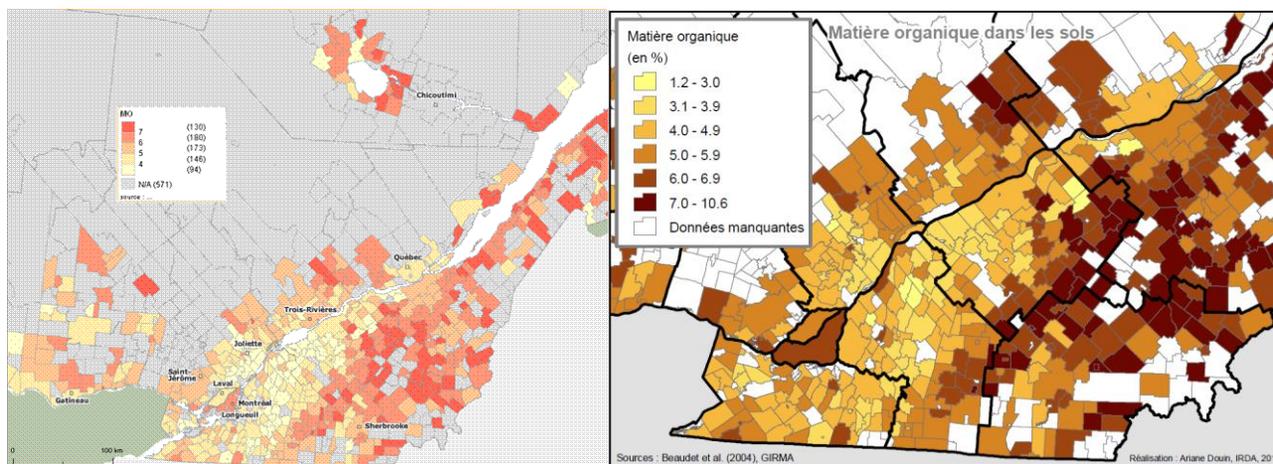


Figure 1 : Distribution spatiale de la MOS des sols agricoles du Québec 1995-1999 (Beaudet *et al.* 2004).

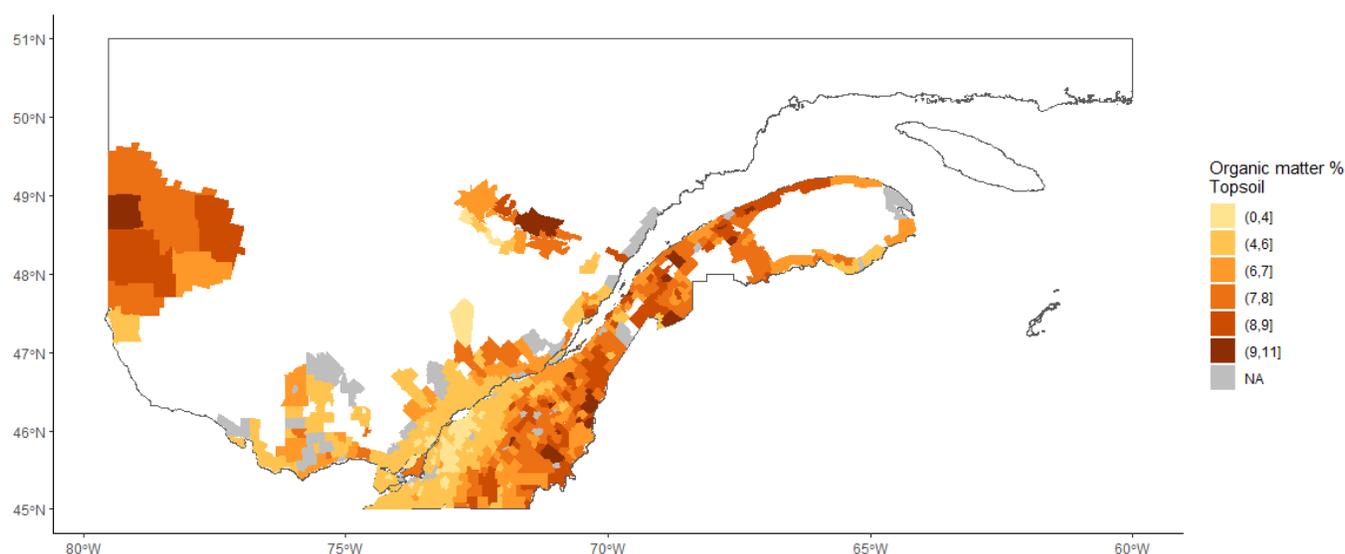


Figure 2 : Distribution spatiale de la MOS des sols agricoles du Québec 2010-2018 (Gasser *et al.* 2022).

Au Québec, les PAEFs exigés par la réglementation permettent l'accumulation des données liées à la gestion du parcellaire et des analyses de sols des laboratoires privés sous format électronique, mais moins facilement compilables (fichiers pdf, par exemple). Ces données présentent un intérêt plus important puisqu'elles permettraient de faire des liens entre les pratiques agricoles (principalement les cultures et la fertilisation), la santé des sols et les conditions biophysiques (climat, carte pédologique). En Suisse, des dispositions légales à certains paliers du gouvernement obligent les producteurs et les laboratoires à rendre accessible les données cumulées au niveau parcellaire, permettant de réaliser de telles analyses détaillées de l'état de la situation des sols (Dupla *et al.*, 2020).

Les systèmes participatifs

Kits de mesure de la santé des sols

Depuis quelques années, des kits de mesure de la santé des sols ([CASH](#), [Solvita](#), [Haney test](#)) ont été déployés par les laboratoires privés ou publics pour diagnostiquer l'état de santé des sols chez les producteurs (Idowu et al., 2009; Guo M., 2021). Ces kits reposent sur la mesure au champ ou au laboratoire d'un ensemble de propriétés des sols. La plupart s'intéresse à une gamme choisie (minimum data set) de propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. On privilégie les propriétés facilement mesurables et qui caractérisent des fonctions importantes du sol telles que la stabilité et l'état structural, l'activité biologique ou la disponibilité en nutriments. Les résultats sont ensuite souvent présentés de façon visuelle ou sous la forme d'un indicateur composite (agrégé) quantitatif. Plusieurs études utilisant ce type de données collectées sur des dispositifs expérimentaux (e.g. Congreves et al., 2015) ou à l'échelle régionale (e.g. Nunes et al., 2020) ont été réalisées pour analyser l'effet des pratiques agricoles et des conditions biophysiques sur l'état des sols, mais à notre connaissance, ces données n'ont pas encore été exploitées pour réaliser des suivis temporels à long terme. Ce qui n'empêche pas que des données issues de ces kits soient utilisés sur le long terme et à grande échelle pour qualifier l'évolution de la santé des sols.

On peut ajouter aussi le développement plus récent de l'outil [Biofunctool](#)[®] qui a été créé par le CIRAD et l'IRD (France) pour évaluer la santé des sols. La méthodologie repose sur une évaluation à plusieurs critères des trois fonctions essentielles à la vie du sol et portées par les organismes qui le compose : la dynamique du carbone, le cycle des nutriments et le maintien de la structure du sol (Brauman et Thoumazeau, 2020). La méthode Biofunctool[®] s'appuie sur l'utilisation d'un ensemble de neuf indicateurs connus et dont les mesures sont réalisées principalement sur le terrain. Elle permet aussi de produire un indicateur synthétique de santé des sols compréhensible par tous, à travers une méthode d'agrégation par analyse statistique.

Applications sur téléphone intelligent

Le déploiement d'applications mobiles sur téléphone intelligent permettrait de cumuler rapidement de l'information sur le terrain dont la date et la géolocalisation de l'observation ainsi que toute information saisie de façon visuelle et tactile ou provenant d'images analysées sur l'état du sol. Dans la mesure où la même application serait utilisée de façon généralisée et sur une certaine période de temps, elle pourrait générer de l'information sur l'état des sols et son évolution.

Quelques applications mobiles ont été développées pour évaluer l'état physique ou la qualité physique du sol, basées sur un avis d'expert encadré. L'application [V ESS](#) par exemple, utilise les barèmes fixés par un groupe de chercheurs/experts pour qualifier sur une valeur de 1 à 5 l'état structural des différents horizons d'un profil de sol, basés sur la présence, la grosseur et la dureté des agrégats, la présence de pores et de racines, etc. L'application allemande [Structure de mottes](#) détermine la qualité physique du profil cultural à partir de six descripteurs (état de la surface, pénétration des racines, macropores/biopores, structure et compression, résidus organiques, couleur et odeur) classés sur une échelle de 1 à 5. L'application [SOILapp](#) a été développée pour l'Italie et la Grèce et utilise des observations à la surface du sol (pente, couvert végétal, couverture du sol, légumineuses, état du sol à la surface, présence d'adventices particulières) et dans le profil (résistance du sol à la pénétration de la bêche, texture du sol, nombre et profondeurs des horizons, type de structure, grosseur des agrégats, consistance, humidité, couleur, résidus organiques, odeurs, racines, vers de terre,) pour décrire un état de santé du sol plus général et le partager avec la communauté par géoréférencement et courriel. L'application ProfilSols présentement en développement à l'IRDA permettra de relever des indicateurs pédomorphologiques de même

que le système VESS pour qualifier la structure dans un profil de sol à partir d'une évaluation visuelle et tactile de la structure (QSSEV).

La prise d'images et leurs analyses avec un téléphone intelligent présente également un intérêt pour récolter de l'information sur les sols à moindre coût et de façon rapide. Une de ces applications utilisant la caméra et l'analyse d'image permet d'évaluer la quantité de matière organique ou de carbone dans le sol ([SOCiT](#)) ainsi que plusieurs autres propriétés physico-chimiques du sol (pH, éléments disponibles, granulométrie, teneur en eau, MVA, capacité au champ, point de flétrissement) en analysant l'image d'un profil de sol calibrée avec une charte de couleur (Aitkenhead et al. 2020). Un autre d'exemple d'application utilisant la caméra et l'analyse d'image ([Crop Residue Estimator](#)) permet d'estimer la couverture de résidus de culture présente à la surface du sol à l'aide d'algorithmes avec apprentissage supervisé (FieldTRAKS Solutions, Ottawa). Le conseiller est amené à sélectionner des attributs spécifiques (sol, résidus de culture) pour faciliter la reconnaissance de ces attributs et améliorer leur résolution.

L'application ProfilSols présentement en développement à l'IRDA devrait permettre de relever la qualité structurale d'un horizon de sol et son profil à partir d'analyses d'images et l'intelligence artificielle (QSSAI). D'autres propriétés du sol, comme les teneurs en eau, matière organique et fragments grossiers pourraient également être révélées par analyses d'images, permettant de générer par approche participative de l'information sur l'état des sols à des échelles spatio-temporelles précises et des bilans sur l'évolution des sols. Toutefois, la preuve de concept n'a pas encore été réalisée.

PROPOSITION D'UNE MÉTHODE DE SUIVI (MONITORING) DE LA SANTÉ DES SOLS AGRICOLES DU QUÉBEC

Nous proposons deux systèmes de suivi de la santé des sols. Le premier consisterait à suivre à long-terme les sites de l'EESSAQ 2023. Le deuxième porterait sur la valorisation de mesures de la santé/qualité des sols effectuées à la ferme par les producteurs ou leurs conseillers afin d'obtenir un portrait rétrospectif de l'évolution de la santé des sols. Enfin, nous évoquons les possibilités qu'offrent les nouveaux outils de mesure de la santé des sols faisant appel soit à des kits santé des sols soit à des applications sur téléphone intelligent, dans le cadre d'un dispositif participatif par les producteurs (trices) et leurs conseillers.

Suivi à long-terme des sites de l'EESSAQ

L'EESSAQ est basée sur environ 432 sites répartis de façon proportionnelle selon l'importance des régions pédo-climatiques du territoire agricole québécois. Cette répartition constitue une excellente base, sur laquelle il faut capitaliser, pour établir un suivi à long-terme de la santé des sols agricoles du Québec. Nous privilégions cette approche, semblable à celle de la Nouvelle-Zélande, plutôt qu'une grille uniforme comme le RMQS français, qui supposerait de recommencer une nouvelle campagne de mise en place des sites de suivi.

Nous proposons de suivre une dizaine d'indicateurs parmi la gamme originale de l'EESSAQ 2023 et de concentrer l'effort sur les champs en culture (environ 325 sites) et non les sites témoins non cultivés. Le suivi de ces sites témoins à long-terme a moins d'intérêt et cela représentera une économie significative de ressources.

Le choix des séries de sol seraient les mêmes incluant les 3 séries de sols organiques. Éventuellement, si certains sites ne sont plus accessibles pour différentes raisons, de nouveaux sites pourraient être ajoutés pour assurer un minimum de sites suivis pour évaluer l'état des sols et leur évolution.

Il est proposé de conserver les quatre points d'échantillonnage à chaque site et de réévaluer le profil du sol par une caractérisation et un échantillonnage des horizons dans la même logique que l'EESSAQ : Ap1 (10 cm), Ap2 (15 cm) et B (15 cm).

Choix des indicateurs

Les indicateurs suivis se limiteraient à des indicateurs simples, faciles à mesurer et informatifs sur l'état de santé des sols. Pour fins de discussions, nous proposons de suivre les indicateurs présentés au Tableau 1. Le Tableau 2 présente les indicateurs de l'EESSAQ qui ne seraient pas retenus dans le cadre d'un suivi à long terme pour raison budgétaire et de pertinence, mais de nouveaux indicateurs pourraient être ajoutés à la liste encore pour des questions de pertinence et selon les budgets disponibles (Tableau 3).

Les mesures de rendements de cultures en place ne nous apparaissent pas utiles ou fonctionnelles pour évaluer l'effet de la santé des sols sur la productivité des cultures, donc cette mesure serait omise.

Tableau 1 : Liste des indicateurs retenus et des propriétés analysées pour la suite de l'EESSAQ.

Indicateurs retenus et propriétés analysées (minimaux)	Commentaires
C et Matière organique : C et N Leco	Nécessaire p
pH eau et pH SMP	Nécessaire pour l'estimation des besoins en chaux et de la CEC
MVA, macroporosité à 10 kPa (3 cylindres)	Nécessaire pour évaluer la condition physique
P, K, Ca, Mg Na, Al, Cu, Fe, Mn, Zn, Mo, Na, Ni, Cd, Cr, Co, Pb, S Extrait Mehlich3	Vient en kit
Fibres frottées, cendres, CN soluble, profondeur au sol minéral	Nécessaire pour les sols organiques

Tableau 2 : Liste des indicateurs non-retenus pour la suite de l'EESSAQ.

Indicateurs non-retenus	Commentaires
Granulométrie incluant fractionnement des sables	Propriété stable ou peu évolutive déjà mesurée
N minéralisable et respiration microbienne à 14 jours	Variable à court terme et dispendieux
C actif (oxydation au KMnO ₄)	N'est pas un indicateur concluant
Mouvement de sol avec inventaire de Cs-137	Signal affaibli et dispendieux
DMP et stabilité des agrégats	Variable à court terme
Conductivité hydraulique au perméamètre de Guelph	Mesure très variable et couteuse en temps au champ

Tableau 3 : Liste des indicateurs et des propriétés analysées à ajouter pour la suite de l'EESSAQ.

Indicateurs ou propriétés à ajouter	Commentaires
Autres teneurs en eau à 5, 20 kPa, 33 kPa, 1500 kPa, Conductivité hydraulique	Meilleure caractérisation des propriétés hydraulique et de diffusion des gaz
Fractionnement de la matière organique	Suivre l'évolution de la séquestration de C
Matière organique par perte au feu	Relier les mesures de MO-PAF des producteurs à la teneur en C des sols
Évaluation de la structure par caractérisation pédomorphologique	Indicateur performant

Récurrence du suivi

Pour être en mesure d'informer plus fréquemment le public et de détecter des phénomènes de dégradation, d'amélioration ou d'évolution des sols, il faudrait viser une récurrence du suivi à 10 ans ou moins (entre 7 et 10 ans). Toutefois, pour réduire le nombre d'équipes à engager et les coûts d'opération, les campagnes d'échantillonnage seraient réparties sur trois ans à raison d'une centaine de sites par année, à compter de 2028.

Capitalisation des analyses de sols des exploitations agricoles

Cette approche, inspirée de la BDAT en France ou de l'expérience Suisse, consiste à capitaliser sur le grand nombre de données d'analyses de sols faites par les exploitations agricoles du Québec depuis plusieurs décennies. L'exemple de la BDAT illustre bien le grand potentiel qui existe dans l'utilisation judicieuse des analyses de sols

demandées par les agriculteurs. Leur grand nombre et répartition sur le territoire offrent la possibilité de suivre en conditions réelles l'évolution de certains indicateurs robustes de la santé/qualité des sols. Une telle approche a été amorcée au Québec pour la teneur en matière organique du sol (voir Figure 1 et Figure 2). On pourrait aussi l'envisager pour le pH, les éléments P, K, Ca, Mg, Cu, Zn, l'ISP ou la CEC.

Un tel exercice est rétrospectif, c'est-à-dire qu'il analyse les tendances passées de l'évolution de la santé/qualité des sols. Il pourrait faire l'objet d'un projet de recherches tels que ceux évoqués plus haut en France et en Suisse. Pour le cas particulier du Québec, il faudra s'assurer de l'uniformité et de la cohérence dans le temps des méthodes d'échantillonnage et d'analyse. Par exemple, pour l'analyse de la teneur en matière organique, on utilise la méthode de perte au feu depuis 2007 alors que précédemment on utilisait la combustion humide (Walkley-Black) pour mesurer la teneur en carbone organique.

Les études basées sur de telles analyses sont généralement réalisées sur des données anonymisées rapportées à l'échelle de la municipalité ou du Canton en raison de la propriété ou de la confidentialité des données (Lagha et al., 2010; Gasser et al., 2022; Saby et al., 2008; Lemerrier et al., 2006).

Des initiatives privées sont en cours pour exploiter à l'échelle du parcellaire, l'information contenue dans les analyses de sols et les PAEFs permettant de faire des liens entre la gestion des pratiques agricoles et l'état des sols dans la mesure où les producteurs consentent à y participer. L'administration et la signature de formulaires de consentement spécifique par les producteurs-trices pourrait permettre d'exploiter ces données et les liens entre elles à une résolution plus fine.

Approche participative du suivi de la santé des sols

Plusieurs initiatives sont aussi en cours au Québec pour tester des kits de diagnostic de la santé des sols. Cependant, à notre connaissance, aucun n'a encore évalué leur potentiel d'utilisation pour faire un suivi dans le temps à long-terme. Certaines propriétés des sols, dont la teneur en matière organique, sont prises en compte dans la plupart de ces kits. On pourrait donc penser que ces mesures puissent être valorisées pour suivre certaines caractéristiques de la santé des sols dans le temps. Nous proposons qu'une étude systématique soit mise en place pour évaluer l'intérêt d'utiliser ces kits pour faire ce suivi dans le temps. Toutefois, il nous est difficile de prévoir comment l'information sur l'état de sols sera rendue publique si les kits sont déployés dans le secteur privé.

L'IRDA prévoit demander au MAPAQ de reconduire le projet de développement d'une application mobile permettant de qualifier l'état structural des profils de sols dans une approche participative, à partir des caractéristiques pédomorphologiques et/ou d'analyses d'images. L'utilisateur aura également la possibilité de fournir des données provenant des analyses de sol (M.O., pH, P, K, Ca, etc.) déjà réalisées dans le même champ. Le déploiement à grande échelle de cette approche chez les producteurs (trices) pourrait permettre de développer une base de données qui serait enrichie au cours du temps permettant ainsi le suivi en temps réel de l'évolution de la santé des sols.

CONCLUSION

Nous recommandons de réaliser le suivi de l'état de santé des sols avec deux approches complémentaires déjà en œuvre ici et ailleurs et de les compléter par des approches participatives dont l'information serait rendue publique.

Le suivi à long-terme des sites de l'EESSAQ serait renouvelé aux dix ans sur une période de 3 ans, permettant de dresser un état général de la situation et de détecter des signes d'évolution d'indicateurs importants comme le C organique.

Les analyses de sols provenant des exploitations agricoles pourraient être analysées à différentes échelles selon les ententes ou la législation mises en place.

L'utilisation de kit de santé de sols ou d'applications mobiles pour relever des indicateurs de l'état des sols seraient conditionnelles à la participation des utilisateurs et le partage de l'information par les laboratoires privés.

RÉFÉRENCES

- Angers, D., R. Ouimet, P. Roy-Léveillé et M. Garneau. 2022. Priorities for Management and Protection of Québec Soils. *Geoderma Regional* 29. doi:10.1016/j.geodrs.2022.e00523.
- Arrouays, D., C. Jolivet, L. Boulonne, G. Bodineau, N.P.A Saby, E. Grolleau. 2003. Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) de France. *Étude et Gestion des Sols*, 10 : 241-250.
- Arrouays D., J. Thorette, I. Feix, B. Lesaffre, P. Stengel. 2021. La naissance du réseau de mesures de la qualité des sols de France. *Étude et Gestion des Sols*, 28 : 49-56.
- Brauman, A., A. Thoumazeau. 2020. Biofunctool (R) : un outil de terrain pour évaluer la santé des sols, basé sur la mesure de fonctions issues de l'activité des organismes du sol. *Étude et Gestion des sols*, 27 : 289-303. ISSN 1252-6851.
- Congreves, K.A., A. Hayes, E.A. Verhallen, et L.L. Van Eerd. 2015. Long-term impact of tillage and crop rotation on soil health at four temperate agroecosystems. *Soil and Tillage Research*, 152:17-28. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.03.012>.
- Dupla, X., K. Gondret, O. Sauzet, E. Verrecchia, P. Boivin. 2021. Changes in topsoil organic carbon content in the Swiss leman region cropland from 1993 to present. Insights from large scale on-farm study. *Geoderma*, 400 : 115125, [10.1016/j.geoderma.2021.115125](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115125).
- FAO et ITPS. 2016. État des ressources en sols du monde - Résumé technique. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture et Groupe technique intergouvernemental sur les sols, Rome, Italie. 79 p. ISBN 978-92-5-208960-5
- Gasser, M.-O., Occean., R.O., Mathieu, J.-B., Allard, F. 2023. Réponses des cultures aux engrais comme indicateur de santé des sols. Rapport final présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). IRDA. 182 pages.
- Gasser, M.-O., A. Biswas, C. Bernard, G. Martinelli, T.H. Easher, Z.A. Ondoa. 2022. Évolution d'indicateurs spatialisés de la santé des sols sous l'effet des changements climatiques au Québec et en Ontario. Affiche présentée dans le cadre du Symposium Ouranos le 1^{er} déc. 2022. https://www.ouranos.ca/sites/default/files/2022-11/cc-symposium-2022-resumes-affiches_3.pdf
- Gasser, M.-O., M. Bolinder, S. Martel, D. Poulin, I. Beaudin, A.R. Michaud et A. Drouin. 2010. Impacts agroenvironnementaux associés à la culture et au prélèvement de biomasses végétales agricoles pour la production de bioproduits industriels. Rapport final présenté au MAPAQ. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement. Québec. 197 p. + annexes. <https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/2102441>
- Guo, M. 2021. Soil Health Assessment and Management: Recent Development in Science and Practices. *Soil Systems*, 5: 20 pages. <https://doi.org/10.3390/soilsystems5040061>
- Idowu, O.J., H.M. van Es, G.S. Abawi, D.W. Wolfe, R.R. Schindelbeck, B.N. Moebius-Clune, and B.K. Gugino. 2009. Use of an integrative soil health test for evaluation of soil management practices. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 24:214–224. doi:10.1017/S1742170509990068

- Lajoie, P.G. 1975. Les terres agricoles du Québec méridional: distribution, étendue et qualité. Agriculture Canada, Publ. No. 1556. 62 p.
- Lemercier, B., D. Arrouays, S. Follain, N.P.A. Saby, C. Schwartz, C. Walter. 2006. Broad-Scale Soil Monitoring Through a Nationwide Soil-Testing Database Springer, Netherlands, pp. 273-281.
- Liptzin, D., C.E. Norris, S.B. Cappellazzi, G. Mac Bean, M. Cope, K.L.H. Greub, E.L. Rieke, P.W. Tracy, C.L.S. Morgan, C.W. Honeycutt. 2022. An evaluation of carbon indicators of soil health in long-term agricultural experiments. *Soil Biology and Biochemistry*, 172: 1-15.
- Nunes, M.R., H.M. van Es, K.S. Veum, J.P. Amsili, D.L. Karlen. 2020. Anthropogenic and Inherent Effects on Soil Organic Carbon across the U.S. *Sustainability*, 12, 5695: 1-19. <https://doi.org/10.3390/su12145695>
- Rompré, M. 1994. Observatoire de la qualité des sols du Québec. *Agrosol*, 7: 3-7.
- Saby, N.P.A., D. Arrouays, V. Antoni, V., B. Lemercier, S. Follain, C. Walter, C. Schwartz. 2008 - Changes in soil organic carbon in a mountainous French region, 1990-2004. *Soil Use Management* 24 : 254-262.
- Tabi M., L. Tardif, P. Carrier, G. Laflamme et M. Rompré. 1990. Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec. Rapport Synthèse. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. Publication no 90-130156. 65 pages.