



Rapport de l'activité 1.1 du mandat Retombées de l'Étude sur
l'état de santé des sols agricoles du Québec

Seuils de références pour quelques indicateurs de santé des sols mesurés dans le cadre de l'ÉÉSSAQ

15 janvier 2026

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

Ce rapport a été produit à l'attention du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.

No. de projet IRDA : 10009



À l'IRDA, on **collabore**, on se **questionne**, on **explore** et on **progresses** ensemble dans la même direction : celle d'une agriculture saine, dynamique et performante.

Nous sommes des **scientifiques**, mais aussi des **gens de terrain** qui **collaborent** avec l'ensemble du milieu agricole.

Notre mission consiste à innover en agroenvironnement pour créer ensemble la production agricole de demain. Consulter le www.irda.qc.ca pour en connaître davantage sur l'Institut et ses activités.

Question ou commentaire

Marc-Olivier Gasser, Ph. D.
Chercheur en conservation des sols et l'eau
Responsable scientifique et auteur
T : 418 643-2380 p. 650
marc-o.gasser@irda.qc.ca

Auteurs du rapport

Mandela M. Jacques, M. Sc., IRDA
Marc-Olivier Gasser, Ph. D., IRDA
Jean-Benoît Mathieu, M. Sc., IRDA
Eduardo Chavez M. Sc., IRDA

Équipe de réalisation

Mandela M. Jacques M. Sc., IRDA
Marc-Olivier Gasser, Ph. D., IRDA
Jean-Benoît Mathieu, M. Sc., IRDA
Eduardo Chavez M. Sc., IRDA
Cédric Bouffard, IRDA
Mohamed Abou Niang, Ph. D., IRDA

Collaborateurs

Catherine Bossé, agr., IRDA
Richard Hogue, Ph. D., IRDA
Bernard Montminy, IRDA

Merci à notre partenaire financier

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière accordée par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries, de l'Alimentation du Québec



Ce rapport peut être cité comme suit :

Jacques, M., M.-O. Gasser, J.-B. Mathieu, E. Chavez. 2026. Seuils de références pour quelques indicateurs de santé des sols mesurés dans le cadre de l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec. Rapport concernant l'activité 1.1 du projet Retombées de l'ÉSSAQ. IRDA. 58 pages.

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

Résumé

Ce rapport présente les résultats de l'activité 1.1 du mandat accordé à l'IRDA par le MAPAQ et intitulé *Retombées de l'ÉSSAQ*. L'étude s'appuie sur les données de l'ÉSSAQ portant sur 431 sites et vise à établir des seuils de référence pour des indicateurs clés de la santé des sols. La méthodologie combine une approche basée sur la distribution des observations et des analyses statistiques avancées (régression, clusterisation) afin de définir des référentiels adaptés au contexte pédoclimatique québécois.

Les indicateurs retenus couvrent trois dimensions essentielles : les propriétés biologiques (matière organique du sol, azote minéralisable, carbone actif, CO₂ dégagé), les propriétés physiques (masse volumique apparente, macroporosité, diamètre moyen pondéré des agrégats, la conductivité hydraulique saturée) et les propriétés chimiques (soufre et potassium extractibles en solution M-3). L'analyse a permis d'identifier deux zones climatiques principales, l'une périphérique plus froide et l'autre méridionale dont les caractéristiques distinctes influencent significativement la distribution des valeurs observées pour chaque indicateur.

Les seuils proposés constituent un outil pratique permettant aux acteurs agricoles d'améliorer la gestion durable de leurs sols, de suivre leur évolution dans le temps et de mettre en place des interventions ciblées. Cette approche s'inscrit dans une perspective de résilience et de maintien de la productivité à long terme des systèmes agricoles québécois.

TABLE DES MATIÈRES

Contexte de l'étude et objectifs.....	3
Revue de littérature	3
Vue globale de la santé/qualité des sols	3
Choix d'indicateurs et référentiels pour l'évaluation de la santé des sols.....	4
Matériels et méthode.....	5
Jeux de données	5
Choix des indicateurs.....	5
Normalisation et référentiel d'interprétation.....	6
Fonction de transformation.....	6
Fonction de normalisation.....	6
Référentiel d'interprétation.....	8
Cas de la matière organique du sol (MOS)	8
Généralisation et proposition de clusters.....	15
Indicateurs liés à la matière organique du sol	17
La matière organique du sol (MOS) - Horizon Ap	18
L'azote minéralisable- Horizon Ap.....	20
Le carbone actif- Horizon Ap	22
Le CO ₂ dégagé- Horizon Ap	23
Indicateurs physiques et chimiques.....	24
La masse volumique apparente (MVA).....	25
Horizon Ap	25
Horizon B	27
La macroporosité - Horizon B	28
Le diamètre moyen pondéré (DMP) des agrégats - Horizon Ap1.....	30
La conductivité hydraulique - Horizon B.....	31
Le soufre M-3 - Horizon Ap.....	32
Le potassium M-3 - Horizon Ap	34
Cadre d'application des indicateurs et d'interprétation des seuils de références.....	37
La mesure des indicateurs	37
La zone climatique	37
Le matériau parental	37
Interprétation des indicateurs en fonction des seuils de référence	38
Relation entre les indicateurs et possibilité d'intégration (en construction)	39
Analyse en composante principale.....	39
Indice global de santé des sols	39
Meilleures pratiques pour améliorer le score des indicateurs	43
Conclusion	45
Références	46
Annexe A.....	50
Annexe B.....	51

Liste des tableaux

Tableau 1.	Valeurs moyennes et écarts-types des indicateurs caractérisés par une courbe de distribution normale par matériau parental et/ou zone climatique.....	16
Tableau 2 :	Valeurs moyennes et paramètres de forme et de taux des indicateurs caractérisés par une courbe de distribution gamma par matériau parental et/ou zone climatique	17
Tableau 3.	Classes de matière organique du sol (%) dans l'horizon Ap selon le matériau parental et la zone climatique.....	20
Tableau 4.	Classes de teneurs en azote minéralisable du sol selon le matériau parental et la zone climatique.	21
Tableau 5.	Classes de teneurs en carbone actif du sol selon le matériau parental et la zone climatique.....	23
Tableau 6.	Classes de quantité de CO ₂ dégagé 0-3 jours selon la zone climatique pour tout type de matériaux parentaux.....	24
Tableau 7.	Classes de MVA selon la zone pour tout type de matériaux parentaux – Horizon Ap.....	26
Tableau 8.	Classes de MVA en fonction du matériau parental – Horizon B.	28
Tableau 9.	Classes de macroporosité selon le matériau parental – Horizon B.....	29
Tableau 10.	Classes de Diamètre Moyen Pondéré (DMP) selon le matériau parental – Horizon Ap1.....	31
Tableau 11.	Classes de conductivité hydraulique saturée selon le matériau parental – Horizon B.	32
Tableau 12.	Classes de soufre M-3 selon le matériau parental – Horizon Ap.	34
Tableau 13.	Classes de K M-3 selon le matériau parental – Horizon Ap.	36
Tableau 14.	Comparaison de scores entre différents indicateurs pour différents sites.	38
Tableau 15.	Contribution des 11 indicateurs aux 4 premières composantes principales (PC) et pourcentage de variance expliquée par PC.....	40

Liste des figures

Figure 1.	Système d'interprétation des indicateurs de santé des sols utilisés dans le programme Comprehensive Assessment of Soil Health de Cornell (adapté de Moebius-Clune et al., 2016).....	7
Figure 2.	Graphique illustrant la variation de la largeur de silhouette moyenne en fonction du nombre de clusters (A) et la représentation des clusters sur le triangle textural (B) et sur un fond de carte (C)....	9
Figure 3.	Résultats de l'analyse par arbre de régression avec les paramètres maxdepth = 2 et minsplit = 80 (A). L'importance des variables dans le modèle (B) et l'analyse des résidus issus du modèle (C).	11
Figure 4.	Délimitation des deux zones climatiques (Périphérique : température annuelle moyenne inférieure à 5°C ; Méridionale : supérieure à 5°C) définissant la teneur en matière organique du sol à l'échelle du Québec.....	12
Figure 5.	Analyse des résidus du meilleur modèle permettant la modélisation de la matière organique du sol ...	13
Figure 6.	A) Modélisation de la matière organique et différence entre la moyenne par cluster - Modèle : $\text{logit}(\text{MOS}) \sim \text{Préc_annuelle_mm} + \text{cluster} + \text{cluster_texture} + (1 \text{Préc_annuelle_mm})$; B) Courbe de distribution des scores en termes de probabilité normale cumulative en fonction des clusters définis par l'analyse d'arbre de régression.	13
Figure 7.	Nombres de sites et valeur moyenne de MOS (%) en fonction des clusters définis par l'analyse d'arbre de régression et du matériau parental.....	14

Figure 8.	Courbes de notation de la teneur en matière organique du sol dans l'horizon Ap selon le matériau parental et la zone climatique.....	19
Figure 9.	Courbes de notation de la teneur en azote minéralisable selon le matériau parental et la zone climatique.....	21
Figure 10.	Courbes de notation de la teneur en Carbone actif selon le matériau parental et la zone climatique	22
Figure 11.	Courbes de notation de la quantité de CO ₂ dégagé selon la zone climatique.	24
Figure 12.	Courbes de notation de la masse volumique apparente selon la zone climatique dans l'horizon Ap	26
Figure 13.	Courbes de notation de la masse volumique apparente selon le matériau parental - Horizon B.	27
Figure 14.	Courbes de notation de la macroporosité selon le matériau parental - Horizon B	29
Figure 15.	Courbes de notation du Diamètre Moyen Pondéré (DMP) selon le matériau parental – Horizon Ap1	30
Figure 16.	Courbes de notation de la conductivité hydraulique saturée selon le matériau parental -Horizon B.	32
Figure 17.	Courbes de notation de la teneur en soufre M-3 selon le matériau parental - Horizon Ap.....	34
Figure 18.	Courbes de notation de la teneur en K M-3 selon le matériau parental - Horizon Ap.....	35
Figure 19.	Distribution des scores globaux calculés dans le premier axe (Dim1) d'une analyse en composante principale à partir des 11 indicateurs développés dans le cadre de l'ÉÉSSAQ.....	41
Figure 20.	Score globale et distribution des scores par indicateur pour les 17 sites issus de matériaux parentaux argileux, loameux et glaciaires (Tills) ayant une très faible teneur en MOS.....	42

CONTEXTE DE L'ÉTUDE ET OBJECTIFS

L'état de dégradation des sols constitue un enjeu important pour l'agriculture québécoise du fait qu'il influence directement la productivité, la durabilité et la résilience des systèmes agricoles. Aucune étude d'envergure n'avait été entreprise pour évaluer l'état actuel de nos sols depuis l'inventaire des problèmes de dégradation des sols du Québec réalisé en 1990. En vue d'aborder cette problématique, le ministère de l'Agriculture, des pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) a mandaté l'IRDA pour conduire une étude exhaustive sur la santé des sols agricoles du Québec à l'orée de 2020.

Cette Étude sur l'État de Santé des Sols Agricoles du Québec visait à évaluer les principales propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols à partir 431 sites répartis sur 71 séries de sols couramment cultivés (Gasser, Bossé et al., 2023). Un portrait détaillé de l'état de santé des sols et l'identification des facteurs principaux influençant leur dégradation ont été les résultats majeurs découlant de cette étude.

Dans le but de tirer davantage d'enseignements sur l'état des sols et de produire des outils pratiques favorisant la prise de décisions éclairées en matière de gestion durable des sols agricoles, les données issues de l'ÉÉSSAQ ont fait l'objet d'analyses supplémentaires. Ce présent rapport a produit des seuils de référence pour certains des indicateurs de santé des sols utilisés dans l'ÉÉSSAQ en utilisant une méthodologie similaire à celle du *Comprehensive Assessment of Soil Health (CASH)* et adaptée au contexte québécois (Fine et al., 2017 ; Gauthier et al., 2023). Les indicateurs présentés dans le cadre de cette étude ont été choisis parmi ceux qui sont les plus susceptibles d'être mesurés sur le terrain par les utilisateurs et leur cadre d'interprétation a été spécifiquement modulé en fonction des facteurs pédoclimatiques qui les définissent à l'intérieur du domaine de l'ÉÉSSAQ. L'approche scientifique a été validée par un comité d'experts et priorisait la qualité des données. Les indicateurs retenus permettront aux différents intervenants du milieu agricole d'être mieux outillés dans la compréhension et la mise en place des pratiques agricoles favorisant la conservation et l'amélioration des sols québécois.

REVUE DE LITTÉRATURE

Vue globale de la santé/qualité des sols

Au fil des décennies, la compréhension et l'évaluation des sols ont considérablement évolué. Selon le dernier rapport de l'INRAE publié en 2025, l'attention était initialement portée sur la chimie-fertilité des sols en se focalisant sur leur capacité à fournir les éléments nutritifs nécessaires à la croissance des plantes (Cousin et al., 2025). Cette perspective s'est élargie avec le temps vers la notion de qualité des sols en englobant non seulement les aspects de chimie-fertilité, mais aussi les propriétés physiques et biologiques. Cette évolution du concept a permis de prendre en compte le rôle multifonctionnel des sols au sein des écosystèmes. Cependant, le concept de qualité des sols a été critiqué dès la fin des années 90 pour son manque de définition universelle et sa difficulté à intégrer les multiples fonctions écologiques des sols ainsi que leurs caractéristiques dynamiques. Dans cette optique, le concept santé des sols a émergé en mettant l'accent sur la dynamique et la résilience des sols en tant que systèmes vivants capables de s'adapter aux perturbations et de maintenir leurs fonctions écologiques. Cette évolution sémantique tend vers une approche holistique en intégrant des aspects clés de la durabilité environnementale à la fonction première attribuée aux sols en tant que supports de la production.

Malgré l'évolution sémantique par l'attribution d'une considération plus holistique, écologique et durable au système sol (Moebius-Clune et al., 2016), un manque de consensus persiste dans la communauté des experts intervenant dans l'étude des sciences du sol. Dans la littérature, les termes qualité des sols et santé des sols sont souvent utilisés de manière interchangeable pour décrire l'état des sols. Cependant, des distinctions peuvent être établies entre ces concepts. D'une part, la qualité des sols se réfère à la capacité intrinsèque d'un sol à remplir ses fonctions telles que le soutien de la croissance des plantes, la régulation de l'eau et la filtration des polluants (Cousin et al., 2025; Moebius-Clune et al., 2016). Elle englobe les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol qui déterminent son aptitude à des usages spécifiques sur le long terme. D'autre part, la santé des sols est plutôt considérée comme l'état dynamique du sol à un moment donné, lui accordant une vitalité et une capacité à fonctionner à l'instar d'un système vivant. Par conséquent, le concept santé des sols met l'accent sur les aspects biologiques, physiques et chimiques ainsi que la résilience du sol face aux perturbations tout en soutenant ses principales fonctions telles que sa capacité à maintenir la productivité, à promouvoir la qualité de l'environnement et à préserver la santé des plantes, des animaux et des humains.

L'approche proposée par Moebius-Clune en 2016 connue sous l'appellation d'Évaluation Complète de la Santé des Sols (*Comprehensive Assessment of Soil Health - CASH*) associe la santé du sol à une qualité dynamique liée à ses principales fonctions et propose un cadre détaillé pour évaluer la santé des sols en intégrant des indicateurs physiques, chimiques et biologiques. Un score est attribué à chaque propriété de sols permettant de qualifier l'état de cette propriété comme un indicateur et de calculer finalement une note globale de santé de sols cumulant l'effet de chaque indicateur. Dans le cadre de ce rapport, l'accent sera mis sur le choix de certains indicateurs et la définition de seuils de référence tenant compte de certains facteurs pédoclimatiques en cohérence avec l'approche dynamique et fonctionnelle proposée par le CASH.

Choix d'indicateurs et référentiels pour l'évaluation de la santé des sols

L'évaluation de la santé des sols repose sur le choix de références et d'indicateurs spécifiques permettant de mesurer leur capacité à remplir un ensemble de fonctions écologiques et économiques. Dans la littérature internationale, 180 variables dont 58 indicateurs chimiques, 52 indicateurs physiques, 60 indicateurs biologiques et 10 indicateurs divers, ont été recensées et sont utilisées pour évaluer la qualité/santé des sols (Cousin et al., 2025). Considérant une telle multiplicité des variables, toute tentative de développement d'un nouveau système d'indication doit passer par un choix judicieux des indicateurs en se basant, pour chaque variable retenue, sur la faisabilité technique et économique de son utilisation, sa crédibilité et son potentiel informatif. Dans son article sur les critères de sélection des indicateurs en 2021, Czúcz et al. recensent un ensemble de 5 critères pratiques pour le choix des variables. Ces critères se portent sur la validité, la fiabilité, la compatibilité, l'accessibilité et la simplicité du paramètre mesuré (Czúcz et al., 2021). Les diverses approches proposées dans la littérature visent à produire un ensemble minimal d'indicateurs (Minimum data set) en se basant soit sur l'avis d'experts (CASH, SMAF) pour identifier les paramètres les plus pertinents, soit sur l'analyse des données et l'usage des techniques de réduction dimensionnelle pour éliminer les proto-indicateurs redondants (Czúcz et al., 2021).

Une fois les variables choisies, l'étape d'interprétation et de normalisation finalise le processus de création d'indicateurs. L'intérêt de cette étape est de faciliter la compréhension et l'utilisation des indicateurs en les transformant sous forme de score adimensionnel dans un référentiel d'interprétation défini. Parmi les fonctions de score utilisées, la fonction de distribution cumulative de Gauss est très prisée et permet de produire un score variant de 0 à 1, traduisant la probabilité qu'une valeur d'un indicateur donné se trouve dans la plage des valeurs

d'existence de celui-ci (Fine et al., 2017; Gauthier et al., 2023; Moebius-Clune et al., 2016). La plage de valeurs d'existence fait état de référentiel et l'interprétation de l'indicateur y est tributaire. En fonction du contexte et de la finalité de l'étude, certains indicateurs sont définis suivant un référentiel global tandis que d'autres, par leur dépendance à certains facteurs tels que le type de sol et le climat, sont intégrés dans des référentiels spécifiques regroupant des entités ayant des caractéristiques potentiellement similaires. L'implémentation des techniques avancées de visualisation des distributions, de partitionnement récursif et de clusterisation des valeurs d'un indicateur donné facilite la définition du référentiel d'interprétation.

En fin de processus, une procédure optionnelle vise l'agrégation des indicateurs élémentaires pour constituer un indice global de santé des sols. L'indice présente l'avantage de faciliter la comparaison du niveau global de santé des sols entre différentes entités diagnostiquées, mais l'analyse doit tout de même être reportée à chaque indicateur pour le diagnostic et définir les interventions appropriées.

MATÉRIELS ET MÉTHODE

Jeux de données

Les données utilisées dans le cadre de cette étude proviennent de la Base de données de l'ÉSSAQ. Cette dernière a pour objectif de rendre exploitables les principaux paramètres mesurés ou calculés relatifs à l'état de santé des sols agricoles du Québec, en les structurant de manière à faciliter leur mobilisation dans des démarches d'évaluation, de suivi ou de gestion. L'ensemble de ces paramètres physiques, visuels, chimiques ou biologiques ainsi que le protocole d'évaluation de chacun d'eux ont été présentés et décrits dans la section matériels et méthodes du rapport 1 de l'ÉSSAQ sur l'État de santé des principales séries de sols cultivées au Québec (Gasser, Bossé et al., 2023). La profondeur de l'horizon Ap2 étant variable entre les sites, les analyses portées sur l'horizon Ap sont rapportées par interpolation sur une profondeur de 0 à 20 cm pour l'ensemble des indicateurs, correspondant à la profondeur échantillonnée dans les sols sur les entreprises agricoles.

Choix des indicateurs

L'approche méthodologique utilisée pour guider le processus d'indication est mixte. Elle intègre à la fois l'expertise des intervenants du domaine des sciences du sol et l'approche basée sur les données. Dans le plan de travail soumis au MAPAQ à l'automne 2023, un ensemble de paramètres a été retenu et présenté aux membres du comité scientifique. Les paramètres relatifs à la chimie-fertilité (éléments extraits par Mehlich III, CEC, ISP et l'acidité échangeable), à la condition physique (MVA, conductivité hydraulique, macroporosité, porosité totale, capacité de rétention en eau et diffusion des gaz) et à la matière organique du sol (matière organique, CO₂ dégagé, azote minéralisable, carbone actif) ont été choisies en se basant principalement sur leur pertinence et la faisabilité de les mesurer dans le contexte actuel de la gestion des sols sur les entreprises agricoles du Québec.

L'évaluation de ces indicateurs et de leurs seuils de références a été limitée aux sols minéraux. Seulement 4 % des sites ont été échantillonnés dans des sols organiques et selon des travaux réalisés à l'échelle des États-Unis les sols organiques ne devaient pas être inclus dans une analyse d'ensemble avec des sols minéraux (Nunes et al., 2021). Ensuite, pour chaque paramètre retenu, un processus automatisé d'exploration des données aboutissant

à un premier cadre d'interprétation a été implémenté (voir section Cas de la matière organique du sol (MOS)). En se basant sur des critères pratiques tels que l'aptitude à se constituer en cluster en fonction de variables climatiques (température, précipitation), de types de sols (texture, matériau parental) et/ou de terrain (pente, élévation), la non-redondance des paramètres, l'applicabilité et la validité des courbes de distribution, la capacité de chaque paramètre à soutenir certaines fonctions prépondérantes du sol a été évaluée.

Pour les fonctions de stockage du carbone ainsi que de support à la végétation et aux organismes du sol, les indicateurs suivants ont été retenus : la matière organique du sol (MOS), l'azote minéralisable, le CO₂ dégagé, et le carbone actif. Pour le maintien de la structure du sol, des processus d'aération et la régulation de l'eau du sol, les indicateurs tels que la masse volumique apparente (MVA), la conductivité hydraulique, la macroporosité et le diamètre moyen pondéré (DMP) ont été retenus pour des raisons de faisabilité sur le terrain. Enfin, la teneur en soufre et le K extraits en solution Mehlich III ont été les seuls paramètres documentés en termes d'indicateurs de chimie-fertilité du sol. Contrairement à la plupart des autres éléments P, K, Ca et Mg Mehlich III qui sont déjà documentés dans les grilles de références en fertilisation, aucune étude n'a documenté à date des seuils de références en soufre dans les sols minéraux du Québec. Or, une problématique de plus en plus courante de carence en soufre est observée au Québec dans la production de luzerne et certaines grandes cultures telles que les céréales. Pour le K Mehlich III, il a été retenu pour l'importance grandissante de la richesse du sol en K sur la survie à l'hiver des plantes pérennes au Québec.

Normalisation et référentiel d'interprétation

Fonction de transformation

À cette étape de l'analyse, l'objectif a été de traiter les valeurs extrêmes soit par la transformation des données pour les valeurs trop influentes, soit par l'exclusion de valeurs aberrantes. Aucune fonction de transformation n'a été appliquée pour les indicateurs tels que la masse volumique apparente et le diamètre moyen pondéré puisqu'aucun problème de normalité n'a été constaté. Pour assurer la normalité de la distribution des données des autres indicateurs, les fonctions de transformation suivantes ont été appliquées :

- Logit : Matière organique du sol ;
- Log : CO₂ dégagé ; Conductivité hydraulique
- Puissance (x^α) : Carbone actif (α = 0,5)

Fonction de normalisation

La fonction de normalisation utilisée est inspirée de l'approche CASH. Elle est basée sur la fonction de distribution cumulative de Gauss (Moebius-Clune et al., 2016; Fine et al., 2017; Gautier et al., 2023).

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

μ : Moyenne de la distribution

σ : Écart-type de la distribution

En multipliant les probabilités par 100, cette approche permet de définir des scores variant de 0 à 100 % permettant de caractériser chaque observation suivant trois systèmes de classement établis. Le système de classement A (Plus c'est mieux) s'applique aux paramètres pour lesquels la valeur et le score évoluent dans le même sens. Ainsi, par exemple, dans le cas de la matière organique du sol, plus la valeur est élevée, plus le sol obtient un score important et est considéré comme étant en bonne santé. Si pour un échantillon de sol de 4 % de teneur en matière organique, un score de 20 % est calculé. Cela signifie que l'échantillon fait partie des 20 % de sols ayant des teneurs en matière organique les plus faibles parmi la population de ce groupe de sols de l'ÉSSAQ et qu'il y a au contraire 80 % de cette population qui avait des teneurs en matière organique supérieures. Le système de classement B (Moins c'est mieux) est employé pour certains paramètres, tels que la masse volumique apparente et la résistance à la pénétration. Enfin, le système de classement C (Optimum) est appliqué aux paramètres pour lesquels un niveau optimal, défini en fonction de certaines conditions de production, est établi.

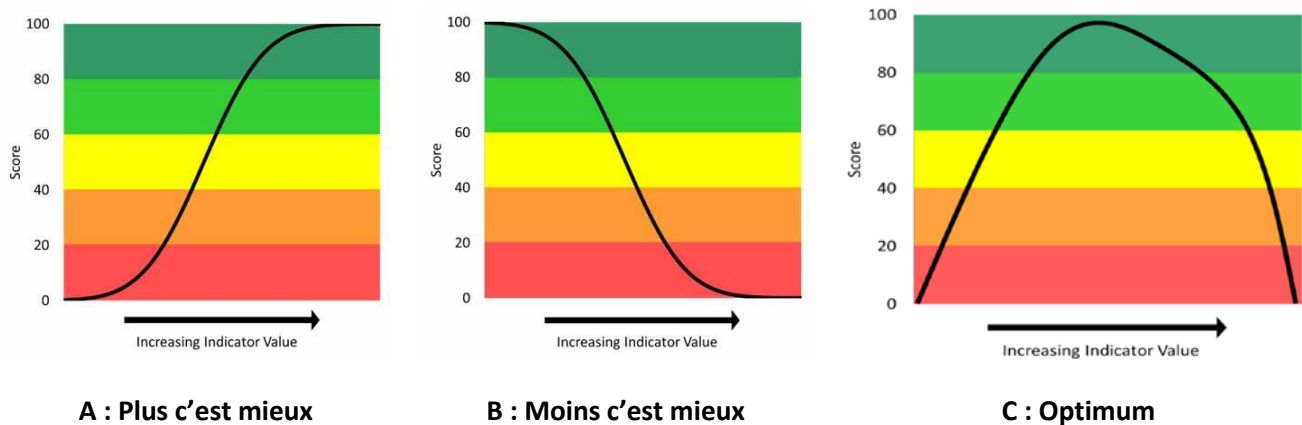


Figure 1. Système d'interprétation des indicateurs de santé des sols utilisés dans le programme Comprehensive Assessment of Soil Health de Cornell (adapté de Moebius-Clune et al., 2016).

Les variables telles que l'azote minéralisable, la macroporosité et la teneur en soufre extractible par Mehlich III présentent une forte asymétrie à droite. Ne pouvant pas être modélisées par une distribution gaussienne, même après transformation, ces variables ont été définies à l'aide d'une distribution gamma. Les paramètres de forme (α) et de taux (λ) ont ensuite été estimés pour permettre le calcul des scores au moyen de la fonction de densité de probabilité ci-après :

$$f(x, \alpha, \lambda) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\lambda x}, \quad x > 0$$

Γ : fonction Gamma

α : Forme

λ : Taux

Référentiel d'interprétation

La recherche du référentiel d'interprétation commence à l'étape d'exploration des données et de choix des indicateurs. Pour chaque indicateur, des facteurs pédoclimatiques inhérents à chaque site tels que la texture ou le matériau parental, le relief et le climat ont été inclus dans l'analyse en vue de déterminer les principaux facteurs qui expliquent la variabilité des indicateurs et de constituer des groupes ayant des populations plus homogènes (cluster) selon les facteurs pédoclimatiques retenus et sans tenir compte du mode de gestion des sols (systèmes de cultures, pratiques agricoles, etc.). Ce choix méthodologique est motivé non seulement par la limitation du nombre d'observations, mais aussi pour permettre de comparer tout usage de sol sur une même base pédoclimatique. Plutôt que de produire des valeurs spécifiques à chaque système de cultures, le contexte de l'ÉSSAQ nous permet, par cluster, de viser l'état optimal des sols atteignable avec des pratiques agronomiques adaptées. Toutefois, les variables retenues pour la mise en place des clusters peuvent aboutir à des regroupements de sites où un système de culture est majoritairement appliqué en raison des caractéristiques climatiques et celles liées au relief (Par exemple, dans les zones méridionales, où les températures sont plus élevées, les systèmes de culture intensifs sont plus courants). Une fois ces considérations faites et lorsque nécessaire, les données transformées, un algorithme ayant les axes suivants a été implémenté pour la création des clusters :

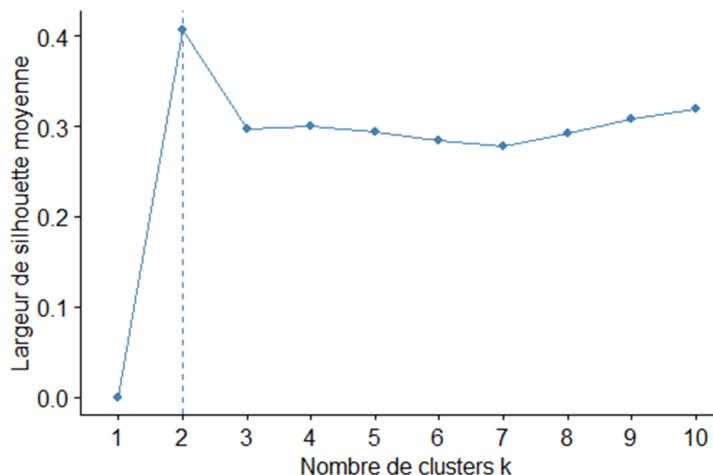
- Étudier la tendance de chaque proto-indicateur à se constituer en population homogène (cluster) en fonction des facteurs pédoclimatiques ;
- Utiliser la technique d'analyses par arbre de régression pour déterminer l'importance des facteurs et définir des clusters ;
- Rechercher le meilleur modèle (Critère de minimum AIC) en tenant compte des clusters et toutes les combinaisons de facteurs explicatifs en tant que variable fixes et/ou aléatoires.
- Visualiser la distribution des courbes de score en probabilité cumulée par cluster et analyser la cohérence des résultats.

Cas de la matière organique du sol (MOS)

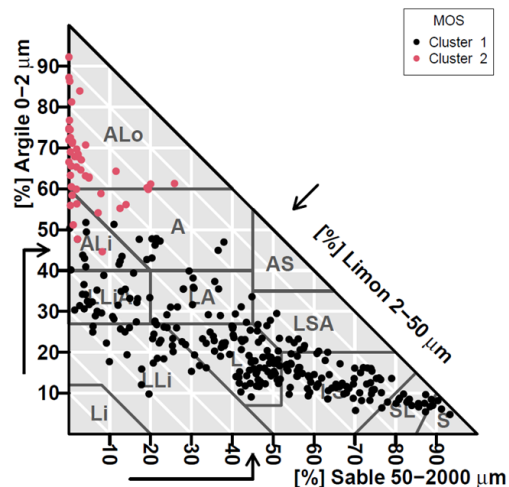
Création de cluster en fonction de la texture

La statistique de Hopkins a été calculée avec la fonction `get_clust_tendency` du package `factoextra` de R pour évaluer l'aptitude de l'indicateur à la clusterisation en fonction de la teneur en argile et en sable. Une valeur de 0,82 a été obtenue et traduit que la teneur en matière organique du sol est significativement clusterisable en fonction de la texture du sol. La méthode « Silhouette » a permis de retenir un nombre de clusters optimal de 2 (Figure 2 - A) et l'implémentation du regroupement hiérarchique agglomératif à l'aide de la fonction « `hcut` » a conduit aux clusters présentés sur le triangle textural de la Figure 2 - B. Le cluster 1 intègre les sites à texture plus grossière et ayant des teneurs moyennes en MOS plus faibles, soit 4,5 % (Quartile1 = 3,1 % ; Quartile3 = 5,5 %). Les sites avec une teneur en argile supérieure ou égale à 50 % ont constitué le cluster 2 avec des valeurs de matière organique en moyenne plus élevées (Q1 = 4,3 % ; moyenne = 6,4 % ; Q3 = 7,9 % ; Figure 2 - C).

A) Nombre de clusters optimal



B) Triangle texturale – Clusters Matière organique



C) Répartition géographique des teneurs en matière organique et représentation des clusters.

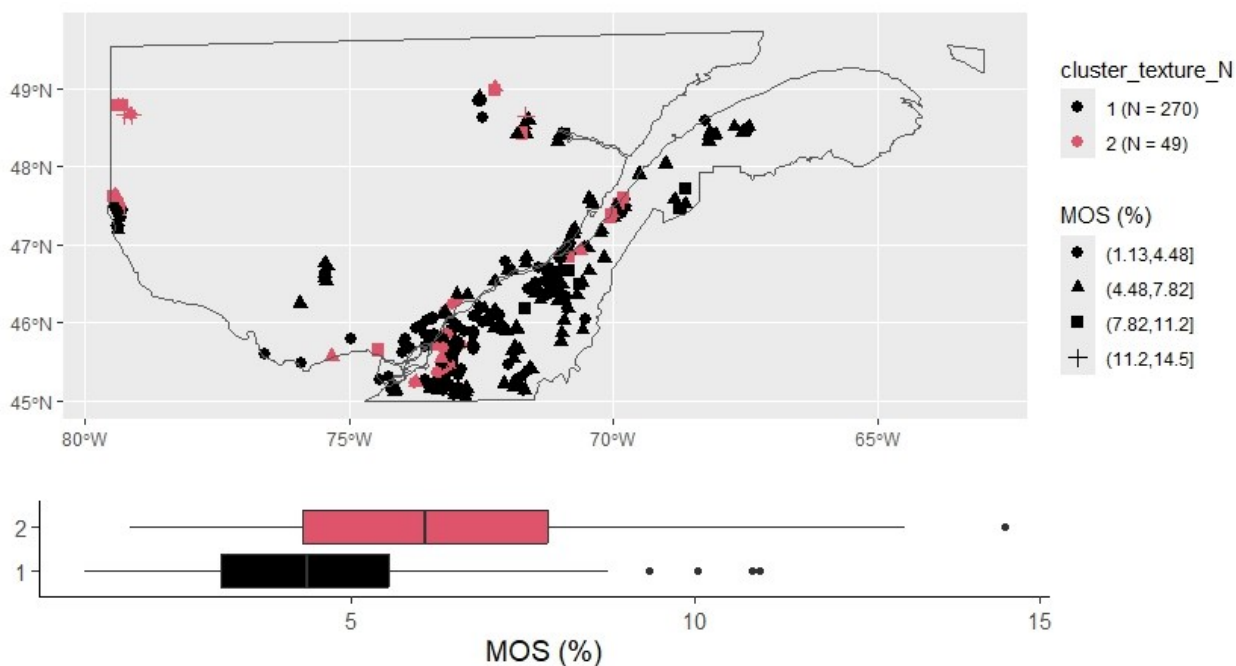


Figure 2. Graphique illustrant la variation de la largeur de silhouette moyenne en fonction du nombre de clusters (A) et la représentation des clusters sur le triangle textural (B) et sur un fond de carte (C).

Le cluster 2 représentait environ 15 % du jeu de données et est réparti de manière approximativement égale de part et d'autre de la latitude 46,5°N. Cependant, 50 % des observations du cluster 2 se trouvant au nord de cette latitude de 46,5°N ont une teneur en MOS environ 2 fois plus élevées que celles plus au sud (8,1 % contre 4,3 %). Produisant un écart de 3,8 % dans le cluster 2 et une même tendance dans le cluster 1 (écart de 1,2 % - Référence latitude 46,5°N), les conditions climatiques contrastées entre le nord et le sud du Québec exerceraient une influence plus élevée sur la variabilité de la teneur en matière organique que la texture du sol. Cette influence

plus importante du climat sur la matière organique a aussi été rapportée à l'échelle des États-Unis (Nunes et al., 2021). Le climat contrasté entre le nord et le sud du Québec influence à la fois le choix des cultures, l'intensité des pratiques culturales liées aux cultures, et finalement la dynamique et le cyclage des résidus de culture et la matière organique à l'intérieur du sol même. La variable `cluster_texture` issue de cette analyse sera tout de même utilisée en second lieu en vue de réduire la variabilité des seuils à travers des groupes de population de sols argileux et sableux dans l'analyse par arbre de régression.

Analyse par arbre de régression

Pour bâtir des arbres de régression expliquant la distribution des teneurs en matière organique du sol, des facteurs liés au climat, au sol (texture, pH eau) ainsi qu'au relief ou terrain ont été introduits dans les modèles et testés. L'effet du climat a été introduit en considérant les valeurs moyennes, maximales et minimales pour la période 1991 à 2010 des températures annuelles et mensuelles, la température moyenne de la saison de culture, les nombres de degré-jours à base de 0, 5 et 10°C, les jours juliens du dernier gel du printemps à base de 0, -2 et -4°C ainsi que le nombre de jours avec et sans gel, la précipitation et l'évapotranspiration ([Données agroclimatiques d'AAC](#))

Les matériaux parentaux (Argileux, Loameux, Sableux à squelettique et Tills) ainsi que 6 autres combinaisons de matériaux parentaux (par exemple matériauParental4 n'a retenu que 2 classes en agrégeant Argileux + Loameux + Tills d'un côté et les sols issus de matériaux sableux à squelettique de l'autre), les teneurs en sable et argile, le cluster de texture, l'altitude, la forme du relief et le pourcentage de pente ont été retenus comme paramètres liés à la texture et au relief.

La fonction `rpart` du package R du même nom a été utilisé pour les arbres de régression. Pour chaque tour d'analyse, le paramètre `maxdepth` qui limite le nombre d'étage variait de 2 à 3 et le quart du jeu de données a été fixé comme seuil de subdivision minimale (`minsplit`). En cas d'autocorrélation entre les variables, de problème de normalité des résidus ou de clusters non conformes, cette étape a été répétée en excluant des variables jusqu'à l'obtention de résultats cohérents. Pour l'ensemble des cas testés pour la matière organique, le premier paramètre d'importance qui influençait la distribution des données a été la température moyenne annuelle. Pour alléger le document, les graphiques ont été présentés en Annexe A et Annexe B. À la fois, pour un `maxdepth` de 3 (Voir Annexe A et Annexe B) et un `maxdepth` de 2 (Figure 3), un seuil de température moyenne annuelle autour de 5°C a été obtenu avec les deux modèles. Les résultats pour le modèle avec `maxdepth` = 3 a proposé 6 clusters entre lesquels il y a peu de différences. En plus de la température et de l'altitude du point d'échantillonnage, le matériau parental a été l'un des principaux paramètres qui déterminent la construction des clusters. Avec `maxdepth`=2, le modèle a proposé une première segmentation de l'ensemble des données en 2 groupes.

Les sites en zone méridionale (voir Figure 4) où la température moyenne est supérieure ou égale à 4,9°C ont représenté un peu plus de la moitié du jeu de données (60 %) avec une valeur moyenne de matière organique de 2,2 % de moins que les sites dans les régions plus froides (5,8 % de MOS, zone périphérique de la Figure 4). Plusieurs facteurs tels qu'un taux de minéralisation plus élevé avec l'augmentation de la température et des systèmes de cultures plus intensifs avec moins de cultures pérennes et davantage de cultures annuelles et de travail de sol dans les régions plus au sud pourraient expliquer les teneurs moins élevées de matière organique. En plus de la température, l'altitude des sites, la précipitation annuelle, le pH eau et le matériau parental ont

constitué les principales variables d'importance du modèle tel que montré dans la Figure 3-B. L'analyse graphique des résidus ainsi que le test de Shapiro ont permis de valider l'hypothèse de normalité des résidus (Figure 3-C).

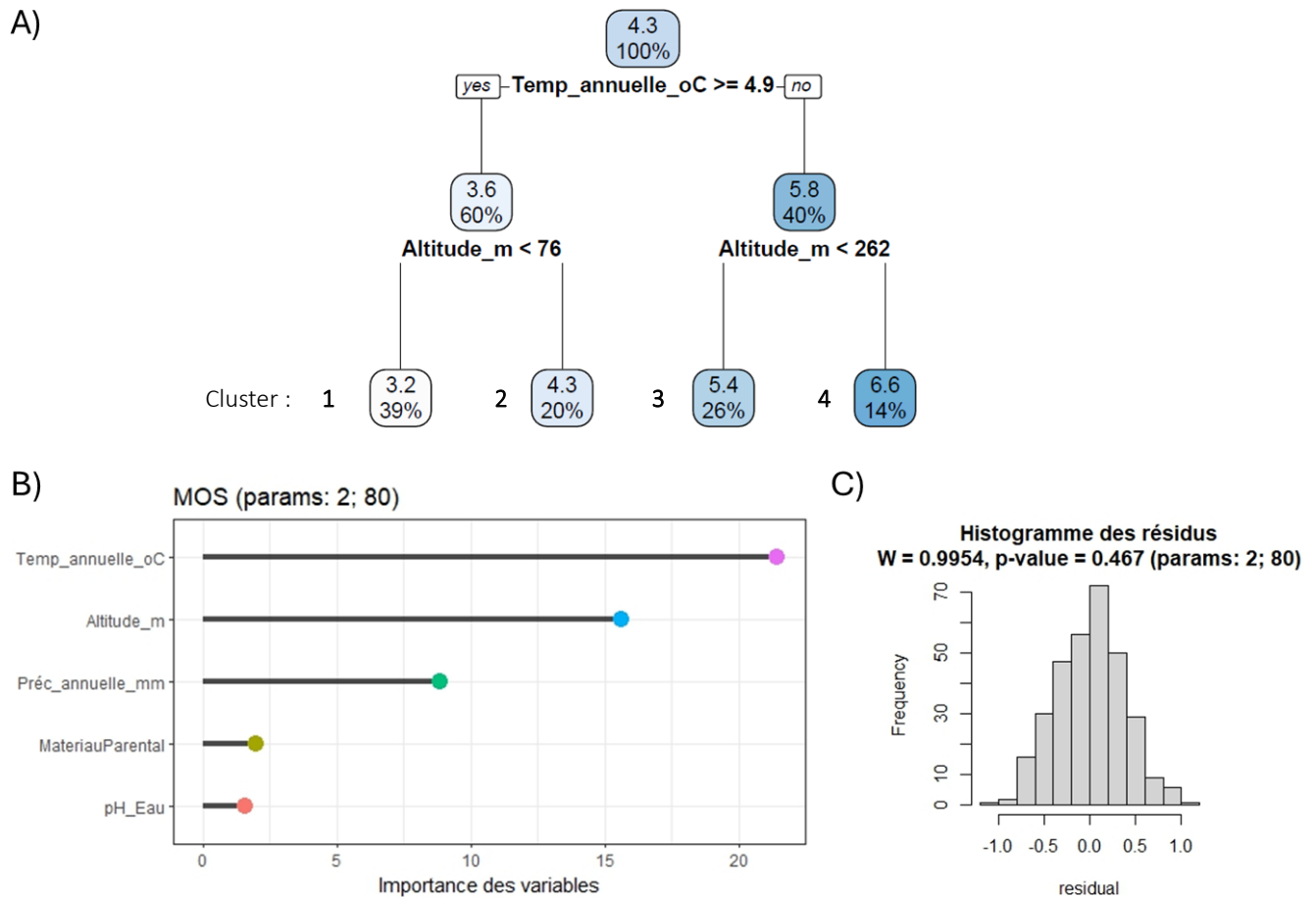


Figure 3. Résultats de l'analyse par arbre de régression avec les paramètres maxdepth = 2 et minsplitle = 80 (A). L'importance des variables dans le modèle (B) et l'analyse des résidus issus du modèle (C).

La zone méridionale s'étend majoritairement : i) à l'ouest de Lachute dans les Laurentides jusqu'à Donnacona dans la Capitale-Nationale en passant par Shawinigan Sud ; ii) à l'est de Stanstead jusqu'à Saint-Apollinaire en passant par Cookshire, Warwick et Plessisville. La zone méridionale se prolonge aussi à l'ouest de la province jusqu'à la municipalité des Rapides-des-Joachims en Outaouais ; de la municipalité de Dudswell en Estrie à la municipalité de Disraeli dans les Appalaches à l'est ainsi qu'autour du fleuve dans les environs de Saint-Antoine-de-Tilly jusqu'au niveau de Saint-Jean-Port-Joli dans Bellechasse (Voir Annexe C pour plus de détails).

En zone méridionale, les sols ont une teneur moyenne en MOS de 3,6 % et le modèle a proposé une segmentation de l'arbre de régression en deux branches à partir d'un seuil de 76 m d'altitude. Les sols d'altitude plus basse (cluster 1) avaient une teneur moyenne en MOS 1,1 % plus faible par rapport à ceux à plus 76 m d'élévation (cluster 2). En zone périphérique, l'altitude a aussi été la principale variable d'importance retenue et un seuil de 262 m a été déterminé en vue de maximiser la différence entre les clusters 3 et 4. Comme pour la zone plus chaude, les sites dont l'altitude se trouve en dessous de la valeur seuil ont présenté des valeurs de MOS plus

faibles comparativement aux sites en zone plus élevée et un écart de 1,2 % de MOS a été obtenu entre les deux clusters. L'écart est semblable à celui de la zone méridionale et l'altitude pourrait être considérée comme un proxy du matériau parental du sol puisque on retrouve plus souvent les sols issus de matériaux parentaux argileux, loameux et sableux à squelettique en élévation basse (< 76 ou < 262 m) alors que les tills se retrouvent plus fréquemment en élévation plus élevée (Figure 7).

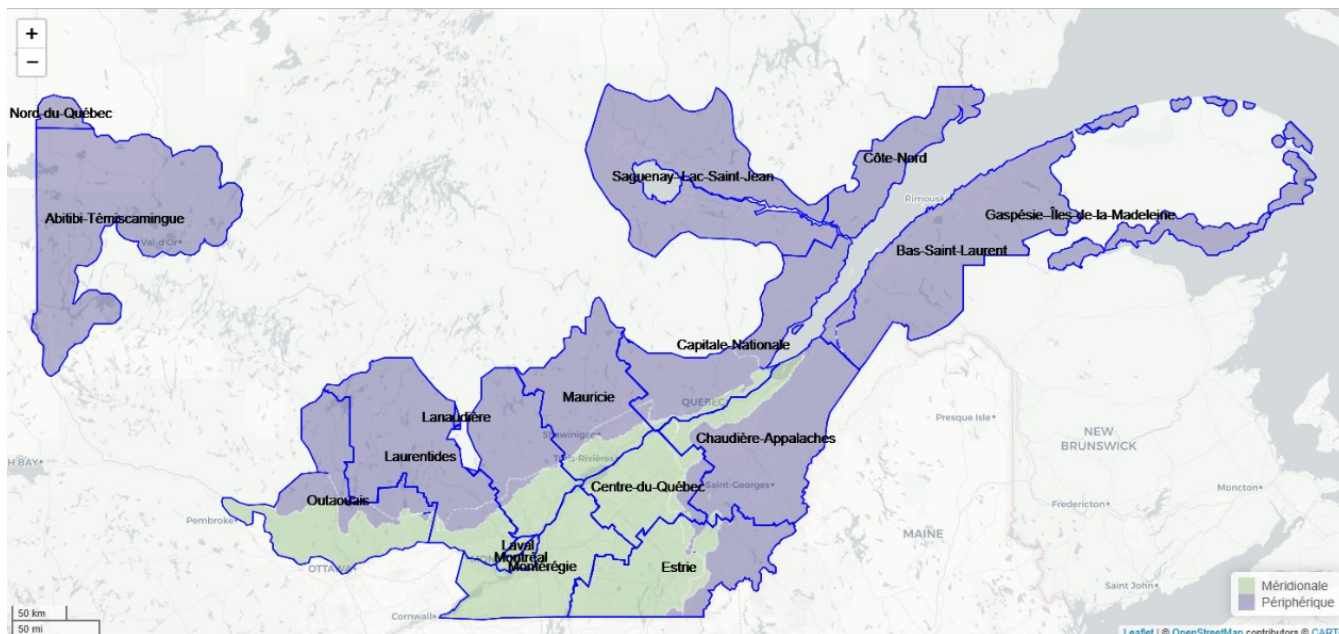


Figure 4. Délimitation des deux zones climatiques (Périphérique : température annuelle moyenne inférieure à 5°C ; Méridionale : supérieure à 5°C) définissant la teneur en matière organique du sol à l'échelle du Québec.

Modélisation et visualisation des courbes de distribution normale cumulée

Sur la base de l'analyse par arbre de régression, quatre clusters ont été définis selon les deux principaux facteurs caractérisant les sites et influençant la distribution de la teneur en matière organique du sol (MOS) : la température et l'altitude. Sur la base de ces clusters, le meilleur modèle de régression non linéaire a été sélectionné en utilisant le critère d'information Akaike (AIC) pour évaluer les performances.

Dans ce but, un modèle linéaire généralisé mixte a été mis en œuvre via la procédure « Template Model Builder » dans le logiciel R (R Core Team, 2025), en utilisant la fonction `glimmTMB` du package `glimmTMB` (Brooks et al., 2017). Après avoir examiné toutes les combinaisons possibles des variables explicatives, les cinq modèles présentant les valeurs d'AIC les plus basses ont été retenus. À la suite de la vérification des hypothèses de normalité des résidus, le modèle le plus performant parmi ces cinq a été choisi.

Le modèle retenu pour caractériser la variation de la transformation logit de la MOS intègre comme variables fixe la précipitation et les clusters issus des matériaux parentaux et de l'arbre de régression. La précipitation a aussi été incluse dans ce modèle comme effet aléatoire.

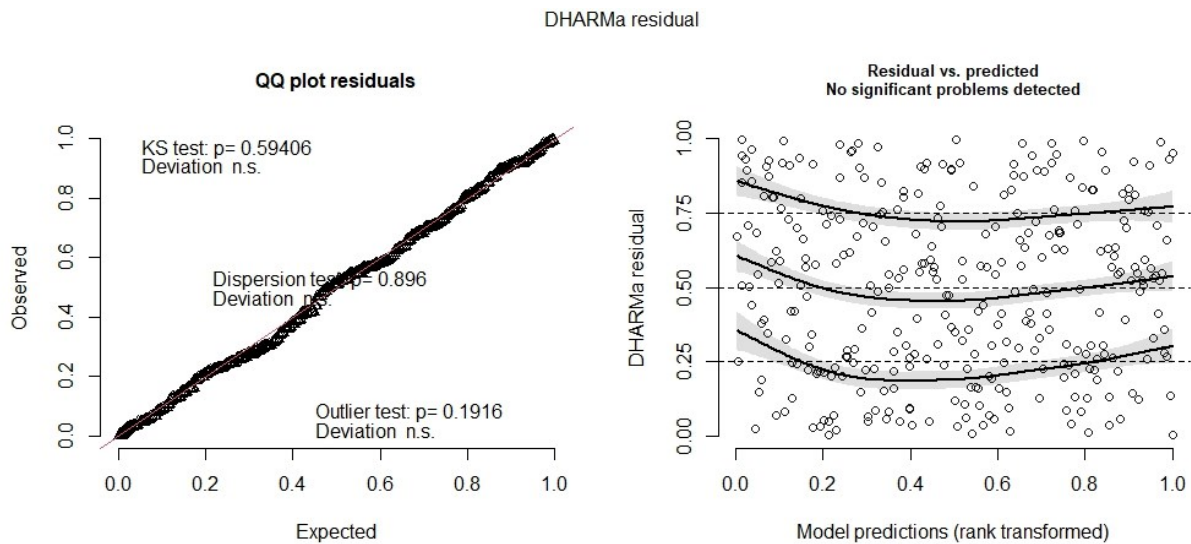


Figure 5. Analyse des résidus du meilleur modèle permettant la modélisation de la matière organique du sol

L'analyse des contrastes entre clusters a permis de déterminer qu'il n'y a pas de différence significative entre les clusters 3 et 4 ; cependant les clusters 1 (a) et 2 (b) sont significativement différents entre eux et par rapport aux clusters 3 et 4 (c) (Figure 6 A). Dans la Figure 6 B, la comparaison des scores moyens a permis de constater qu'à des niveaux égaux de MOS, les clusters 3 et 4 présentent un écart de score moyen plus faible (6,5 points de pourcentage), comparativement aux clusters 1 et 2 (9,4 points). Les écarts de score les plus marqués ont été observés à des teneurs d'environ 4,6 % de MOS (36 points) entre les clusters 1 – 2 et de 7,4 % de MOS entre les clusters 3 – 4 (19 points).

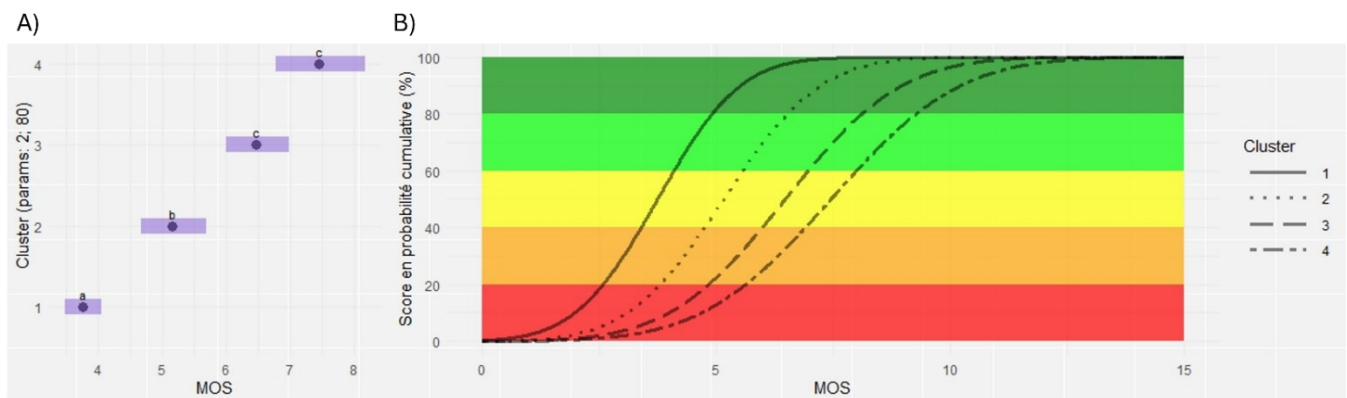


Figure 6. A) Modélisation de la matière organique et différence entre la moyenne par cluster- Modèle : $\text{logit}(\text{MOS}) \sim \text{Préc_annuelle_mm} + \text{cluster} + \text{cluster_texture} + (1 \mid \text{Préc_annuelle_mm})$; B) Courbe de distribution des scores en termes de probabilité normale cumulative en fonction des clusters définis par l'analyse d'arbre de régression.

Il n'y a pas d'effet significatif de l'altitude dans la zone périphérique. Toutefois, le cluster 3, qui compte une proportion huit fois plus élevée de sites à matériau parental sableux que le cluster 4, présente, pour un même score, des teneurs en MOS plus faibles sur la majeure partie de la courbe. De plus, aucun site issu de matériaux

loameux n'est observé dans le cluster 4, alors que 34 % des sites (28) du cluster 3 sont caractérisés par un matériau parental loameux.

Cette hétérogénéité dans la distribution des sites selon le matériau parental se retrouve également entre les clusters 1 et 2. Le cluster 1, qui regroupe environ deux fois plus de sites que le cluster 2, comprend des ratios approximatifs de 12 : 1 pour les sites issus de matériaux argileux et de 10 : 1 pour les sites issus de tills/glaciers. (voir Figure 7). En complément de cette répartition inégale des observations, une corrélation négative relativement élevée (-0,7 à -0,8) a été observée entre la température moyenne annuelle et l'altitude, selon le matériau parental. Cela augmente le risque de multicollinéarité dans la modélisation des teneurs moyennes en MOS par cluster.

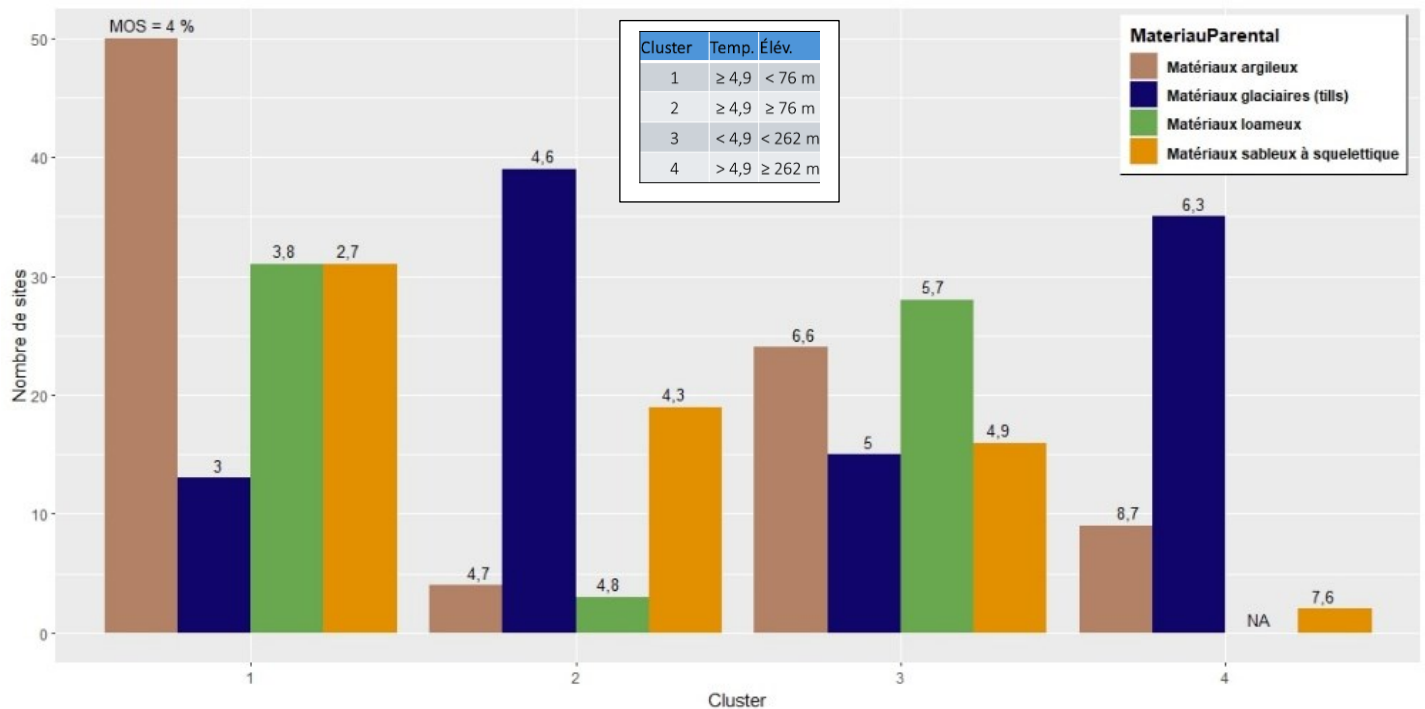


Figure 7. Nombres de sites et valeur moyenne de MOS (%) en fonction des clusters définis par l'analyse d'arbre de régression et du matériau parental.

Face à ces problèmes, et compte tenu de la difficulté pour un utilisateur de se situer sur une carte d'altitude, seuls les matériaux parentaux et la zone climatique définie par l'effet de la température moyenne ont été retenus pour scinder les distributions des teneurs en MOS en cluster plus homogènes. Les distributions des matériaux parentaux Argileux, Limoneux et Tills ont par ailleurs été regroupées étant donné que leurs moyennes n'étaient pas significativement différentes. Ainsi, les quatre clusters retenus comme référentiel pour l'étude de l'indicateur MOS se distinguent selon la séparation des sites issus de matériaux parentaux Sableux des autres, pour les deux zones définies par la température.

Généralisation et proposition de clusters

Pour chacun des indicateurs considérés, la même procédure que celle appliquée à la matière organique a été mise en œuvre en vue de déterminer, d'une part, les principaux facteurs d'influence, et d'autre part, de définir les clusters les plus pertinents pour interpréter la courbe de distribution des scores. Tous les horizons (Ap1, Ap2, Ap jusqu'à 20 cm et B) ont été testés dans le cadre des analyses exploratoires. L'horizon Ap superficiel (0-20 cm), qui concentre les activités biologiques du sol, a été retenu pour les indicateurs liés à la matière organique et à la chimie-fertilité. Pour les indicateurs liés à la condition physique du sol, le diamètre moyen pondéré a été évalué uniquement dans l'horizon Ap1 et la macroporosité a été évaluée dans l'horizon B, étant donné que sa variation dans l'horizon Ap est fortement influencée par les travaux de sol récents, tandis qu'elle est plus susceptible de révéler des problèmes de compaction à long terme dans l'horizon B. Étant fortement corrélée à la teneur en matière organique, la masse volumique apparente a été examinée à la fois dans les horizons Ap et B.

À partir des onze indicateurs de qualité des sols, incluant notamment la masse volumique apparente dans les horizons Ap et B, des analyses par arbre de régression ont permis d'identifier 52 nœuds correspondant à des seuils spécifiques. Ces nœuds sont associés à six paramètres principaux, selon les fréquences d'occurrence suivantes : température annuelle moyenne (31 %), altitude (23 %), matériau parental (19 %), variable « cluster_texture » (11 %), précipitation annuelle moyenne (8 %) et pH-eau (8 %).

Afin de favoriser une classification unifiée et simplifier l'interprétation, seuls les paramètres dont la fréquence dépasse 10 % ont été retenus. Toutefois, même parmi ces paramètres dominants, les seuils varient considérablement d'un indicateur à l'autre. Par exemple, la température annuelle constitue une variable clé pour la majorité des indicateurs, à l'exception du diamètre moyen pondéré (DMP) et de la teneur en soufre extrait en solution Mehlich III. Onze seuils de température ont ainsi été identifiés, variant de 4,7 °C à 6,7 °C. La matière organique du sol (MOS), ou carbone total, étant reconnue pour son influence sur l'ensemble des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol et largement recommandée pour le suivi de la santé des sols, le seuil de 5 °C issu de l'analyse de la MOS a été retenu comme référence commune pour tous les indicateurs. Ce choix vise à faciliter l'application et l'adoption des indicateurs et de leurs seuils de références, ainsi qu'à en favoriser la diffusion auprès d'un public élargi.

L'altitude étant fortement corrélée à la température et à la variable « cluster_texture » un proxy lié à la texture du site, ces deux paramètres ont été écartés. La température annuelle moyenne (zone) et le matériau parental ont été retenus pour la constitution des clusters. Ainsi, pour chaque indicateur, l'analyse s'appuie sur des zones définies selon la température et sur des regroupements distincts de matériaux parentaux. Seuls les clusters présentant des courbes avec des moyennes modélisées significativement différentes ont été conservés et sont présentés dans les résultats. Les paramètres permettant de caractériser les courbes de distribution normale (moyenne et écart-type) et gamma (forme et taux) sont résumés dans les Tableau 1 et Tableau 2.

Tableau 1. Valeurs moyennes et écarts-types des indicateurs caractérisés par une courbe de distribution normale par matériau parental et/ou zone climatique

Indicateurs	Matériau parental	Zone	Moyenne	Écart-type
Matière Organique (Horizon Ap - %)	Argileux+Loameux+Tills	Périphérique	5,9 (d)	2,10
		Méridionale	3,76 (b)	1,52
	Sabl. à squel.	Périphérique	4,61 (c)	1,86
		Méridionale	2,93 (a)	1,41
Carbone Actif (Horizon Ap - mg/kg)	Argileux+Loameux+Tills	Périphérique	674,8 (c)	180,2
		Méridionale	516,2 (b)	150,3
	Sabl. à squel.	Périphérique	584,9 (b)	153,9
		Méridionale	438,0 (a)	154,1
CO2 dégagé (0_14j) (Horizon Ap - mg/kg)	Tout type	Périphérique	617,2 (b)	274,4
		Méridionale	363,4 (a)	187,6
Diamètre Moyen Pondéré (Horizon Ap - mm)	Argileux		3,48 (c)	0,81
	Loameux+Tills		2,68 (b)	0,71
	Sabl. à squel.		1,83 (a)	0,73
K M3 (Horizon Ap - mg/kg)	Argileux		237,2 (b)	102,0
	Sabl. à squel.+ Loameux+Tills		112,5 (a)	79,6
Masse Volumique Apparente (Horizon Ap - g/cm3)	Tout type	Périphérique	1,15 (a)	0,14
		Méridionale	1,33 (b)	0,14
Masse Volumique Apparente (Horizon B - g/cm3)	Argileux		1,41 (a)	0,14
	Sabl. à squel.+ Loameux+Tills		1,52 (b)	0,20

Sabl. à squel. : Sableux à squelettiques

Tableau 2 : Valeurs moyennes et paramètres de forme et de taux des indicateurs caractérisés par une courbe de distribution gamma par matériau parental et/ou zone climatique

Indicateurs	Matériau parental	Zone	Moyenne	Forme	Taux
Conductivite hydraulique (Horizon B - m/j)	Argileux+Loameux		0,11 (a)	0,10	0,90
	Sabl. à squel.		3,45 (c)	1,14	0,33
	Tills		0,33 (b)	0,64	1,97
Macroporosité (Horizon B - cm ³ /cm ³)	Argileux		0,07 (a)	6,17	99,41
	Loameux+Tills		0,09 (b)	4,64	44,63
	Sabl. à squel.		0,22 (c)	12,35	61,26
N Minéralisable (Horizon Ap - mg/kg)	Argileux+Loameux+ Tills	Périphérique	76,74 (c)	7,18	0,09
		Méridionale	46,07 (b)	4,02	0,09
	Sabl. à squel.	Périphérique	52,81 (b)	2,80	0,05
		Méridionale	31,71 (a)	2,49	0,08
S M3 (Horizon Ap - mg/kg)	Argileux		5,07 (a)	1,80	0,35
	Loameux		9,3 (b)	3,05	0,33
	Sabl. à squel.+Tills		12,57 (c)	7,31	0,58

Sabl. à squel. : Sableux à squelettiques

INDICATEURS LIÉS À LA MATIÈRE ORGANIQUE DU SOL

La santé des sols est un concept clé qui vise l'intégration et l'optimisation des paramètres physiques, chimiques et biologiques des sols en vue de soutenir les deux principales fonctions écosystémiques du sol à savoir la productivité et la préservation de la qualité de l'environnement. Les paramètres liés à la condition physique et à la chimie-fertilité du sol ont été largement étudiés dans la littérature dès l'apparition du concept contrairement aux paramètres biologiques. Dans une revue de littérature proposée par Bünemann et al. (2018) sur la qualité des sols en contexte agricole, les paramètres physico-chimiques ont eu une fréquence d'occurrence de 70 % sur les 49 articles étudiés alors que moins de 30 % des études ont fait référence à des propriétés biologiques. Dans une autre revue bibliographique impliquant 92 articles, seulement 6 indicateurs sur 31 étaient de nature biologique et aucun des 6 ne faisait partie des 14 plus fréquemment utilisés, soit une occurrence de plus de 20 % (Valani et al., 2021). Considérant l'importance d'une bonne compréhension et une gestion optimale des propriétés biologiques des sols, le modèle CASH dans son cadre d'analyse proposé en 2016 a mis l'emphase sur cet aspect

dans l'évaluation de la santé des sols (Moebius-Clune et al., 2016). Une étude récente sur les 50 dernières années a montré une nette augmentation des études incluant des indicateurs biologiques (Bonilla-bedoya et al., 2023) et ce constat serait lié aux progrès technologiques des 20 dernières années. Dans l'ÉSSAQ, une attention particulière est accordée aux propriétés liées à la matière organique du sol. Quatre des 8 indicateurs étudiés sont liés soit directement à la teneur en matière organique ou à la dynamique de celle-ci (azote minéralisable, carbone actif, CO₂ dégagé) plus sensible à l'activité humaine.

La matière organique du sol (MOS)- Horizon Ap

Depuis les années 1970, la dynamique de la matière organique ainsi que les principaux indicateurs connexes tels que la matière organique du sol, le carbone organique total du sol, l'activité microbienne, les activités enzymatiques et la biomasse microbienne constituent les indicateurs biologiques les plus utilisés (Bonilla-bedoya et al., 2023; Cousin et al., 2025). La revue bibliographique de Bünemann et al. (2018) sur les indicateurs de qualité de sols a recensé la matière organique du sol comme premier indicateur de santé du sol avec une fréquence d'occurrence de 90 % dans les articles recensés avant 2018. Toutefois, cette occurrence de la matière organique du sol comme indicateur de santé de sol est baissée à 75 % dans les travaux produits entre 2018 et 2023 ont intégré (Cousin et al., 2025). Ce paramètre reste le principal indicateur qui renseigne sur l'état de santé des sols. La matière organique du sol étant composée à 58 % de carbone organique (ou son ratio inverse de 1,724), ces deux propriétés sont souvent interchangeables dans la littérature pour désigner le même indicateur. Par exemple, l'ÉSSAQ a mesuré le carbone total dans les sols par combustion sèche (LECO 828), alors que les producteurs obtiennent généralement des estimées de la teneur en matière organique par perte au feu (incinération au four).

Dans le contexte actuel de changements climatiques, Toor et al. ont proposé une définition ciblée de la santé du sol en se basant sur la matière organique et sa dynamique dans le sol en stipulant que : *La santé des sols est la capacité des sols à fournir un puits de carbone pour atténuer le changement climatique et un réservoir pour stocker les nutriments essentiels à une productivité durable de l'écosystème* (Toor et al., 2021). La matière organique étant le plus large réservoir de carbone terrestre à cycle actif, sa diminution à cause d'une réduction des apports de biomasses organiques au sol ou d'une augmentation de la minéralisation affecte négativement plusieurs fonctions et propriétés du sol (Smith et al., 2024). En comparaison aux facteurs climatiques, géologiques et de formation des sols, les activités anthropiques impliquant la perturbation de la végétation, les changements de vocation du sol, le labour répété, le retrait des résidus de récolte ou le drainage des tourbières constituent la cause dominante de pertes de matière organique des sols cultivés malgré la caractéristique de stabilité attribuée au carbone total du sol (Smith et al., 2024).

Dans le cadre de l'ÉSSAQ, la MOS a été calculée en multipliant par le facteur 1,724 le C total déterminé par combustion sèche sur un analyseur LECO CN828 à température de 950°C. Dans ce rapport, la MOS a été retenue comme le principal indicateur pour l'étude de la santé des sols en raison de son rôle transversal dans le maintien des grandes fonctions et propriétés du sol. Suivant l'analyse de la distribution des données de teneurs en matière organique des sols du Québec, deux zones ont été définies et l'allure des courbes de chaque a été étudié en tenant compte du matériau parental. La Figure 8 montre les courbes d'évaluation de la matière organique du sol en termes de probabilité de fréquence cumulative et les limites maximales et minimales observées en fonction de la zone et du matériau parental. Les sites issus de matériaux parentaux argileux, loameux et les tills, présentant des allures similaires et des moyennes qui n'étaient pas significativement différentes, ont été regroupés pour faciliter

la compréhension et l'adoption du système de référence. Finalement, deux groupes ont été formés : 1) Argileux + Loameux + Tills ; 2) Sableux à squelettiques.

Des teneurs de MOS plus faibles ont été observées dans la zone méridionale comparativement à la zone périphérique. Des niveaux de minéralisation plus élevés, liés à des températures plus élevées et couplés à des pratiques culturales intensives, pourraient entraîner une accumulation moins marquée de MOS dans la zone méridionale. En plus de la température, un effet certes plus faible a été observé en fonction du matériau parental. À l'intérieur de chaque zone, les sols sableux à squelettiques ont présenté des niveaux de MOS inférieurs à ceux des autres. Avec des taux d'argile plus élevés, ces derniers sont caractérisés par une surface spécifique plus grande et une capacité d'adsorption plus élevée. Couplés à leur aptitude à former des complexes argilo-humiques, les sols avec plus d'argile seraient plus aptes à stocker la MOS. Les différences les plus marquées sont observées pour un même matériau parental d'une zone à l'autre.

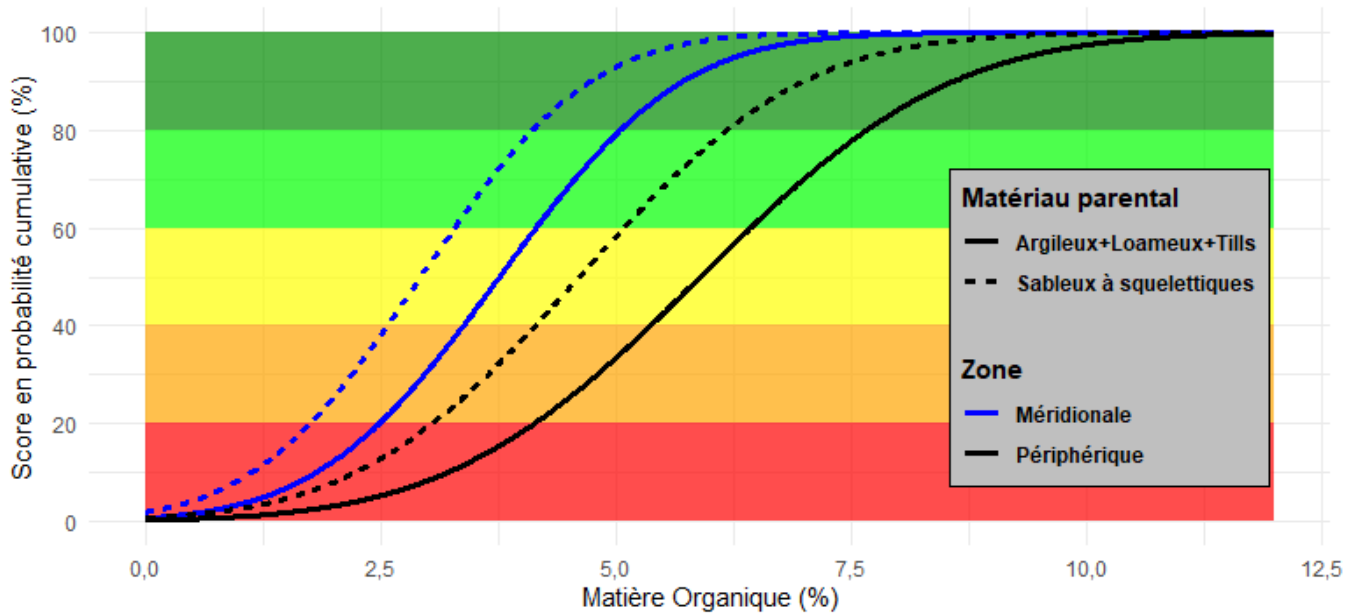


Figure 8. Courbes de notation de la teneur en matière organique du sol dans l'horizon Ap selon le matériau parental et la zone climatique.

En termes de probabilité, près de 78 % des sols sableux à squelettiques en zone méridionale ont une teneur en MOS inférieure à 4,0 %, la teneur en MOS visée comme indicateur de performance dans le Plan d'agriculture durable du MAPAQ (Tableau 3). En zone périphérique, moins de 37 % des sols issus de matériaux parentaux sableux à squelettiques ont une teneur en MOS inférieure à 4,0 %. Pour les sols à texture plus fine (Matériaux argileux, loameux et tills) la proportion de sols avec une teneur inférieure à 4,0 % est moins de 56 % et 18 % respectivement pour les zones méridionale et périphérique. Les sols sableux et même les autres sols en zone méridionale méritent donc une attention particulière pour augmenter leur niveau de santé et de productivité à des niveaux comparables aux autres sols des régions périphériques.

Tableau 3. Classes de matière organique du sol (%) dans l'horizon Ap selon le matériau parental et la zone climatique.

Matériau parental	Zone	Teneur en MOS (%)				
		Très faible (≤ 20 %)	Faible (20-40 %)	Moyenne (40-60 %)	Élevée (60-80 %)	Très élevée (> 80 %)
Argileux + Loameux + Tills	Périphérique	≤ 4,1	4,1 - 5,4	5,4 - 6,4	6,4 - 7,7	> 7,7
	Méridionale	≤ 2,5	2,5 - 3,4	3,4 - 4,2	4,2 - 5,0	> 5,0
Sableux à squelettiques	Périphérique	≤ 3,0	3,0 - 4,1	4,1 - 5,1	5,1 - 6,2	> 6,2
	Méridionale	≤ 1,7	1,7 - 2,6	2,6 - 3,3	3,3 - 4,1	> 4,1

L'azote minéralisable- Horizon Ap

L'azote minéralisable aussi connu sous l'appellation de l'azote potentiellement minéralisable se définit comme étant la fraction de l'azote organique du sol facilement convertible vers une forme d'azote directement assimilable par les plantes et les microorganismes du sol (Bashir et al., 2023). Cet indicateur joue un rôle important dans le cycle de l'azote du sol en participant à différents processus incluant la minéralisation, l'immobilisation, la nitrification et la dénitrification. À partir de la minéralisation de l'azote organique, des ions ammonium et nitrate sont produits. Le nitrate est susceptible à des pertes par lessivage dans l'environnement. Alors, l'azote minéralisable renseigne à la fois sur la disponibilité de l'azote pour la nutrition des plantes et également sur le risque de lessivage des nitrates et de pollution de l'eau (Bashir et al., 2023; Gasser, Bossé et al., 2023).

Dans le cadre de l'EESSAQ, l'azote potentiellement minéralisable a été déterminé en incubation aérobie et à température ambiante (environ 21°C) sur une période de 14 jours par différence entre les teneurs en azote minéral après et avant incubation selon une méthode adaptée de Drinkwater et al. (1996). Des informations supplémentaires sur la méthode de dosage ont été présentés dans le Rapport 1 de l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec (Gasser, Bossé et al., 2023). En étant la source primaire de l'azote utilisé dans la minéralisation, la MOS a été le facteur clé qui détermine le niveau de l'azote potentiellement minéralisable et les mêmes clusters que ceux considérés pour la matière organique ont été jugés optimaux pour l'évaluation des courbes de fréquence. Cependant, l'azote potentiellement minéralisable est moins stable que le MOS et a été plus influencé par l'activité humaine. Dans la Figure 9, le même constat d'une diminution de la teneur en azote minéralisable avec la température et l'origine sableuse à squelettique du matériau parental a été fait. Toutefois, pour les 40 % de sols avec une teneur en azote minéralisable approximativement inférieure ou égale à 40 mg/kg, les sites issus de matériaux parentaux sableux en zone périphérique ont présenté des valeurs similaires à ceux issus de matériaux parentaux non sableux en zone méridionale. En dépit des niveaux plus élevés de MOS en zone périphérique, les sols sableux avec de plus faibles niveaux de matière organique présentent une plus faible capacité de minéraliser de l'azote à partir de la matière organique et par conséquent, rendre plus difficile l'alimentation en azote des plantes.

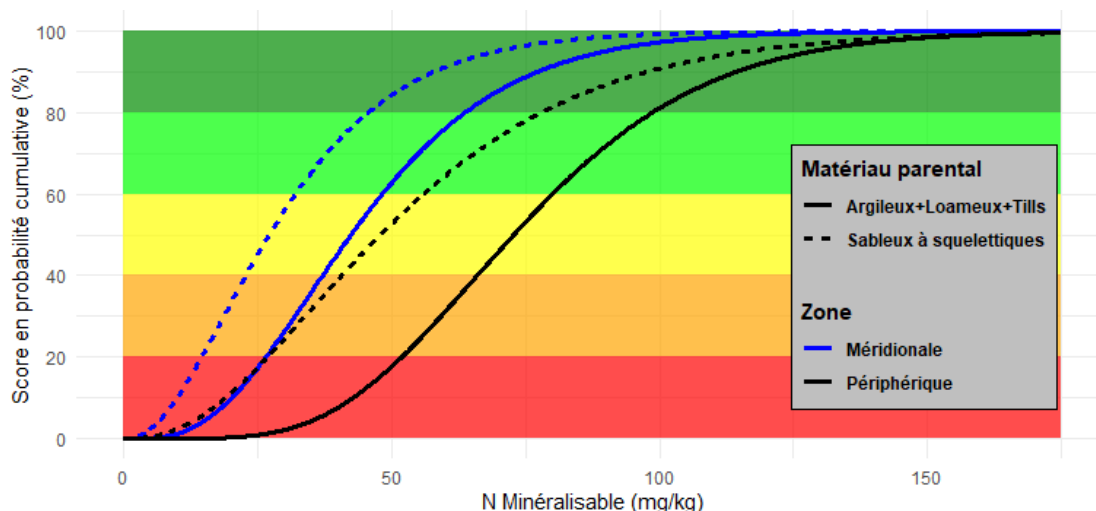


Figure 9. Courbes de notation de la teneur en azote minéralisable selon le matériau parental et la zone climatique.

Dans le Tableau 4, des valeurs seuils ont été présentées pour les différentes classes de teneur en azote minéralisable du sol en fonction de la zone et le matériau parental. Puisque les niveaux de N minéralisable extrêmes peuvent avoir une incidence sur la nutrition des plantes et la qualité l'environnement, les classes moyenne et élevée seraient idéales pour une bonne adéquation entre la productivité et la protection de l'environnement. De ce fait, dans le contexte d'un sol dont le matériau parental est sableux, des valeurs comprises entre 30,2 et 58,5 mg/kg seraient visées dans la zone méridionale alors que des valeurs allant de 48,9 à 93,0 mg/kg seraient optimales en zone périphérique.

Tableau 4. Classes de teneurs en azote minéralisable du sol selon le matériau parental et la zone climatique.

Matériau parental	Zone	Très faible (≤ 20 %)	Faible (20-40 %)	Moyenne (40-60 %)	Élevée (60-80 %)	Très élevée (> 80 %)
Argileux + Loameux + Tills	Périphérique	≤ 52,0	52,0 - 66,0	66,0 - 80,1	80,1 - 98,7	> 98,7
	Méridionale	≤ 26,6	26,6 - 37,2	37,2 - 48,3	48,3 - 63,8	> 63,8
Sableux à squelettiques	Périphérique	≤ 26,9	26,9 - 40,7	40,7 - 56,0	56,0 - 78,0	> 78,0
	Méridionale	≤ 14,6	14,6 - 22,9	22,9 - 32,1	32,1 - 45,6	> 45,6

Le carbone actif- Horizon Ap

Le carbone actif est un indicateur de la santé des sols de plus en plus considéré dans les récentes études en raison de son rôle important dans le cycle de carbone du sol et de sa grande sensibilité aux pratiques de gestion des sols. Il est l'un des paramètres issus de la dynamique de la MOS qui influence de manière significative l'activité des microorganismes du sol et la disponibilité des nutriments. Mesuré par oxydation au KMnO_4 dans le cadre de l'EESSAQ, le carbone actif est souvent considéré comme un bon indicateur de la fraction labile du carbone organique du sol (Bünemann et al., 2018; Weil et al., 2003). Son caractère sensible au mode de gestion du sol lui confère une plus grande aptitude à représenter les principaux processus et fonctions du sol en comparaison à la MOS. Étudié dans les mêmes conditions que la MOS, les courbes d'évaluation du carbone actif ont présenté les mêmes tendances que les courbes d'évaluation de la MOS (Figure 10). Les niveaux de carbone actif dans le sol ont été fortement corrélés à la teneur en matière organique du sol (MOS), en particulier dans la zone méridionale, où les valeurs de carbone actif étaient plus faibles. Un écart important sur quasiment toute l'étendue des courbes a également été observé entre les sols issus de matériaux parentaux sableux et ceux provenant d'autres types de matériaux parentaux.

En zone méridionale, les sites issus de matériaux parentaux sableux ont présenté une courbe d'évaluation d'allure similaire à celle des sites issus de matériaux parentaux argileux, loameux et glaciaires (Tills), c'est-à-dire que l'écart entre les principales valeurs seuils (score de 20, 40, 60 et 80 %) est relativement constant. En zone périphérique, le carbone actif a présenté un écart moins important entre les matériaux parentaux pour les classes de teneurs en carbone actif très faibles. L'écart a connu une augmentation au fur et à mesure que les teneurs en carbone actif augmentent. Pour un score de 20 %, l'écart a été de 81,5 mg/kg en fonction des 2 groupes de matériaux parentaux tandis qu'il a été de 112 mg/kg au score de 80 %. Comme pour la MOS, mais à un seuil légèrement inférieur (257 m ; données non présentées dans ce rapport), l'altitude a été le principal facteur qui influence la teneur en carbone actif du sol en zone périphérique lors de l'analyse exploratoire. Les teneurs en carbone actif ont été plus faibles à des altitudes inférieures à 257 m (626 mg/kg contre 738 mg/kg).

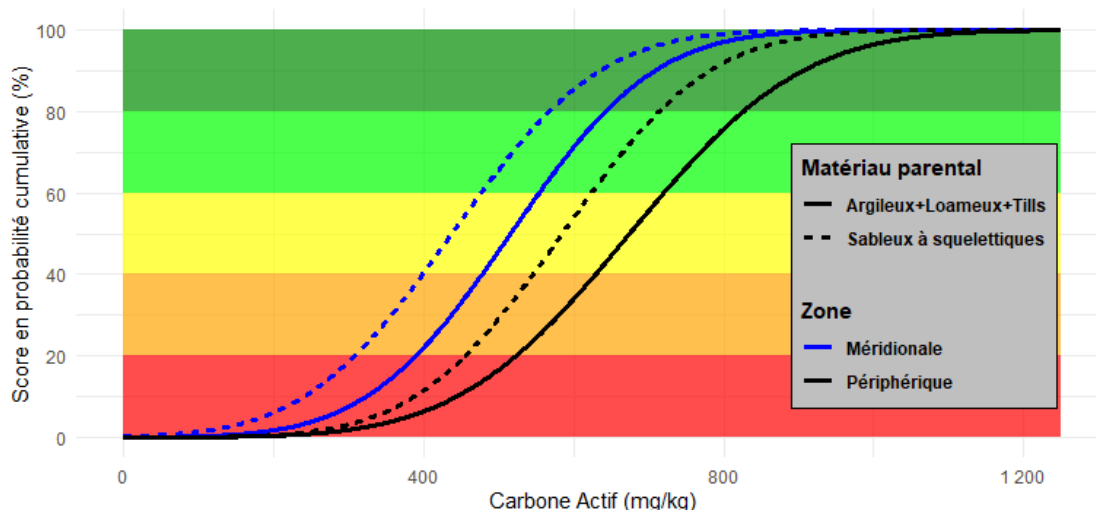


Figure 10. Courbes de notation de la teneur en Carbone actif selon le matériau parental et la zone climatique

Tableau 5. Classes de teneurs en carbone actif du sol selon le matériau parental et la zone climatique.

Matériau parental	Zone	Teneur en carbone actif (mg/kg)				
		Très faible (≤ 20 %)	Faible (20-40 %)	Moyenne (40-60 %)	Élevée (60-80 %)	Très élevée (> 80 %)
Argileux + Loameux + Tills	Périphérique	≤ 523,2	523,2 - 629,2	629,2 - 720,5	720,5 - 826,4	> 826,4
	Méridionale	≤ 389,8	389,8 - 478,1	478,1 - 554,3	554,3 - 642,7	> 642,7
Sableux à squelettiques	Périphérique	≤ 455,4	455,4 - 545,9	545,9 - 623,9	623,9 - 714,4	> 714,4
	Méridionale	≤ 308,3	308,3 - 399,0	399,0 - 477,0	477,0 - 567,7	> 567,7

Le CO₂ dégagé- Horizon Ap

Le CO₂ dégagé ou encore la respiration microbienne est un indicateur de choix qui renseigne sur l'activité métabolique des communautés microbiennes en lien avec la disponibilité des sources de carbone dans le sol. À l'instar de l'azote minéralisable et du carbone actif, la respiration microbienne constitue un indicateur sensible reflétant l'influence combinée de l'activité microbienne, de la dynamique de la MOS et des pratiques de gestion. À partir de l'incubation des sols pour l'évaluation de l'azote minéralisable, la respiration microbienne a été déterminée en captant le CO₂ dégagé du sol dans des tubes d'essai contenant une solution de NaOH 0,2 M et placés dans le bécher pendant 2 intervalles de temps : 1) 0-3 jours et 2) 4-14 Jours. Le CO₂ dégagé entre 0 et 3 jours est fortement corrélé à celui mesuré entre 4 et 14 jours ($CO_{2\ 0-3\ jours} = 0,81 \times CO_{2\ 4-14\ jours}$, $r^2 = 0,98$). Comme il est le plus souvent mesuré et moins coûteux, seule la mesure du CO₂ sur 0-3 jours sera retenue pour constituer l'indicateur. Le CO_{2 0-3 jours} comme indicateur de l'état de santé du sol n'a présenté aucune différence clairement définie selon le matériau parental et les courbes ont donc été présentées seulement en fonction des deux zones (Figure 11). Étant lié à la minéralisation de la MOS, des valeurs nettement plus élevées ont été observées dans la zone méridionale en comparaison à la zone périphérique. Pour chacune des valeurs seuils présentées au Tableau 6, l'écart de CO₂ dégagé entre les zones augmente avec le score. L'écart entre les zones passe approximativement de 80 mg/kg pour un score de 20 % (les sols les plus pauvres) à 140 mg/kg pour un score de 80 %.

Dans la zone périphérique, bien que le climat y soit plus froid, la respiration microbienne révélée en incubation s'est révélée plus intense en raison de niveaux plus élevés de matière organique, plus facilement minéralisable, et d'un historique de pratiques culturales moins intensives. À l'inverse, en zone méridionale, l'intensité accrue des interventions agricoles et les teneurs plus faibles en matière organique semblent limiter l'activité microbienne, en favorisant la formation d'un carbone plus stable, moins accessible pour les microorganismes du sol.

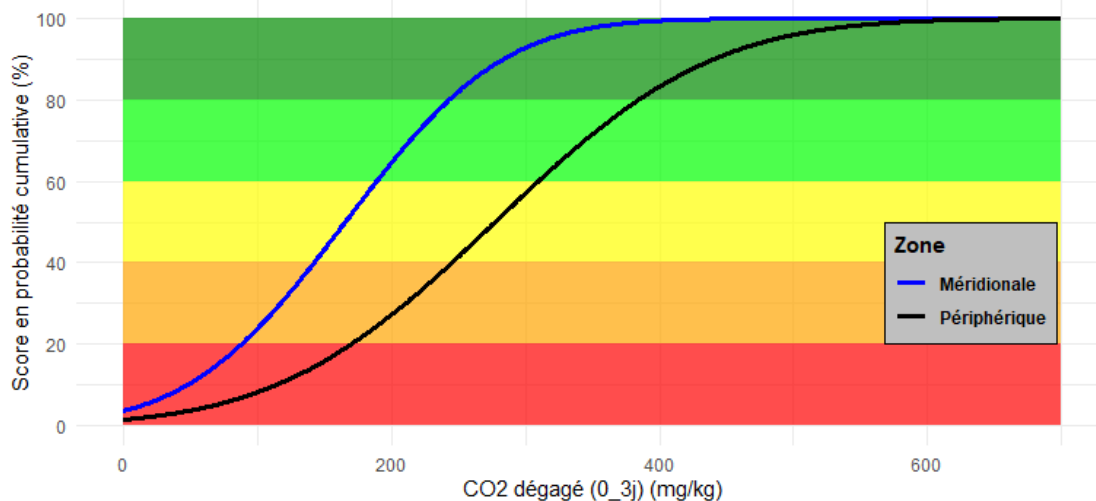


Figure 11. Courbes de notation de la quantité de CO₂ dégagé selon la zone climatique.

Tableau 6. Classes de quantité de CO₂ dégagé 0-3 jours selon la zone climatique pour tout type de matériaux parentaux.

Matériau parental	Zone	Très faible	Faible	Moyenne	Élevée	Très élevée
		(≤ 20 %)	(20-40 %)	(40-60 %)	(60-80 %)	(> 80 %)
		CO ₂ dégagé (mg/kg)				
Tout type	Périphérique	≤ 88,2	88,2 - 142,3	142,3 - 189,0	189,0 - 243,2	> 243,2
	Méridionale	≤ 170,3	170,3 - 245,2	245,2 - 309,7	309,7 - 384,7	> 384,7

INDICATEURS PHYSIQUES ET CHIMIQUES

En termes d'occurrences d'utilisation dans les travaux sur la caractérisation de la santé des sols, les indicateurs de chimie-fertilité sont les indicateurs les plus utilisés et pour lesquels des travaux antérieurs ont présenté des valeurs seuils dans l'objectif de maintenir la productivité des cultures tout en réduisant leur impact sur l'environnement. Les paramètres chimiques et/ou de fertilité des sols englobent l'ensemble des éléments majeurs et oligoéléments susceptibles d'être utilisés dans la nutrition des plantes et de la communauté microbienne du sol. Bien que nombreux sont les paramètres chimiques pouvant renseigner sur la santé des sols, le focal a été mis dans cette étude sur le soufre M-3 pour lequel des problèmes de carence sont de plus en plus constatés et aucune valeur seuil n'a été proposée pour contenir ce problème dans le cadre du contexte québécois.

Les paramètres physiques arrivent, après les indicateurs chimiques et/ou de fertilité des sols. Toutefois, en soutenant les fonctions d'entretien de la structure du sol, de régulation qualitative et quantitative de l'eau et de fourniture de nutriments, les indicateurs physiques sont également associés à la fertilité des sols. Intégrés dans

un ensemble avec les paramètres chimiques, les indicateurs physiques sont également étudiés dans la catégorie des paramètres physico-chimiques qui modulent la santé des sols. Dans les travaux de Bünemann et al. (2018), les paramètres physiques seuls ont été considérés seulement dans la moitié des études considérées tandis l'occurrence est passée à 70 % des études en considérant les paramètres physico-chimiques dans leur globalité.

De l'analyse des données de l'EESSAQ, il ressort que les trois paramètres physiques retenus (MVA, macroporosité et DMP) ont été influencés de manière différente par rapport à l'indicateur chimique considéré, le soufre M-3, en fonction du matériau parental et de l'horizon du sol considéré. Étant fortement liés à la dynamique de la MOS et de l'activité microbienne, le soufre M-3 n'a présenté d'effets significatifs que dans l'horizon Ap à l'instar des indicateurs biologiques. En revanche, à l'exception de la masse volumique apparente pour laquelle des différences ont été observées à la fois dans l'horizon Ap et l'horizon B, tous les autres indicateurs physiques étudiés n'ont présenté d'effets en fonction du matériau parental que dans l'horizon B.

La masse volumique apparente (MVA)

La MVA est l'un des principaux indicateurs physiques utilisés pour évaluer la santé des sols (Bünemann et al., 2018; Valani et al., 2021). Elle permet d'apprécier le niveau de compaction du sol, un facteur déterminant pour la création d'un environnement propice à la productivité agricole (Lima et al., 2007; Vitória et al., 2012). La compaction influence négativement les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. Une étude menée dans le sud des États-Unis a révélé une forte corrélation négative entre la MVA, la matière organique du sol (MOS) et la capacité maximale de rétention d'eau (Xu et al., 2022). Les analyses de l'EESSAQ confirment cette relation dans l'horizon Ap, où la distribution de la MVA est principalement déterminée par la teneur en MOS ($r = -0,76$). À l'inverse, dans l'horizon B, les variations de MVA sont davantage liées au matériau parental. Il avait été noté dans le rapport 2 de l'ÉESSAQ que les systèmes de culture incluant des plantes/cultures pérennes, des cultures annuelles ou des cultures maraichères dans la rotation avaient un effet notable sur la MVA dans les horizons Ap1 et Ap2, mais un peu moins prononcé dans l'horizon B (Gasser, Clément et al., 2023). Toutefois, pour les raisons mentionnées précédemment, ces systèmes de culture n'ont pas été inclus comme facteur discriminant.

Horizon Ap

Dans l'horizon Ap, le matériau parental n'a pas montré d'effet significatif sur la masse volumique apparente (MVA), contrairement à ce qui est observé dans l'horizon B. Toutefois, une différence marquée a été relevée entre les zones climatiques. En moyenne, les sols de la zone méridionale présentent une MVA environ 15 % plus élevée que ceux de la zone périphérique. Cette disparité est étroitement liée aux niveaux de matière organique du sol (MOS), qui sont en moyenne 37 % plus élevés en zone périphérique. Ce gradient reflète l'influence combinée du climat plus frais, d'une plus forte présence des cultures pérennes dans les rotations et des pratiques culturales moins intensives dans les zones périphériques, favorisant une accumulation de MOS et une structure de sol plus aérée. À l'inverse, les conditions plus chaudes et les systèmes de culture intensifs de la zone méridionale contribuent à une minéralisation accrue de la MOS, entraînant une compaction plus importante et une MVA plus élevée.

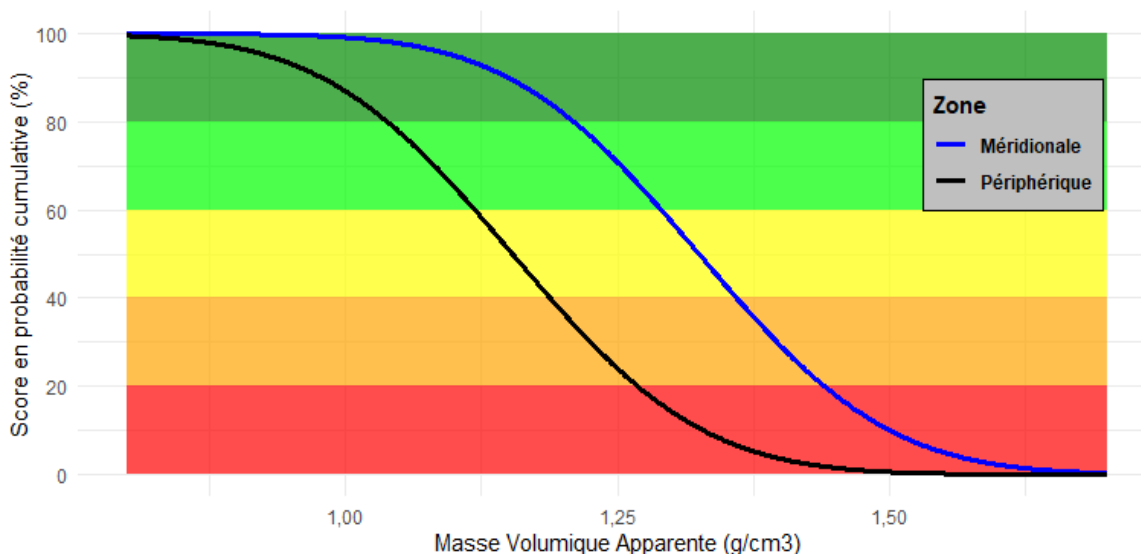


Figure 12. Courbes de notation de la masse volumique apparente selon la zone climatique dans l’horizon Ap

Le Tableau 7, construit selon l’approche « Moins c’est mieux », met en évidence une différence marquée entre les zones climatiques en ce qui concerne la distribution de la MVA. Cet indicateur présente les seuils les plus contrastés parmi ceux analysés jusqu’ici. En zone périphérique, seulement 20 % des sites affichent une MVA supérieure ou égale à 1,27 g/cm³, tandis qu’en zone méridionale, au moins 80 % des sites atteignent ou dépassent une MVA de 1,21 g/cm³. Cette asymétrie traduit une compaction plus importante des sols en surface dans les régions plus chaudes et intensivement cultivées. D’ailleurs, les valeurs moyennes (1,29 - 1,36 g/cm³) de MVA en zone méridionale du Québec semblent quelque peu plus élevées que les valeurs moyennes mesurées à l’échelle Européenne dans les céréales (1,29 g/cm³), les cultures industrielles (1,27 g/cm³), et les cultures - racines (1,32 g/cm³) (Panagos et al., 2024).

Ces résultats soulignent qu’indépendamment du type de sol ou du contexte de production, une même valeur absolue de MVA peut avoir des implications différentes selon le potentiel du site. Par exemple, une MVA de 1,24 g/cm³ pourrait être jugée acceptable dans un contexte général, mais dans une zone périphérique où les systèmes de culture sont en général moins intensifs et les teneurs en matière organique (MOS) plus élevées, elle pourrait indiquer une sous-performance structurelle liée à des pratiques qui favorisent la compaction.

Tableau 7. Classes de MVA selon la zone pour tout type de matériaux parentaux – Horizon Ap

Matériau parental	Zone	Très faible (≤ 20 %)	Faible (20-40 %)	Moyenne (40-60 %)	Élevée (60-80 %)	Très élevée (> 80 %)
Tout type	Périphérique	≥ 1,27	1,27 - 1,19	1,19 - 1,12	1,12 - 1,04	< 1,04
	Méridionale	≥ 1,44	1,44 - 1,36	1,36 - 1,29	1,29 - 1,21	< 1,21

Horizon B

La MVA varie en fonction de plusieurs facteurs, notamment la profondeur du sol, le type de sol et les pratiques culturales. Dans les horizons profonds, moins perturbés par l'activité biologique et les activités agricoles et soumis au surpoids des couches supérieures, la MVA tend à être plus élevée que dans les horizons de surface. L'analyse des données de l'ÉSSAQ ont révélé que la MVA mesurée dans l'horizon B est en moyenne 20 % plus élevée que celle observée dans l'horizon Ap. Cette augmentation en profondeur de la MVA est particulièrement marquée dans les sols issus de matériaux parentaux sableux, loameux et glaciaires. Contrairement à l'horizon Ap, le facteur climatique n'a pas montré d'effet significatif sur la MVA dans l'horizon B. Toute zone confondue, des valeurs moins importantes de MVA ont été observées dans les sols argileux avec 80 % des observations inférieures à 1,53g/cm³. Cependant, plus de la moitié des observations (55 %) ont été caractérisées par une MVA supérieure ou égale à 1,39 g/ cm³, seuil à partir duquel la croissance racinaire se trouve limitée dans l'horizon de surface des sols argileux (NRCS, 2019). Pour les autres types de sols, en considérant un seuil moyen de 1,6-1,7 g/ cm³, des problèmes potentiels de limitation de la croissance racinaire pourraient affecter seulement 34 % des observations.

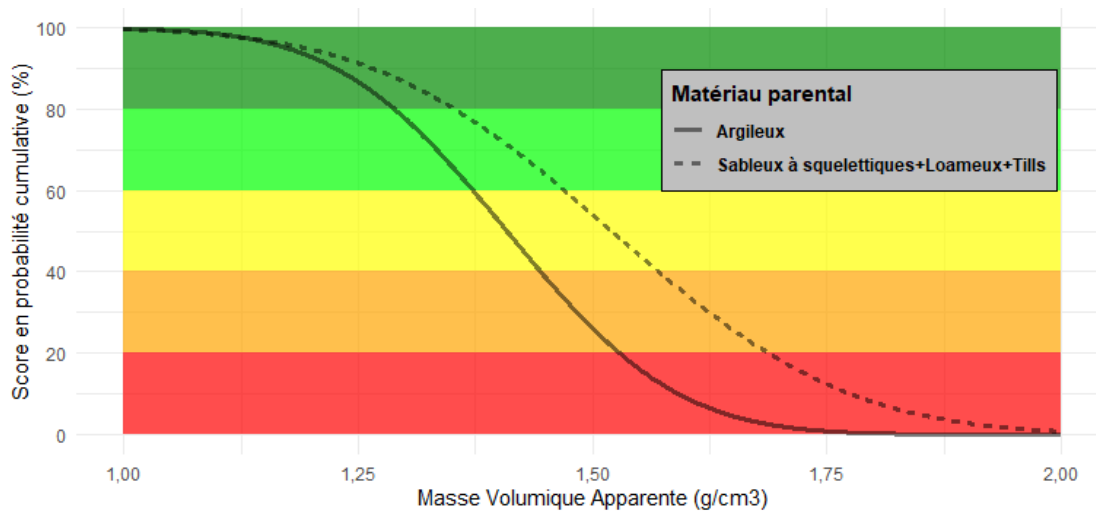


Figure 13. Courbes de notation de la masse volumique apparente selon le matériau parental- Horizon B.

Dans le Tableau 8, la classe de score faible de MVA est définie à partir d'un seuil de 1,45 g/cm³ dans les sols issus de matériaux parentaux argileux et de 1,57 g/cm³ dans les autres sols sableux, loameux et tills. Tenant compte des seuils proposés par le NRCS en 2019 pour les horizons de surface et la différence de MVA entre les sols, les sols argileux pourraient présenter des conditions qui restreignent la croissance racinaire dans l'horizon B à partir de la classe de score faible (40 % des observations) de MVA (1,47 g/cm³, seuil NRCS 2019). Alors que dans les autres types de sols, la croissance racinaire ne se trouve restreinte qu'à des valeurs supérieures à 1,69 g/cm³ correspondant à la classe de score très faible (20 % des observations) de MVA, selon les seuils définis par le NRCS (2019).

Tableau 8. Classes de MVA en fonction du matériau parental – Horizon B.

Matériau parental	Très faible (≤ 20 %)	Faible (20-40 %)	Moyenne (40-60 %)	Élevée (60-80 %)	Très élevée (≥ 80 %)
MVA (g/cm ³)					
Argileux	≥ 1,53	1,53 - 1,45	1,45 - 1,37	1,37 - 1,29	< 1,29
Sableux à squelettiques + Loameux + Tills	≥ 1,69	1,69 - 1,57	1,57 - 1,47	1,47 - 1,35	< 1,35

La macroporosité- Horizon B

La macroporosité est un indicateur important qui renseigne sur la capacité du sol à favoriser la circulation de l'air et l'eau dans les macropores (Koop et al., 2022). Une valeur de macroporosité minimale par type de sol et de pratiques culturales est recommandée pour réduire les risques d'anoxie et d'asphyxie dans l'horizon B. En effet, dans les sols à des teneurs élevées en argile, une corrélation positive étroite a été observée entre la connectivité des macropores et la perméabilité à l'air (Ruan et al., 2021). Dans le cadre de l'ÉÉSSAQ, elle a été déterminée par la différence entre la teneur en eau à saturation et la teneur en eau à 10 kPa de pression matricielle. Dans l'horizon B, la macroporosité a surtout été affectée par le matériau parental, les systèmes de culture et l'intensité du risque de compaction (Gasser, Clément, et al., 2023). Dans la présente analyse, la zone climatique n'a pas eu d'effet significatif sur la variabilité observée. À l'instar de l'azote minéralisable, la fonction de distribution gamma a été utilisée pour la modélisation de la macroporosité en fonction du matériau parental en intégrant l'altitude des points d'échantillonnage comme facteur fixe pour assurer la normalité des résidus. N'ayant aucune différence entre les loams et les tills, ces derniers ont été groupés et trois courbes ont été retenues pour dériver les seuils de références de la macroporosité.

Les sols argileux exhibent les plus faibles valeurs de macroporosité dans l'horizon B, avec plus de 95 % des sites caractérisés par une macroporosité de moins de 10 % (0,1 cm³/cm³, v/v). D'ailleurs, selon le Tableau 9, la classe moyenne de macroporosité dans les sols argileux est définie à partir d'un seuil de 0,05 cm³/cm³, soit la moitié du seuil critique. Ce nombre important d'observations avec une macroporosité inférieure à 0,1 cm³/cm³ a été mesuré dans les 15 premiers cm de l'horizon B et témoignerait de l'état général des sols argileux et de leur sensibilité à la compaction, surtout près de la surface du sol, mais sous l'horizon Ap plus fréquemment travaillé. Les sols argileux seraient aussi plus sensibles que les autres sols à former une semelle de labour à cette profondeur.

L'argile est généralement reconnue pour favoriser une meilleure structuration du sol par la formation de complexes organiques-minéraux lors de la dégradation de la matière organique et l'activité microbienne dans le sol. Les sols argileux sans structure et très compacts présentent en revanche de très faibles macroporosité et perméabilité d'air, mais une capacité de rétention en eau élevée (Naveed et al., 2013). Un niveau de macroporosité d'un peu moins de 0,1 cm³/cm³ n'induirait pas automatiquement des problèmes d'aération et de circulation de l'eau. Étant liée à la fois à la porosité totale et la teneur en eau, la porosité d'air dont le seuil limite pour la respiration racinaire est de 0,1 cm³/cm³ (Grable & Siemer, 1968; Shestak & Busse, 2005) pourrait être compensée par l'augmentation de la microporosité selon les conditions d'humidité, de type de sol et de niveau

de tassement. Traitant de la relation entre la macroporosité et la continuité des pores, des valeurs allant de 0,08 à 0,1 cm^3/cm^3 permettraient de bonne condition d'aération du sol en fonction des conditions de travail du sol (Carter, 1988).

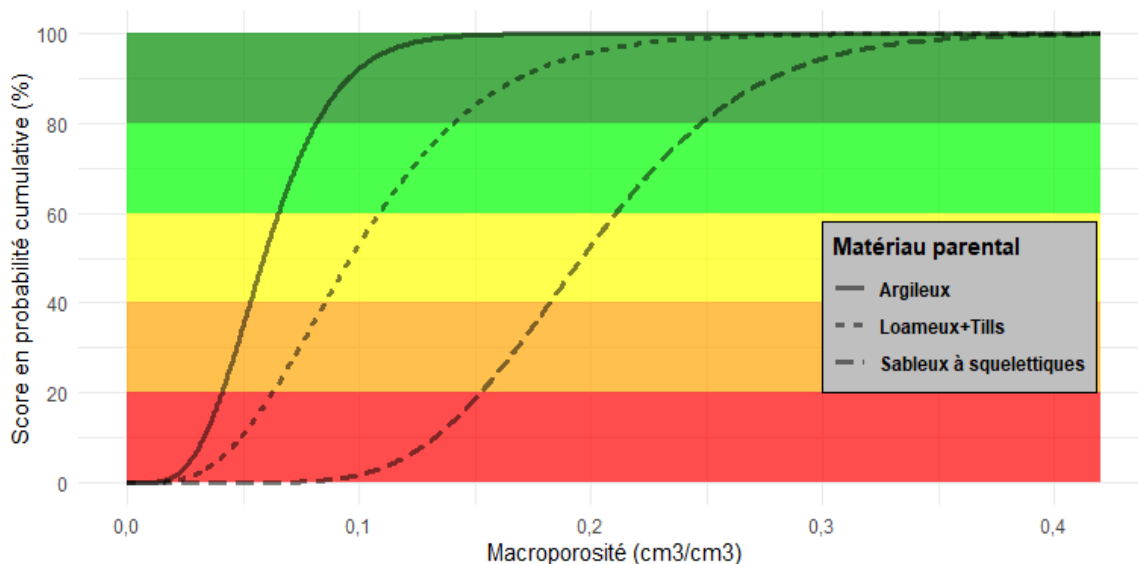


Figure 14. Courbes de notation de la macroporosité selon le matériau parental- Horizon B

Les sols issus de matériaux parentaux de type loam et tills ont présenté des valeurs de macroporosité intermédiaires et la répartition des points a été proche de la moyenne avec un large éventail de sols variant des textures plus fines telles que les loams, les loams-argileux aux sols issus de matériaux parentaux glaciaires. Environ 50 % des observations ont été caractérisées par une macroporosité d'au moins 0,1 cm^3/cm^3 et 20 % des données ont une macroporosité inférieure ou égale à 0,06 cm^3/cm^3 . Comparativement aux sols issus de matériaux sableux où quasiment la moitié des observations ont une macroporosité minimale de 20 %, le groupe constitué par les sols loameux et les tills ont présenté une distribution de pores avec des seuils plus proches des sols à texture.

Tableau 9. Classes de macroporosité selon le matériau parental – Horizon B

Matériau parental	Très faible ($\leq 20\%$)	Faible (20-40 %)	Moyenne (40-60 %)	Élevée (60-80 %)	Très élevée ($> 80\%$)
Argileux	$\leq 0,04$	0,04 - 0,05	0,05 - 0,07	0,07 - 0,08	$> 0,08$
Loameux + Tills	$\leq 0,06$	0,06 - 0,09	0,09 - 0,11	0,11 - 0,14	$> 0,14$
Sableux à squelettique	$\leq 0,15$	0,15 - 0,18	0,18 - 0,21	0,21 - 0,25	$> 0,25$

Le diamètre moyen pondéré (DMP) des agrégats- Horizon Ap1

En physique du sol, le diamètre moyen pondéré (DMP) des agrégats stables est un indicateur de la grosseur des agrégats du sol et de leur stabilité structurale. Les différentes grosseurs d'agrégats de l'horizon Ap1 ont été évaluées suivant la méthode multi-tamis avec barattage dans l'eau (Angers et al., 2007) puis, ces fractions ont été utilisées comme facteur de pondération pour calculer le diamètre moyen en fonction de la grosseur des différents tamis utilisés (Gasser, Bossé et al., 2023). Cette analyse est relativement laborieuse et moins couramment utilisée par les laboratoires privés, mais permet tout de même de comparer les effets des pratiques culturales sur la structure du sol lorsque les mêmes sols sont comparés.

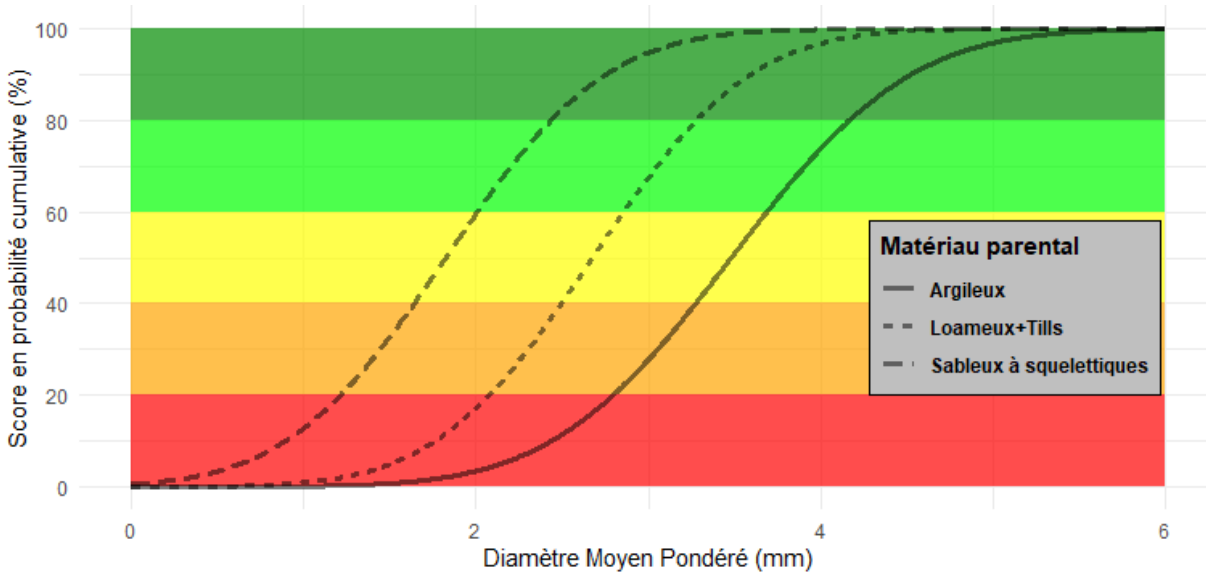


Figure 15. Courbes de notation du Diamètre Moyen Pondéré (DMP) selon le matériau parental – Horizon Ap1

L'analyse des données de DMP de l'ÉÉSSAQ n'ont pas montré de différence significative entre les deux zones climatiques, malgré les niveaux de MOS en moyenne plus élevés en zone périphérique. Toutefois, les sols issus de matériaux parentaux de type sableux ont été caractérisés par un plus faible DMP par rapport aux autres types de sols. La matière organique étant le principal facteur d'agrégation des particules de sols (Chaney & Swift, 1984), la plus forte teneur en matière organique couplée à une surface de contact plus grande des sols à particules fines pourrait expliquer ce contraste. En fonction des seuils calculés pour les sols sableux, les sites classés parmi les plus faibles ont été caractérisés par un diamètre moyen pondéré inférieur ou égal à 1,2 mm. Bien que faible par rapport aux autres seuils calculés pour les autres types de sols, un DMP variant entre 0,8 et 1,3 est considéré de stabilité moyenne (Le Bissonnais, 1996). Ainsi, selon cette étude, seulement 8 % des sols sableux ont été d'un faible niveau de stabilité (< 0,8 mm).

Tableau 10. Classes de Diamètre Moyen Pondéré (DMP) selon le matériau parental – Horizon Ap1.

Matériau parental	Très faible (≤ 20 %)	Faible (20-40 %)	Moyenne (40-60 %)	Élevée (60-80 %)	Très élevée (≥ 80 %)
DMP (mm)					
Argileux	≤ 2,8	2,8 - 3,3	3,3 - 3,7	3,7 - 4,2	≥ 4,2
Loameux + Tills	≤ 2,1	2,1 - 2,5	2,5 - 2,9	2,9 - 3,3	≥ 3,3
Sableux à squelettiques	≤ 1,2	1,2 - 1,6	1,6 - 2,0	2,0 - 2,4	≥ 2,4

La conductivité hydraulique- Horizon B

La conductivité hydraulique saturée constitue un indicateur majeur de la santé physique des sols, car elle mesure la capacité d'un sol saturé à transmettre l'eau à travers sa structure poreuse. En plus de la taille des pores, une caractérisation fonctionnelle basée sur les caractéristiques de transport et la conductivité hydraulique est nécessaire pour une meilleure appréciation du phénomène d'écoulement dans les macropores (Jarvis, 2007). Diverses méthodes in situ ou en laboratoire permettent de déterminer la conductivité hydraulique du sol. Les données de conductivité hydraulique saturée de l'ÉÉSSAQ ont été estimées au champ avec un perméamètre de Guelph, à 15 cm et 40 cm de profondeur dans le sol (Reynolds, 2007). Disposé à moins de 3 m du profil de sol de chaque point d'échantillonnage, la conductivité a été mesurée avec une hauteur de colonne d'eau de 5 cm et les trois derniers débits obtenus à régime constant ont été enregistrés (Gasser, Bossé et al., 2023).

L'analyse de la courbe de notation de la conductivité hydraulique en condition de saturation a montré une différence significative entre les sols issus de matériaux parentaux argileux et loameux par rapport à ceux issus de matériaux parentaux de type tills ainsi que ceux issus de matériaux parentaux sableux. Des valeurs de conductivité hydraulique nettement plus faibles ont été observées dans les matériaux Argileux+Loameux et le 20 % de sites ayant une valeur de conductivité très faible ont été caractérisés par des valeurs inférieures à 10^{-7} m/j. En raison de l'asymétrie des données, une forte densité de valeur de conductivité hydraulique saturée proche de 0 ainsi qu'une grande variabilité des données, l'allure de la courbe pour les sols argileux et loameux est très progressive et étalée. Cependant, une allure plus abrupte, traduisant une plus faible variabilité, a été observée pour les sites sableux et les tills comme on peut le voir sur la Figure 16. Toutefois, les seuils calculés ont été d'un facteur d'au moins 10 fois plus grands dans les sols sableux en comparaison aux tills. Dans le Tableau 11, la classe de score moyenne de la conductivité hydraulique saturée correspond à des valeurs mesurées de l'ordre de 1,9 à 3,2 m/j dans les sols sableux tandis qu'elle est de l'ordre de 0,1 à 0,3 m/j pour les tills. Pour les sols argileux et loameux, la conductivité hydraulique dans la classe moyenne est de l'ordre de 10^{-4} m/j et seulement 20 % des observations ont une conductivité hydraulique saturée plus grande que 8 cm par jour.

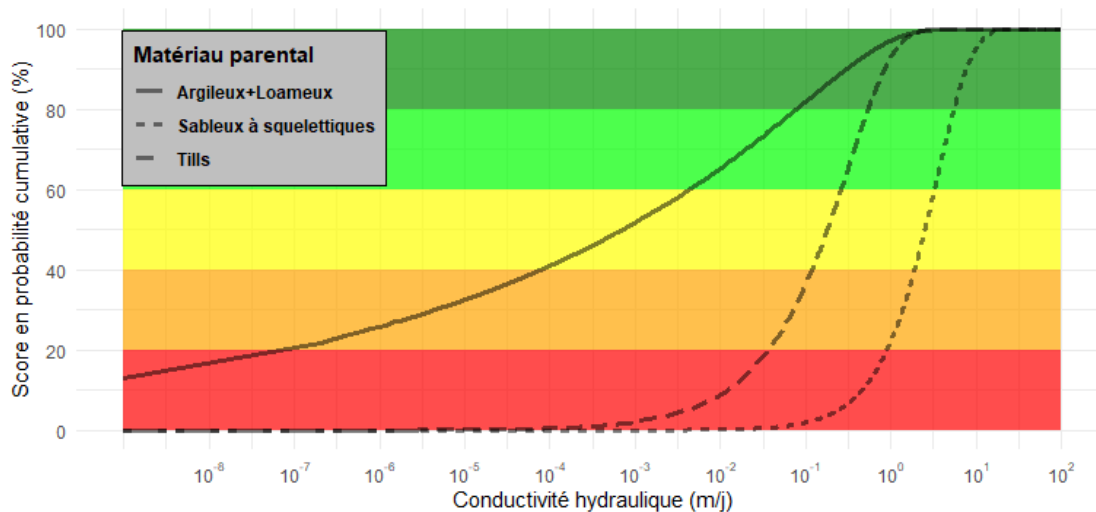


Figure 16. Courbes de notation de la conductivité hydraulique saturée selon le matériau parental-Horizon B.

Tableau 11. Classes de conductivité hydraulique saturée selon le matériau parental – Horizon B.

Matériau parental	Très faible (≤ 20 %)	Faible (20-40 %)	Moyenne (40-60 %)	Élevée (60-80 %)	Très élevée (> 80 %)
Argileux + Loameux	≤ 10 ⁻⁷	10 ⁻⁷ – 10 ⁻⁵	10 ⁻⁵ – 10 ⁻³	10 ⁻³ – 8x10 ⁻²	> 8x10 ⁻²
Sableux à squelettiques	≤ 0,9	0,9 – 1,9	1,9 – 3,2	3,2 – 5,5	> 5,5
Tills	≤ 3,7x10 ⁻²	3,7x10 ⁻² – 0,1	0,1 – 0,3	0,3 – 0,5	> 0,5

Le soufre M-3- Horizon Ap

Le soufre est un élément essentiel pour la nutrition des plantes et des animaux. Chez les plantes, le soufre joue un rôle important dans la synthèse d'acides aminés et dans la protection contre les ravageurs et d'autres stress environnementaux (Aspel et al., 2022; Hoefgen & Hesse, 2007). Avant ces vingt dernières années, la nutrition en soufre des plantes a toujours été reléguée en second plan en raison des besoins plus faibles en soufre par rapport aux principaux éléments nutritifs (1/10 des besoins en N ; Hoefgen & Hesse, 2007) et des niveaux de soufre assez élevés dans les sols dus principalement aux pluies acides et aux apports plus fréquents en engrais de ferme. En 1970, l'enjeu de la pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance a poussé les États-Unis et le Canada à agir dans le sens de la réduction des dépôts de polluants acidifiants. En 2020, on a mesuré au Canada une réduction de 78 % des émissions totales de SO₂ par rapport au niveau d'émissions de 1990

(Environnement Canada, 2023). La réduction des dépôts atmosphériques de soufre qui ont en résulté, ont provoqué des carences en soufre de plus en plus fréquente dans les sols agricoles (Scherer, 2009; Vermeiren et al., 2018). Pour pallier ce problème, l'apport en soufre élémentaire au sol est de plus en plus recommandé. Pour limiter le risque d'acidité lié à l'utilisation des engrais soufrés et favoriser une compréhension plus exacte de la dynamique du soufre dans le sol, plusieurs études ont été menées au cours des deux dernières décennies (Kowalenko et al., 2014; Zbiral et al., 2018). Même s'il reste encore difficile d'extraire et de quantifier le soufre élémentaire, son oxydation en sulfate est mesurée pour évaluer l'état de concentration de soufre du sol. En dépit de la dépendance de cette méthode aux conditions climatiques et de lessivage, ces méthodes permettent une bonne estimation du statut en soufre du sol. Dans le cadre de l'ÉSSAQ, la solution extractive Mehlich-3 a été utilisée en raison de sa capacité à évaluer les changements à long terme et des sols susceptibles de présenter des problèmes de carences en soufre (Zbiral et al., 2018). Le sulfate biodisponible pour la nutrition des plantes tient à la fois compte de ions sulfates en solution dans le sol et ceux absorbés par les particules de sols. Une forte dépendance a été observée entre cette fraction absorbée et le pH du sol avec un maximum d'adsorption à pH 3 (Scherer, 2009). Ce phénomène d'absorption est relativement négligeable à pH supérieur ou égal à 6,5 (Scherer, 2009). Dans l'analyse des données de cette présente étude, il a été confirmé que le pH a été le principal facteur qui influence la distribution de la teneur en S M-3. Un seuil de pH de 5,5 a été déterminé en dessous duquel on observe majoritairement des valeurs élevées de S M-3 (40 % des observations > 20 mg/kg) ne présentant aucune différence en fonction du matériau parental. En faisant abstraction du pH et en combinant l'ensemble des données pour l'analyse de la distribution des teneurs en S M-3, de sévères problèmes de normalité des résidus ont été obtenus en raison de multiples valeurs extrêmes associées aux sols les plus acides. Puisqu'à de tels niveaux d'acidité, l'absorption des nutriments par les plantes se trouve considérablement affectée, les 10 % de sites avec un pH < 5,5 n'ont pas été considérés dans la suite de l'analyse et une distribution de type gamma a été utilisée pour la gestion de l'asymétrie des données.

À des niveaux de pH $\geq 5,5$, le type de matériau parental a été le seul facteur qui conditionne la distribution de la teneur en S M-3 dans les sols analysés. Les teneurs en S M-3 étaient les plus élevées dans les sols à texture plus grossière issus des matériaux parentaux sableux ou de tills. Le seuil définissant les concentrations très faibles (premier 20 % des observations) était de 8,6 mg/kg dans les sols issus de matériaux parentaux sableux et tills, tandis qu'il était deux fois plus faible dans les sols loameux (4,8 mg/kg) et quatre fois plus faible dans les sols argileux. Les teneurs moyennes en S démarrent (40 % des observations) à des seuils respectifs de 10,9 mg/kg, 7,1 mg/kg et 3,4 mg/kg, pour les sols sableux + tills, les sols loameux et les sols argileux.

Certains sols argileux comme ceux de la série De l'Anse peuvent en revanche présenter des valeurs très élevées de S-M3 et ces valeurs n'ont pas été conservées dans la distribution.

Le soufre ne semble pas suivre la même logique que l'azote minéralisable dont le potentiel de minéralisation est plus important dans les sols argileux. La plus faible capacité de minéralisation de la matière organique et des formes organiques de N et de S dans les sols sableux et les tills ne vont pas dans le même sens que les teneurs plus élevées en S M-3 mesurées dans ces sols. Une analyse plus approfondie sera nécessaire pour en comprendre l'origine.

En hypothèse, les sols sableux et les tills cultivés ont aussi en moyenne des teneurs plus élevées en P-M3 que les sols argileux et les sols loameux, même si les sols sableux, surtout lorsque podzolisés, sont généralement très peu pourvus en P à leur état naturel (Gasser, Bossé et al., 2023). Ces teneurs plus élevées en P pourraient résulter

d'apports plus élevés et répétés de P en provenance d'engrais de ferme notamment, en raison des seuils ou niveaux critiques de saturation en P plus élevés dans ces sols, liées à leur capacité de fixation du P plus élevée, ainsi qu'à la présence de sesquioxides de fer et d'aluminium. Les teneurs plus élevées en S-M3 dans les sols sableux et les tills proviendraient des apports plus importants d'engrais de ferme qui apportent aussi de grandes quantités de soufre dans ces sols.

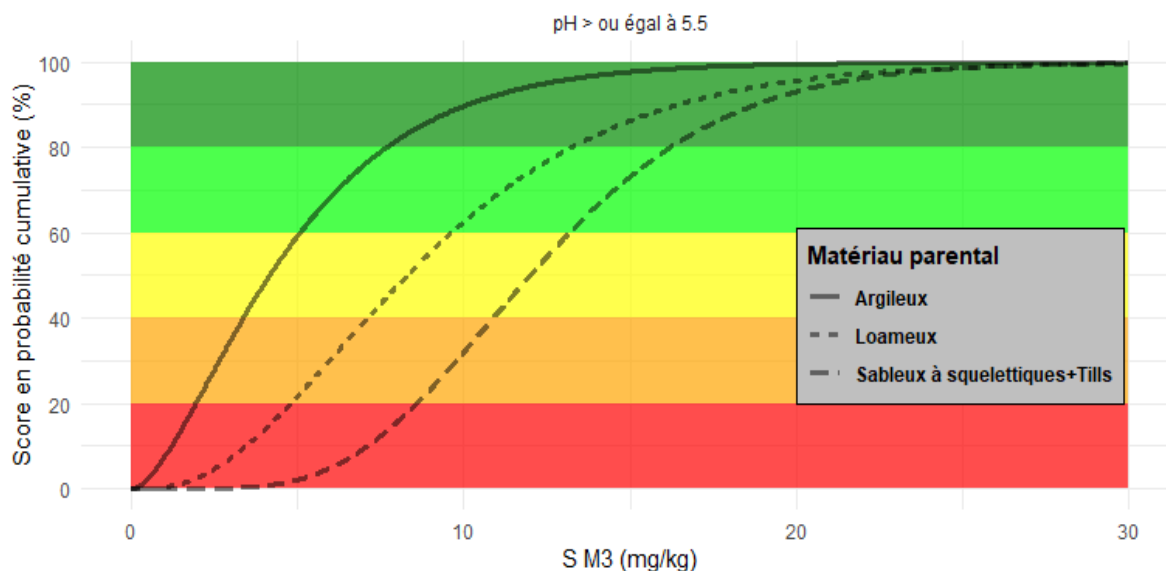


Figure 17. Courbes de notation de la teneur en soufre M-3 selon le matériau parental- Horizon Ap.

Tableau 12. Classes de soufre M-3 selon le matériau parental – Horizon Ap.

Matériau parental	Très faible (≤ 20 %)	Faible (20-40 %)	Moyenne (40-60 %)	Élevée (60-80 %)	Très élevée (≥ 80 %)
Argileux	≤ 2,0	2,0 - 3,4	3,4 - 5,1	5,1 - 7,7	≥ 7,7
Loameux	≤ 4,8	4,8 - 7,1	7,1 - 9,6	9,6 - 13,2	≥ 13,2
Sableux à squelettiques + Tills	≤ 8,6	8,6 - 10,9	10,9 - 13,2	13,2 - 16,2	≥ 16,2

Le potassium M-3- Horizon Ap

Le potassium constitue un élément majeur essentiel à la nutrition des plantes. Il participe à la croissance de la plante et joue un rôle important dans le processus d'assimilation du CO₂ ainsi que dans la résistance des plantes face aux maladies et à la sécheresse. Par sa capacité à favoriser le transport des carbohydrates et des protéines

vers les racines, le potassium contribue à la constitution des réserves avant la dormance des plantes et permet, du même coup, une meilleure survie à l'hiver des plantes. Dans les travaux de l'IRDA aboutissant à la grille de fertilisation potassique des plantes fourragères du MAPAQ, les résultats ont montré que la fertilisation en K n'a pas eu d'effets significatifs sur la survie. Toutefois, une corrélation a été observée entre le niveau de richesse du sol en K et la survie hivernale. Lorsque le sol comporte au-delà de 99 mg/kg de K M-3, la survie à l'hiver de la luzerne atteint 98 % en moyenne (Landry et al., 2023). Bien que des recommandations en K soient disponibles pour assurer la nutrition des principales cultures, il nous est apparu important de présenter, dans le cadre de l'ÉSSAQ, le portrait de la distribution des teneurs en potassium M-3 des sols agricoles de la province, afin de permettre aux utilisateurs de situer le niveau de richesse de leur sol par rapport aux valeurs généralement observées sur le terrain, pour le même type de sol. Ici le potassium suit un comportement très différent de celui du S-M3, et même du P-M3 rapporté dans Gasser, Bossé et al. (2023), lié à nature même des argiles qui jouent un rôle dans les échanges et l'approvisionnement en K extractible en Mehlich-3.

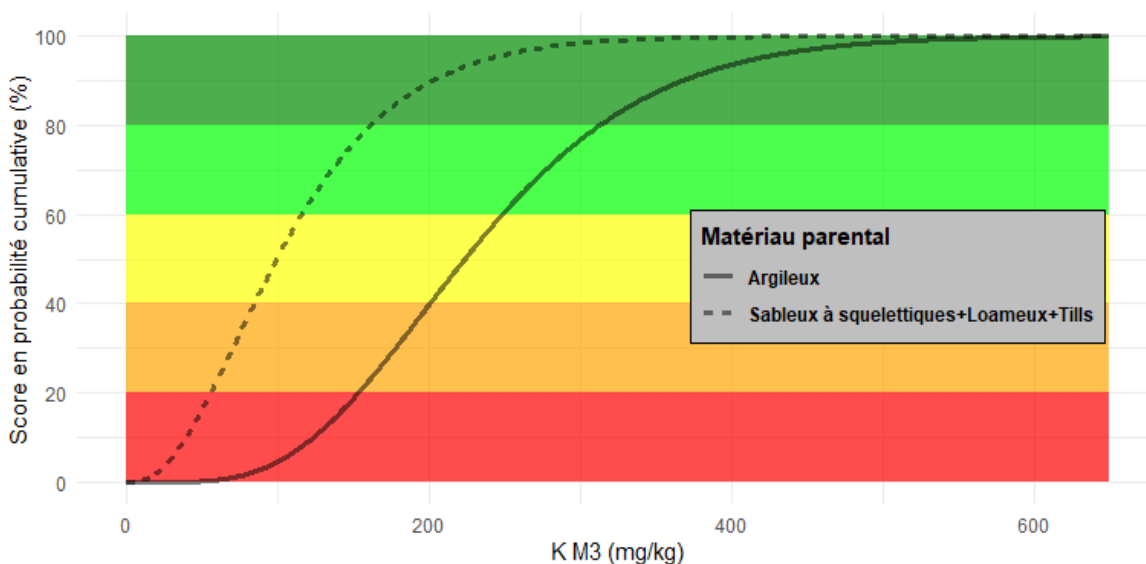


Figure 18. Courbes de notation de la teneur en K M-3 selon le matériau parental- Horizon Ap.

D'une manière générale, la teneur en K M-3 est fortement corrélée à la texture du sol. Plus le sol est argileux, plus les réserves en potassium sont élevées. L'analyse des données de l'ÉSSAQ a démontré qu'il y a une différence significative des teneurs en K dans les sites issus de matériaux parentaux argileux par rapport aux autres types de matériaux parentaux sableux, loameux et tills et que leurs teneurs en K-M3 sont à peu près deux fois plus élevées (Figure 18). La population de sols en texture plus grossière ayant des teneurs très élevées en K-M3 (le dernier 80% des observations) ont des teneurs en K M-3 supérieures ou égales à 161,7 ppm, alors que les sols plus lourds ayant de très faibles teneurs) le premier 20% de la population) ont des teneurs en K M-3 atteignant jusqu'à 153,4 ppm.

Tableau 13. Classes de K M-3 selon le matériau parental – Horizon Ap.

Matériau parental	Très faible (≤ 20 %)	Faible (20-40 %)	Moyenne (40-60 %)	Élevée (60-80 %)	Très élevée (> 80 %)
K M-3 (mg/kg)					
Sableux à squelettiques + Loameux + Tills	≤ 55,7	55,7 - 84,4	84,4 - 116,1	116,1 - 161,7	> 161,7
Argileux	≤ 153,4	153,4 - 200,7	200,7 - 248,7	248,7 - 313,3	> 313,3

CADRE D'APPLICATION DES INDICATEURS ET D'INTERPRÉTATION DES SEUILS DE RÉFÉRENCES

La mesure des indicateurs

L'application des seuils de références dérivés pour les indicateurs de cette étude dépendra de la capacité de l'utilisateur à mesurer les propriétés de sols et les indicateurs ciblés. Les indicateurs dérivés des analyses de sols plus couramment réalisées par les producteurs agricoles comme les teneurs en matière organique et K-M3, ou plus spécifiques comme la teneur en C actif et ou S-M3 seront plus facilement obtenus d'un laboratoire privé et utilisables. Des mesures de masse volumique apparente ou de conductivité hydraulique réalisée par des techniciens ou conseillers sur le terrain sont aussi envisageables, mais demande un effort additionnel. Les mesures de N minéralisable, CO₂ dégagé, DMP des agrégats ou macroporosité seront toutefois dépendante des protocoles d'analyses et des spécificités adoptées par les différents laboratoires. Dans tous les cas, il sera pertinent de se référer au Rapport 1 de l'ÉÉSSAQ (Gasser, Bossé et al., 2023) qui résume les protocoles d'échantillonnage au champ et d'analyses au laboratoire pour s'assurer d'une certaine similarité ou conformité entre les mesures prises par l'utilisateur et celles par les équipes de l'IRDA dans le cadre de l'ÉÉSSAQ. Si les méthodes d'analyses différaient entre celles de l'utilisateur et celles de l'IRDA, il est probable que les seuils de références pour l'indicateur choisi ne soient pas adéquats.

La zone climatique

Selon les indicateurs utilisés, il faudra situer les sols, les champs ou l'entreprise par rapport aux zones climatiques méridionales ou périphériques définies par un seuil de température de 5°C et dont les pourtours sont précisés sur des cartes régionales à l'Annexe C. En cas de doute, l'utilisation de l'une ou l'autre des zones permettra à l'utilisateur de se donner une marge d'erreur autour de la classe retenue. Par exemple, un sol argileux avec une teneur de 4 % de MOS se situerait entre la classe très faible en zone périphérique et la classe moyenne en zone méridionale. L'utilisateur devra choisir dans quelle zone climatique il se situe en considérant aussi le type de système agricole dans lequel les indicateurs sont évalués. Si le sol est en marge de la zone climatique méridionale et que le système de culture est plus extensif, par exemple en production laitière avec d'importantes prairies dans la rotation, l'utilisateur devrait opter pour la zone périphérique dans lequel ce système est plus fréquent.

Le matériau parental

Dans le cadre de l'ÉÉSSAQ, les sols minéraux ont été regroupés en cinq classes de matériaux parentaux en considérant la granulométrie du matériau principalement et l'origine du dépôt meuble en second lieu donnant les sols issus de matériaux argileux, loameux, sableux à squelettiques, ainsi que les tills et les sols organiques. La granulométrie du matériau fait référence à celle de l'horizon B sous l'horizon cultivé qui influence plusieurs des propriétés du sol, comme son drainage naturel, sa réaction acide, sa capacité d'échange cationique, son état de compaction, entre autres. Les sols sableux à squelettiques incluent les sols squelettiques de granulométrie loameuse à sableuse qui contiennent plus de 35 % en volume de gravier ou de pierre > 2 mm. Pour faciliter la reconnaissance du matériau parental d'un sol en particulier, le lecteur est invité à consulter les informations contenues pour chaque groupe de série de sols (25 groupes à l'intérieur des 4 matériaux parentaux de sols minéraux) dans le Rapport 1 de l'ÉÉSSAQ. Les fiches synthèses sur les séries de sols publiées par l'équipe

pédologique de l'IRDA seront aussi utiles pour reconnaître les matériaux parentaux d'une série de sols donnée. Finalement, les rapports sur l'activité 1.2 du mandat Retombées de l'ÉSSAQ présentent un grand nombre de séries de sols qui ont été apparentées aux séries de sols étudiées dans le cadre de l'ÉSSAQ, pour lequel l'utilisateur pourra se référer en cas de doute sur le matériau parental du type de sol qu'il essaie de qualifier avec ces indicateurs.

Interprétation des indicateurs en fonction des seuils de référence

Si plusieurs indicateurs sont analysés, l'attention sera naturellement portée vers celui qui est limitant comme édicté par la loi du minimum de Liebig. La matière organique est généralement reconnue comme étant une propriété qui en influence plusieurs autres et si elle se présente à de faibles niveaux, il est fort probable que d'autres indicateurs soient fortement affectés à la baisse. Toutefois, ce n'est pas toujours le cas et certains autres indicateurs peuvent ne pas suivre la même trajectoire que la matière organique. Par exemple, les sols des sites 1 et 3 présentés au tableau 13 ont des scores relativement en lien avec celui de la MOS, mais sur le site 2 au contraire, le bon niveau de MOS (score de 63%) n'est pas en lien avec les faibles niveaux d'azote minéralisable, de carbone actif, de CO₂ dégagé ou de MVA dans l'horizon Ap. La matière organique dans le sol de ce site, bien que présente en quantité élevée par rapport à notre système d'indication, ne jouerait pas les rôles attendus pour plusieurs autres indicateurs. Ce qui témoigne de l'utilité de mesurer plusieurs indicateurs et parfois de se questionner sur les scores obtenus dans le cadre de cette analyse.

Tableau 14. Comparaison de scores entre différents indicateurs pour différents sites.

Indicateurs	Horizon	Site 1	Site 2	Site 3
		Score en %		
MOS	Ap	10	63	77
Azote minéralisable	Ap	7	4	72
Carbone actif	Ap	7	28	48
CO ₂ dégagé	Ap	18	21	76
Diamètre Moyen Pondéré	Ap	5	36	71
MVA	Ap	6	25	30
MVA	B	14	50	76
Macroporosité	B	30	92	98
S-M3	Ap	0	96	48
K-M3	Ap	9	54	74

Les scores obtenus pour le S-M3 sont un autre exemple d'indicateur qui demande un peu de nuance dans l'interprétation. Les scores font ressortir que les concentrations attendues en S-M3 dans les sols sableux à squelettiques et les tills sont plus importantes que dans les autres sols, mais ces scores ne permettent pas pour l'instant de définir des seuils sous lesquels on pourrait observer des carences en S dans la plante ou au contraire des niveaux de suffisance. Les scores ne font que rapporter les niveaux rencontrés dans la population de sols

échantillonnés dans le cadre de l'ÉÉSSAQ, avec lesquels l'utilisateur peut positionner son échantillon de sol et se questionner s'il se trouve aux limites ou dans la moyenne.

RELATION ENTRE LES INDICATEURS ET POSSIBILITÉ D'INTÉGRATION (EN CONSTRUCTION)

Les indicateurs développés dans le cadre de ce rapport fournissent un cadre d'appréciation de l'état de santé de sols agricoles du Québec en fonction des principaux facteurs qui influencent les caractéristiques biologiques, physiques et chimiques des sols ainsi que leurs principales fonctions. À cet effet, il a été proposé au milieu agricole, pour chaque indicateur, cinq classes de richesse permettant de comparer les résultats obtenus dans un contexte donné à l'ensemble des données prises dans le contexte de l'ÉÉSSAQ.

Analyse en composante principale

L'analyse en composante principale a montré que les paramètres liés à la matière organique et la masse volumique apparente dans l'horizon de surface ont constitué les principaux facteurs qui déterminent l'état de santé du sol en considérant leur contribution dans la première composante principale (Figure 19). La première composante principale, avec plus d'un tiers de la variance totale expliquée (37 %), permettrait de définir un gradient de richesse suivant l'axe des x (Dim 1). Les contributions les plus importantes à la première composante ont été fournies par la MOS (0,41), l'azote minéralisable (0,40), la MVA en Ap (0,39) tandis que la plus faible a été celle associée à la conductivité hydraulique (0,07 %) (Voir Tableau 15). La MOS ainsi que les propriétés qu'elle influence comme l'azote minéralisable et la MVA sont ainsi apparues les plus importantes pour regrouper la variabilité à l'intérieur du jeu de données. Notons pour la MVA que ce sont les scores des indicateurs et non la valeur des indicateurs qui sont utilisés ici dans l'analyse. Donc plus le score était élevé pour la MOS avec des teneurs plus élevées de MOS, plus il était élevé pour la MVA avec des plus valeurs plus faibles de MVA.

Les variables telles que la conductivité hydraulique (CH), K M-3 et la macroporosité sont celles ayant le plus d'influence sur la deuxième composante principale. La macroporosité et la CH plus élevées dans l'horizon B des sols sableux, et plus faibles dans les sols argileux semblent avoir récupéré une bonne partie de la variation, mais il est difficile d'expliquer le lien entre les teneurs plus élevées en K-M3 dans l'horizon Ap et les sols sableux. La troisième composante principale a été plus influencée par les indicateurs physiques du sol dans l'horizon B, à l'exception de la MVA dans l'horizon Ap. Le S M-3, le K M-3 et le diamètre moyen pondéré des agrégats ont eu une contribution significative sur la 4^e composante principale.

Indice global de santé des sols

En ne considérant que la première composante principale, un indice de score global a été calculé en sommant la contribution des 11 indicateurs de ce premier axe et en le pondérant par la somme des poids équivalant ici à 3,03 (Équation 1). En utilisant cette équation, la variabilité du nombre d'observations par classe était plus faible par rapport à l'utilisation d'une simple moyenne arithmétique de l'ensemble des indicateurs. En utilisant la moyenne arithmétique par exemple, la proportion des sites faisant partie des classes extrêmes tend à être sous-estimée et ne représente pas plus de 4 % des observations. L'utilisation de cette équation a permis de mieux

répartir les observations dans les différentes classes avec un minimum de 10 % des observations dans chaque classe.

$$\text{Score global} = \frac{1}{3,03} \times (0,41 \times \text{MOS} + 0,40 \times \text{N_Mineralisable} + 0,39 \times \text{CarboneActif} + 0,38 \times \text{CO2_moyen_0_14j} + 0,35 \times \text{MVA_Ap} + 0,35 \times \text{MVA_B} + 0,11 \times \text{DMP} + 0,25 \times \text{Macroporosite} + 0,07 \times \text{Conductivité hydraulique} + 0,23 \times \text{S_Meh3} + 0,09 \times \text{K_Meh3})$$

(Équation 1)

Tableau 15. Contribution des 11 indicateurs aux 4 premières composantes principales (PC) et pourcentage de variance expliquée par PC.

Indicateurs	PC1	PC2	PC3	PC4
MOS	0,41	-0,10	0,21	-0,07
Azote Minéralisable	0,40	-0,34	-0,15	0,07
MVA – Horizon Ap	0,39	0,07	0,39	0,20
Carbone actif	0,38	-0,11	0,19	-0,07
CO ₂ dégagé	0,35	-0,33	-0,07	0,11
MVA – Horizon B	0,35	0,36	-0,15	0,23
Macroporosité	0,25	0,39	-0,54	0,18
S M-3	0,23	0,22	0,08	-0,58
Diamètre Moyen Pondéré	0,11	-0,29	-0,61	-0,42
K M-3	0,09	0,41	0,16	-0,53
Conductivité hydraulique	0,07	0,41	-0,13	0,24
Variance expliquée	36,9 %	14,6 %	11,6 %	9,3%

Bien que l’usage d’indices agrégés présente l’avantage de réduire la complexité et de limiter la redondance dans l’interprétation des indicateurs, il convient de considérer les interactions complexes entre les différentes composantes du sol et la loi du minimum pour limiter les impacts plus considérables que pourrait avoir le facteur le plus limitant sur la santé globale du sol. La prise en compte des spécificités de chaque indicateur permet d’affiner et de prioriser les interventions en se focalisant sur les enjeux les plus problématiques. En effet, tous les cas de figure pour lesquels les observations pour un indicateur donné figurent dans la classe la plus défavorable (20 % des observations les plus faibles lorsque **Plus c’est Mieux** ou les plus élevées lorsque **Moins c’est Mieux**), cela indiquerait des conditions critiques nécessitant la mise en place de moyens de mitigation immédiats pour améliorer les fonctions que sous-tend l’indicateur considéré dans l’évaluation globale de l’état de santé du sol.

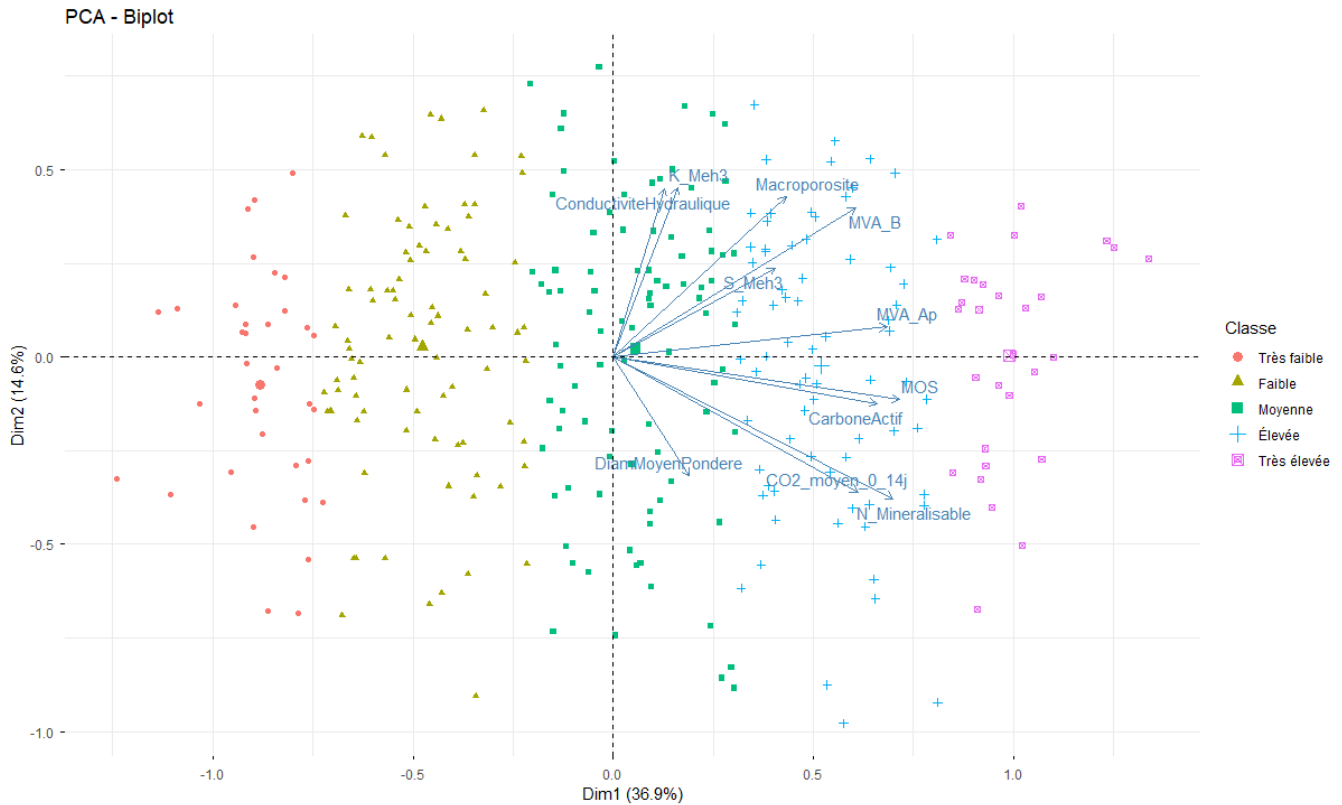


Figure 19. Distribution des scores globaux calculés dans le premier axe (Dim1) d’une analyse en composante principale à partir des 11 indicateurs développés dans le cadre de l’ÉÉSSAQ.

Dans le cas particulier des sols argileux, loameux et tills en zone périphérique, la classe de richesse très faible de MOS a été caractérisée par une valeur moyenne de 3,5 % ou un seuil maximal de 4,1 %. La valeur moyenne de cette classe (3,5 %) se rapproche du seuil critique de 2 % en carbone organique total du sol défini par Huber et al., (2008). Toutefois, dans l’horizon de surface, des problèmes de circulation d’eau et d’air en raison de la compaction pourraient être observés. Parmi les sites de très faibles teneurs en MOS, 88 % et 65 % des sites ont été respectivement caractérisés par une MVA élevée et très élevée susceptible de nuire à la croissance des racines et l’approvisionnement adéquat en nutriments de la plante (Figure 20). À l’exception du DMP et de la macroporosité où les trois quarts des observations ont été de classe moyenne à très élevée ou encore du S M-3 dont les scores ont été très variables et répartis sur l’ensemble des classes, au moins 75 % des sites argileux-loam-tills ayant une teneur très faible en MOS ont été également de classe très faible à faible pour les autres indicateurs. Comme l’a montré l’analyse en composantes principales, une bonne corrélation s’établit entre les indicateurs liés à la matière organique et la MVA.

Scores par indicateur des sites avec une teneur très faible en MOS Sol argileux, loam et tills

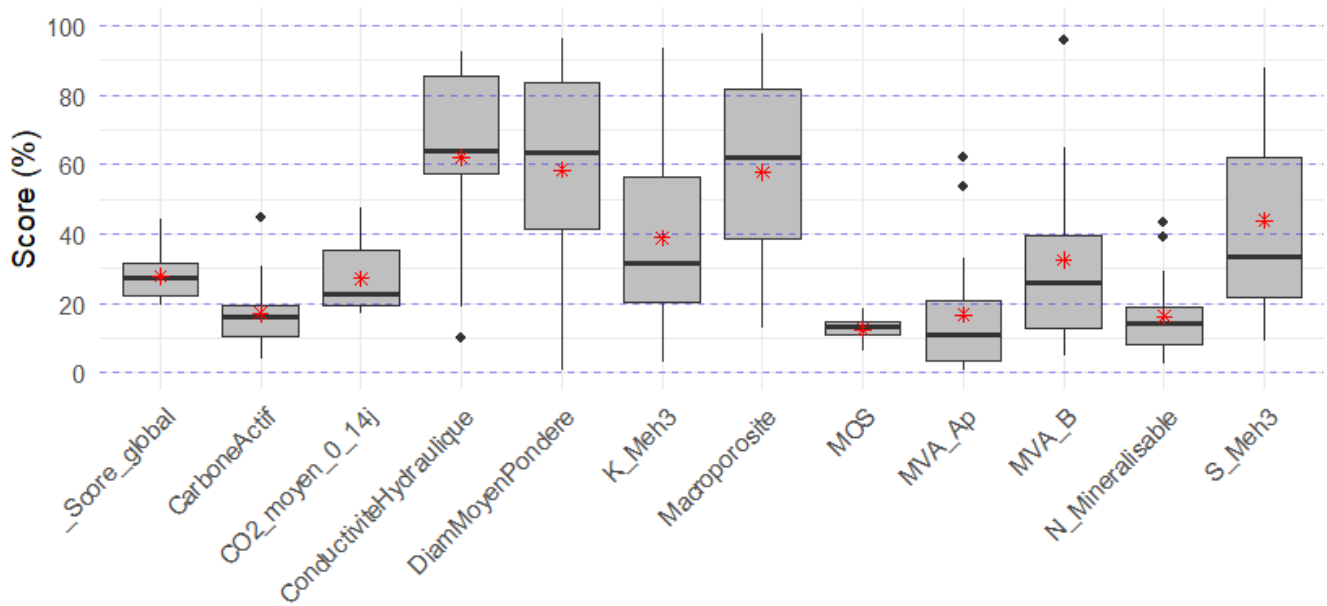


Figure 20. Score globale et distribution des scores par indicateur pour les 17 sites issus de matériaux parentaux argileux, loameux et glaciaires (Tills) ayant une très faible teneur en MOS.

MEILLEURES PRATIQUES POUR AMÉLIORER LE SCORE DES INDICATEURS

Les indicateurs avec une valeur se situant dans la classe la plus critique nécessitent des moyens de redressement afin de maintenir l'état de santé du sol à un niveau acceptable. Dans la littérature, des études ont proposé pour chacun des indicateurs couramment utilisés, des dispositions à mettre en place pour assurer le maintien des fonctions auxquelles ils participent. L'approche indicateur séparé a été priorisée. Toutefois, pour les indicateurs dont les moyens de mitigation sont similaires, des recommandations en groupe ont été priorisé.

MOS

- Réintégration des cultures pérennes dans la rotation, diversification des systèmes de cultures, et utilisation de cultures de couverture
- Adoption de pratiques culturales réduisant le travail de sol ou sans labour ; En cas de labour, opter pour des labours sans inversion
- Apports de carbone organique à l'aide d'amendements organiques (engrais de ferme, compost, résidus de culture)
- Utilisation de pratiques qui limitent l'érosion des sols
- Optimiser les processus d'irrigation en fonction du niveau d'érodabilité des sols

Azote minéralisable

- Bonne gestion de la MOS
- Favoriser la vie microbienne en utilisant des pratiques de gestion des cultures adaptées (pH optimal, rotation de cultures, bonne aération du sol)
- Application de la bonne dose d'engrais au bon moment et à la bonne place (Bashir et al., 2023)
- Intégration de légumineuses dans les systèmes de cultures pour améliorer la disponibilité du N (Bashir et al., 2023)

Carbone actif

- Bonne gestion de la MOS
- Favoriser des pratiques de travail réduit du sol (Weil et al., 2003)

CO2 dégagé

- Bonne gestion de la MOS
- Maintenir un ratio Corg/Nt adéquat (entre 10 et 12) pour favoriser la minéralisation et la croissance de la communauté microbienne (Dilly et al., 2003)
- Opter pour des rotations de cultures impliquant l'établissement de prairies pour favoriser la séquestration de carbone
- Réduire les travaux de sol

Indicateurs physiques

- Bonne gestion de la MOS : un sol riche en MO est plus résistant à la compaction (Smith et al., 2024)
- Favoriser des pratiques sans labour ou le travail réduit du sol
- Minimiser les risques de compaction par un bon timing de circulation : le risque de compaction est plus important en sols humides (Tim Chamen et al., 2015)
- Prioriser des machines à chenilles pour réduire le risque de compaction profonde (Ansorge & Godwin, 2007; Smith et al., 2024)
- Prioriser des pneus à grand diamètre et limiter la pression de gonflage pour réduire la compaction de surface (Ansorge & Godwin, 2008)
- Contrôler la circulation dans le champ pour confiner le compactage à des places spécifiques
- Accroître la remédiation naturelle des sols compactés par l'établissement des cultures à grande densité racinaire (Intégrer les cultures fourragères pérennes dans les rotations et des cultures de couverture)
- Associer Sous-solage et Incorporation de la MO pour diminuer la compaction et améliorer la structure du sol sur le long terme (Smith et al., 2024)

Soufre M - 3

- Apporter des engrais de ferme
- Bonne gestion de la MOS : Favoriser l'activité microbienne ; la minéralisation et le renouvellement de la MOS
- Apporter les engrais azotés et potassiques sous forme de sulfates pour améliorer la disponibilité du soufre pour la plante. Consulter le guide de fertilisation du MAPAQ pour les recommandations en soufre pour les cultures sensibles à la carence en soufre.
- Améliorer l'aération du sol
- Maintenir un niveau de pH adéquat dans le sol : un pH légèrement acide à neutre optimiserait à la fois la sorption du soufre par le sol et la disponibilité du S pour l'absorption racinaire
- Limiter les risques de lessivage et d'érosion du sol (Brise-vent, Couverts végétaux, Rotation de cultures)

CONCLUSION

L'analyse des données de l'ÉSSAQ a permis de développer un système d'indication pour 11 propriétés des sols permettant d'évaluer l'état de santé des sols agricoles du Québec. L'approche CASH a été utilisée tout en adaptant le cadre de référence et d'interprétation afin d'obtenir un système plus conforme à la réalité québécoise. Le choix des indicateurs repose sur des critères de validité, de fiabilité, d'accessibilité et de simplicité de mesure.

Parmi les indicateurs retenus, quatre sont liés à la matière organique du sol et à sa dynamique (MOS, N minéralisable, carbone actif et CO₂ dégagé). Ces indicateurs biologiques revêtent une importance croissante dans l'évaluation de la santé des sols et soutiennent plusieurs fonctions: la fourniture de nutriments, le stockage et la transformation du carbone, le maintien de la biodiversité, l'agrégation et la structure du sol, la porosité, les échanges gazeux, la dynamique de l'eau, etc. Pour l'ensemble des indicateurs liés à la matière organique, la zone géographique constitue l'un des principaux facteurs déterminant la distribution des valeurs observées. En zone périphérique, caractérisée par des températures moyennes inférieures à 5 °C, des niveaux de matière organique plus élevés ont été observés, influençant l'ensemble des autres indicateurs biologiques. Ainsi, pour des types de sols similaires, les valeurs seuils en zone périphérique sont globalement plus élevées qu'en zone méridionale.

Les indicateurs physiques considérés visent à mieux caractériser la structure des sols ainsi que leur capacité à favoriser la croissance racinaire, l'infiltration de l'eau, la disponibilité de l'eau aux plantes et aux microorganismes, ainsi que les échanges gazeux. Les indicateurs tels que la masse volumétrique apparente (MVA) mesurée dans les horizons Ap et B, la macroporosité, la conductivité hydraulique saturée et le diamètre moyen pondéré des agrégats fournissent des seuils de référence pour une gestion optimale de l'eau et des échanges gazeux.

En ce qui concerne la chimie-fertilité des sols, l'analyse des données de S M-3 et K M-3 a permis de définir de nouvelles classes de richesse. Pour le S M-3, les valeurs seuils issues de l'ÉSSAQ démontrent que, contrairement aux idées préconçues et malgré des teneurs en MOS plus faibles, les sols sableux présentent des concentrations en S M-3 plus élevées que les autres types de sols. Pour le potassium, une cohérence entre la teneur en argile et la quantité de K extrait en solution M-3 a été observée : plus le sol est argileux, plus la CEC et la réserve de potassium dans les feuillets d'argile sont importantes et plus la concentration en K M-3 maintenue à l'équilibre est importante.

Ce travail, en fournissant des seuils de références, constitue un outil de diagnostic pour les intervenants du milieu agricole mieux adaptés aux conditions du Québec, permettant de suivre les indicateurs de santé des sols et leur évolution lors de la mise en place de mesures de mitigation et d'adoption de meilleures pratiques en conservation des sols. Les travaux futurs devraient permettre d'intégrer davantage de données afin de permettre un diagnostic plus précis de l'état de santé des sols et d'affiner l'interprétation des indicateurs.

RÉFÉRENCES

- Angers, D. A., Bullock, M. S., & Mehuys, G. . (2007). *Aggregate stability to water. Chapitre 62. pp. 811-819. dans Carter, M.R. et Gregorich, E.G. Éds. 2007. Soil sampling and methods of analysis. Canadian Society of Soil Science. CRC Press Taylor & Francis, Boca Raton, FL. 1224 p.* <https://doi.org/10.59317/9789390083992>
- Aspel, C., Murphy, P. N. C., McLaughlin, M. J., & Forrestal, P. J. (2022). Sulfur fertilization strategy affects grass yield, nitrogen uptake, and nitrate leaching: A field lysimeter study#. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 185(2), 209–220. <https://doi.org/10.1002/jpln.202100133>
- Bashir, H., Zafar, S., Rehman, R., Hussain, M., Haris, M., Khalid, M., Awais, M., Sadiq, M., & Amjad, I. (2023). Impact of Potentially Soil Mineralizable Nitrogen (Pmn) on Soil Health and Crop Production. *Biological and Agricultural Sciences Research Journal*, 2023(1), 12. <https://doi.org/10.54112/basrj.v2023i1.12>
- Bonilla-bedoya, S., Valencia, K., Angel, M., Magdalena, L., & Pezzopane, M. (2023). *Mapping 50 years of contribution to the development of soil quality biological indicators.* 148(November 2022). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110091>
- Brooks, M. E., Kristensen, K., van Benthem, K. J., Magnusson, A., Berg, C. W., Nielsen, A., Skaug, H. J., Mächler, M., & Bolker, B. M. (2017). glmmTMB balances speed and flexibility among packages for zero-inflated generalized linear mixed modeling. *R Journal*, 9(2), 378–400. <https://doi.org/10.32614/rj-2017-066>
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120(February), 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Carter, M. R. (1988). Temporal variability of soil macroporosity in a fine sandy loam under mouldboard ploughing and direct drilling. *Soil and Tillage Research*, 12(1), 37–51. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(88\)90054-2](https://doi.org/10.1016/0167-1987(88)90054-2)
- Chaney, K., & Swift, R. S. (1984). The influence of organic matter on aggregate stability in some British soils. *Journal of Soil Science*, 35(2), 223–230.
- Cousin, I., Desrousseaux, M., Angers, D., Augusto, L., Ay, J., Baysse-lainé, A., Branchu, P., Brauman, A. A., Prévost-bouré, N. C., Compagnone, C., Cousin, I., Desrousseaux, M., Angers, D., Augusto, L., & Ay, J. (2025). *Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs. Rapport d'étude. INRAE. 780 p. HAL Id : hal-04934694.*
- Czúcz, B., Keith, H., Maes, J., Driver, A., & Jackson, B. (2021). Selection criteria for ecosystem condition indicators. *Ecological Indicators*, 133(December), 108376. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108376>
- Dilly, O., Blume, H. P., Sehy, U., Jimenez, M., & Munch, J. C. (2003). Variation of stabilised, microbial and biologically active carbon and nitrogen in soil under contrasting land use and agricultural management practices. *Chemosphere*, 52(3), 557–569. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00237-6](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00237-6)
- Drinkwater, L. E., Cambardella, C. A., Reeder, J. D., & Rice, C. W. (1996). *Potentially Mineralizable Nitrogen as an Indicator of Biologically Active Soil Nitrogen. In Methods of Assessing Soil Quality. Doran J. W. and Jones A. J. (Éd.). SSSA, Madison, WI, USA. pp 217–229.*
- Environnement Canada. (2023). *Canada–United States Air Quality Agreement, progress report 2020-2022.*
- Eriksen, J. (2009). *Soil sulfur cycling in temperate agricultural systems. Advances in agronomy*, 102, 55-89.
- Fine, A. K., van Es, H. M., & Schindelbeck, R. R. (2017). Statistics, Scoring Functions, and Regional Analysis of a Comprehensive Soil Health Database. *Soil Science Society of America Journal*, 81(3), 589–601. <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.09.0286>

- Gasser, M.-O., Bossé, C., Clément, C. C., Bernard, C., Mathieu, J.-B., & Tremblay, M.-È. (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 présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). IRDA. 190 pages.* www.irda.qc.ca
- Gasser, M.-O., Clément, C.-C., Eduardo Chavez Benalcazar, P. D., Sc Jean-Benoît Mathieu, B., Sc Marie-Ève Tremblay, M., Sc Catherine Bossé, M., Sc Collaborateurs, agr B., Bernard, C., Allard, F., Sc Nyck Rochel Occean, M., Sc Myck Wu, M., Lucie Grenon, P. D., Sc Michèle Grenier, B., & Sc, M. (2023). *Effets des pratiques agricoles et des conditions biophysiques sur la santé des sols et la productivité des cultures.* www.irda.qc.ca
- Gauthier, M., Hogue, R., D'Astous-Pagé, J., Champagne, M., & Halde, C. (2023). Developing scoring functions based on soil texture to assess agricultural soil health in Quebec , Canada. *Canadian Journal of Soil Science*, 103, 618–633. [dx.doi.org/10.1139/cjss-2022-0116](https://doi.org/10.1139/cjss-2022-0116)
- Grable, A. R., & Siemer, E. G. (1968). Effects of Bulk Density, Aggregate Size, and Soil Water Suction on Oxygen Diffusion, Redox Potentials, and Elongation of Corn Roots. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 32. <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj1968.03615995003200020011x>
- Hoefgen, R., & Hesse, H. (2007). *Sulfur in plants as part of a metabolic network.* In: Hawkesford, M.J., De Kok, L.J. (eds) *Sulfur in Plants An Ecological Perspective. Plant Ecophysiology*, vol 6. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5887-5_6.
- Huber, S., Prokop, G., Arrouays, D., Banko, G., Bispo, Jones, A., R.J.A., Kibblewhite, M. G., Lexer, W., Möller, A., Rickson, R. J., Shishkov, T., Stephens, M., Toth, G., Van den Akker, J. J. H., Varallyay, G., Verheijen, F. G. A., & Jones, A. R. (2008). *Environmental Assessment of Soil for Monitoring: Volume I Indicators & Criteria. EUR 23490 EN/1, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 339pp.* (eds). <https://doi.org/10.2788/93515>
- Jarvis, N. J. (2007). A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: Principles, controlling factors and consequences for water quality. *European Journal of Soil Science*, 58(3), 523–546.
- Koop, A. N., Hirmas, D., Billings, S. A., Li, L., Cueva, A., Zhang, X., Wen, H., Nemes, A., de Souza, L. F. T., Ajami, H., Flores, A. N., Rudick, A. K., Guthrie, A., Klamm, L. M., Unruh, M., & Sullivan, P. L. (2022). Is Macroporosity Controlled by Complexed Clay and Soil Organic Carbon? *SSRN Electronic Journal*, CCSOC relationship also holds within ecoregions bu. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4207711>
- Kowalenko, C. G., Bittman, S., Neilsen, G. H., Kenney, E., Hunt, D. E., & Neilsen, D. (2014). Potential for improving sulfur tests on agricultural soils in contrasting ecoregions of British Columbia, Canada. *Geoderma Regional*, 1(C), 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2014.06.001>
- Landry, C., Forest-D., J., Joseph, C.-A., Jacques, M. M., & Laroche, J. P. (2023). *Fertilisation des plantes fourragères pérennes : production. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Fascicule 10. Version préliminaire. IRDA. 109 pages.*
- Le Bissonais, Y. L. (1996). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47, 425–437.
- Lima, C. G. da R., Carvalho, M. de P., Mello, L. M. M. de, & Lima, R. C. (2007). Correlação linear e espacial entre a produtividade de forragem, a porosidade total e a densidade do solo de Pereira Barreto (SP). *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 31(6), 1233–1244. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832007000600002>
- Mehlich, A. (1984). Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 15(June 2012), 1409–1416.

- Moebius-Clune, B. N., Moebius-Clune, D. J., Gugino, B. K., Idowu, O. J., Schindelbeck, R. R., Ristow, A. J., van Es, H. M., Thies, J. E., Shayler, H. A., McBride, M. B., Wolfe, D. W., & Abawi, G. S. (2016). *Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework Manual* (3.1). Cornell University, Geneva, NY.
- Naveed, M., Moldrup, P., Arthur, E., Wildenschild, D., Eden, M., Lamandé, M., Vogel, H.-J., & de Jonge, L. W. (2013). Revealing Soil Structure and Functional Macroporosity along a Clay Gradient Using X-ray Computed Tomography. *Soil Science Society of America Journal*, 77(2), 403–411. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0134>
- NRCS. (2019). *Natural Resources Conservation Service : Soil Health - Bulk Density/Moisture/Aeration. Guides for educators. United States Department of Agriculture. 11 p.*
- Nunes, M. R., Karlen, D. L., Seybold, C. A., Veum, K. S., Amsili, J. P., Moorman, T. B., Parker, P. A., van Es, H. M., Holan, S. H., & Wills, S. A. (2021). The soil health assessment protocol and evaluation applied to soil organic carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 85, 1196–1213. <https://doi.org/10.1002/saj2.20244>
- Panagos, P., Rosa, D. De, Liakos, L., Labouyrie, M., Borrelli, P., & Ballabio, C. (2024). Agriculture , Ecosystems and Environment Soil bulk density assessment in Europe. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 364(December 2023), 108907. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.108907>
- R Core Team. (2025). *R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.*
- Reynolds, W. D. (2007). *Saturated Hydraulic Properties: Well Permeameter. In Carter, M.R. et Gregorich, E.G. (Eds.). Soil sampling and methods of analysis. Canadian Society of Soil Science. CRC Press Taylor & Francis, Boca Raton, FL. pp. 1025-1042.*
- Ruan, R., Zhang, Z., Tu, R., Wang, Y., Xiong, P., Li, W., & Chen, H. (2021). Variable responses of soil pore structure to organic and inorganic fertilization in a Vertisol. *International Agrophysics*, 35(2), 221–225. <https://doi.org/10.31545/intagr/140885>
- Scherer, H. W. (2009). Sulfur in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172(3), 326–335. <https://doi.org/10.1002/jpln.200900037>
- Shestak, C. J., & Busse, M. D. (2005). Compaction Alters Physical but Not Biological Indices of Soil Health. *Soil Science Society of America Journal*, 69(1), 236. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0236>
- Smith, P., Poch, R. M., Lobb, D. A., Bhattacharyya, R., Alloush, G., Eudoxie, G. D., Anjos, L. H. C., Castellano, M., Ndzana, G. M., & Chenu, C. (2024). Status of the World’s Soils. *Annual Review of Environment and Resources*, 49(2024), 73–104.
- Toor, G. S., Yang, Y. Y., Das, S., Dorsey, S., & Felton, G. (2021). Soil health in agricultural ecosystems: Current status and future perspectives. In *Advances in Agronomy* (1st ed., Vol. 168). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.02.004>
- Valani, G. P., Martini, A. F., da Silva, L. F. S., Bovi, R. C., & Cooper, M. (2021). Soil quality assessments in integrated crop–livestock–forest systems: A review. *Soil Use and Management*, 37(1), 22–36. <https://doi.org/10.1111/sum.12667>
- Vermeiren, C., Smolders, E., McLaughlin, M. J., & Degryse, F. (2018). Model-based rationalization of sulphur mineralization in soils using 35S isotope dilution. *Soil Biology and Biochemistry*, 120(May 2017), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.013>
- Vitória, E. L., Fernandes, H. C., Teixeira, M. M., Cecon, P. R., & Lacerda, E. D. G. (2012). Linear and spatial correlations among forage yield, bulk density and total porosity in function of soil management system. *Engenharia*

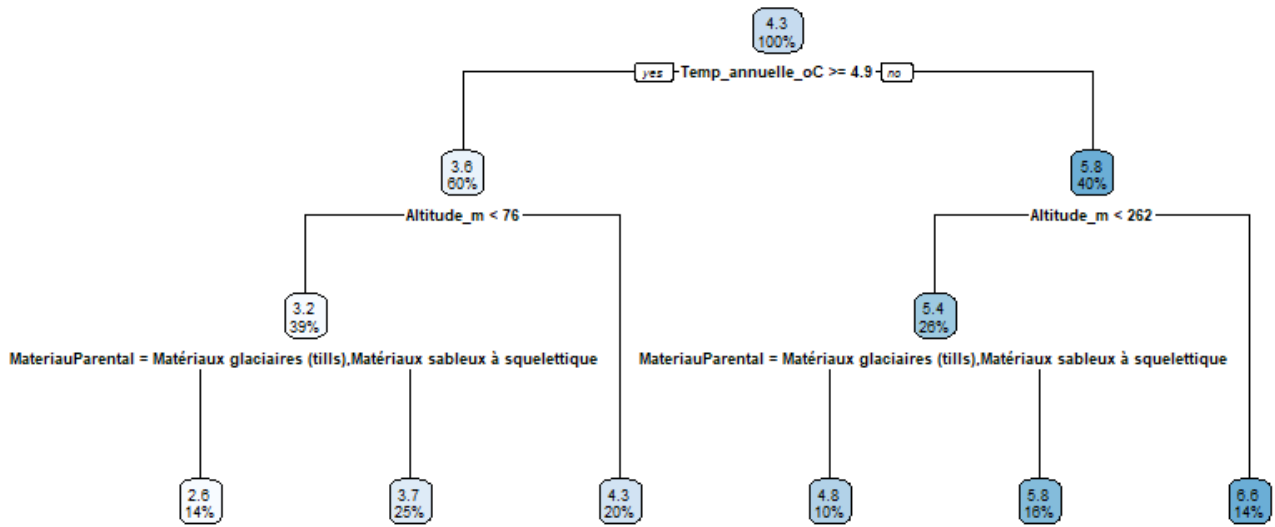
Agricola, 32(5), 909–919. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000500010>

Weil, R. R., Islam, K. R., Stine, M. A., Gruver, J. B., & Samson-Liebig, S. E. (2003). Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. *American Journal of Alternative Agriculture*, 18(1), 3–17. <https://doi.org/10.1079/AJAA2003003>

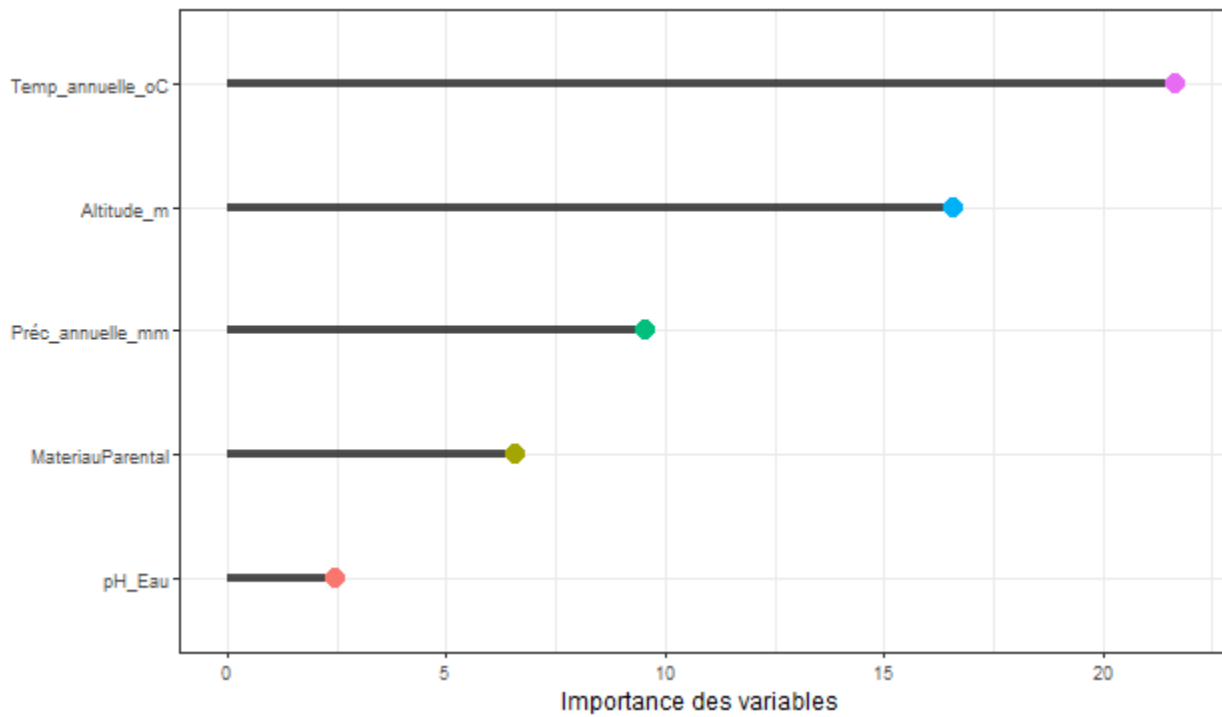
Xu, N., Amgain, N. R., Rabbany, A., Capasso, J., Korus, K., Swanson, S., & Bhadha, J. H. (2022). Interaction of soil health indicators to different regenerative farming practices on mineral soils. *Agrosystems, Geosciences and Environment*, 5(1). <https://doi.org/10.1002/agg2.20243>

Zbírál, J., Smatanová, M., & Němec, P. (2018). Sulphur status in agricultural soils determined using the Mehlich 3 method. *Plant, Soil and Environment*, 64(6), 255–259. <https://doi.org/10.17221/142/2018-PSE>

Annexe A

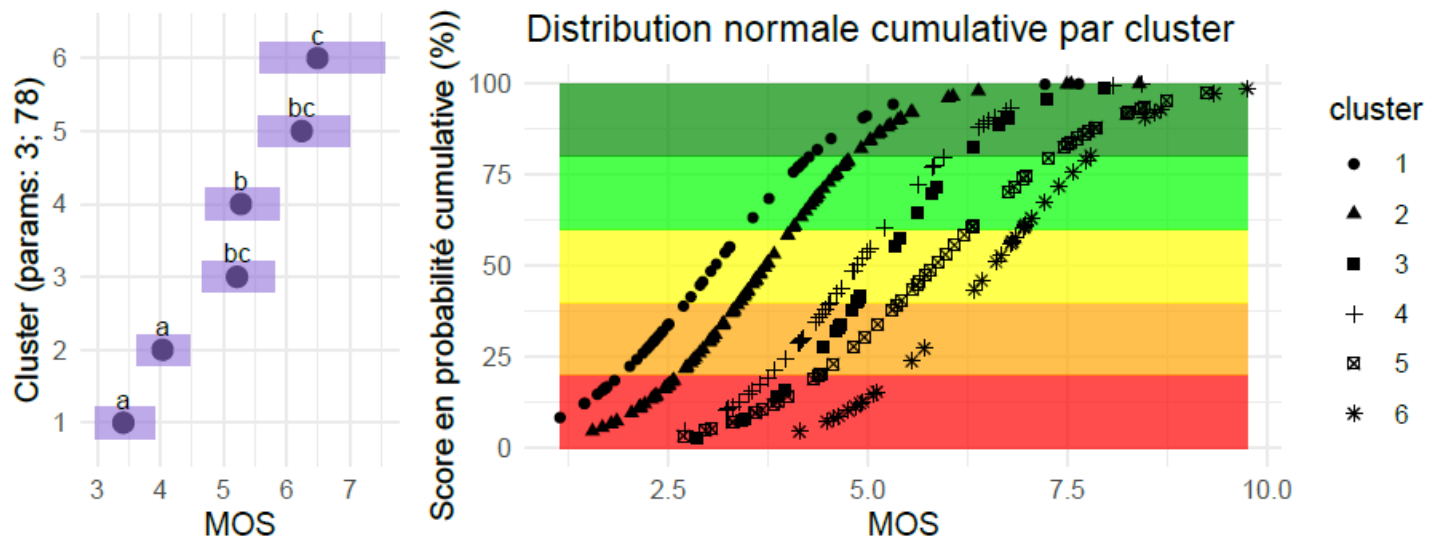


MOS (params: 3; 80)



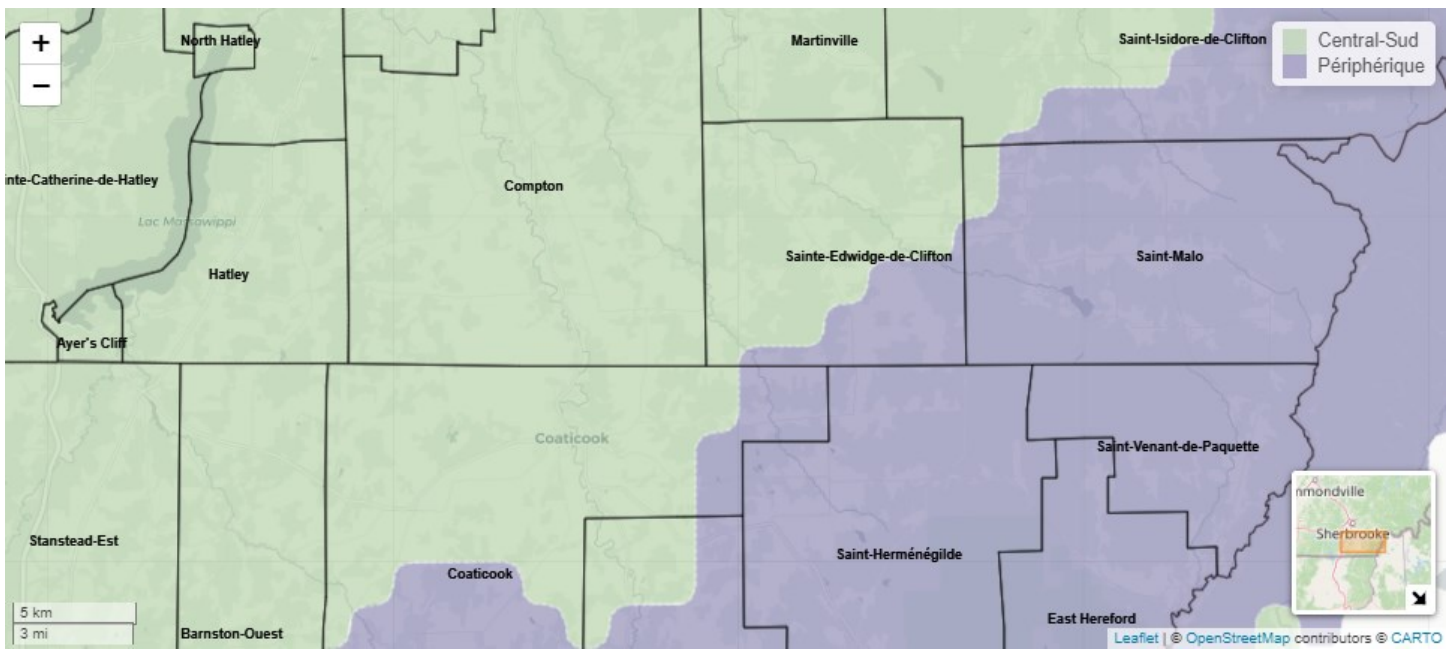
Annexe B

Best model : $\text{logit}(\text{MOS}/100) \sim \text{Temp_annuelle_oC} + \text{Altitude_m} + \text{Préc_annuelle_mm} + \text{cluster} + \text{cluster_texture} + (1 | \text{Préc_annuelle_mm})$

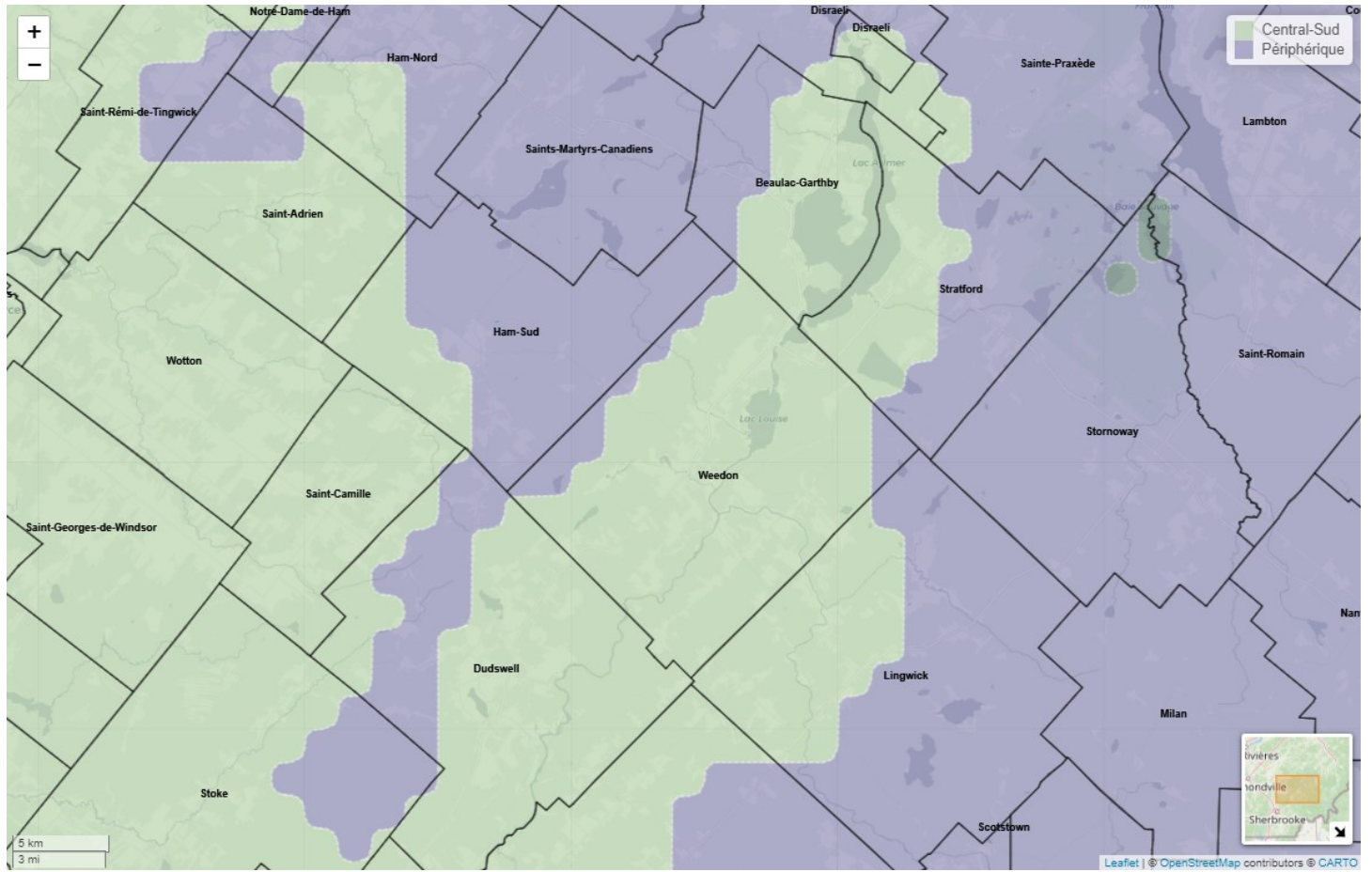


Annexe C

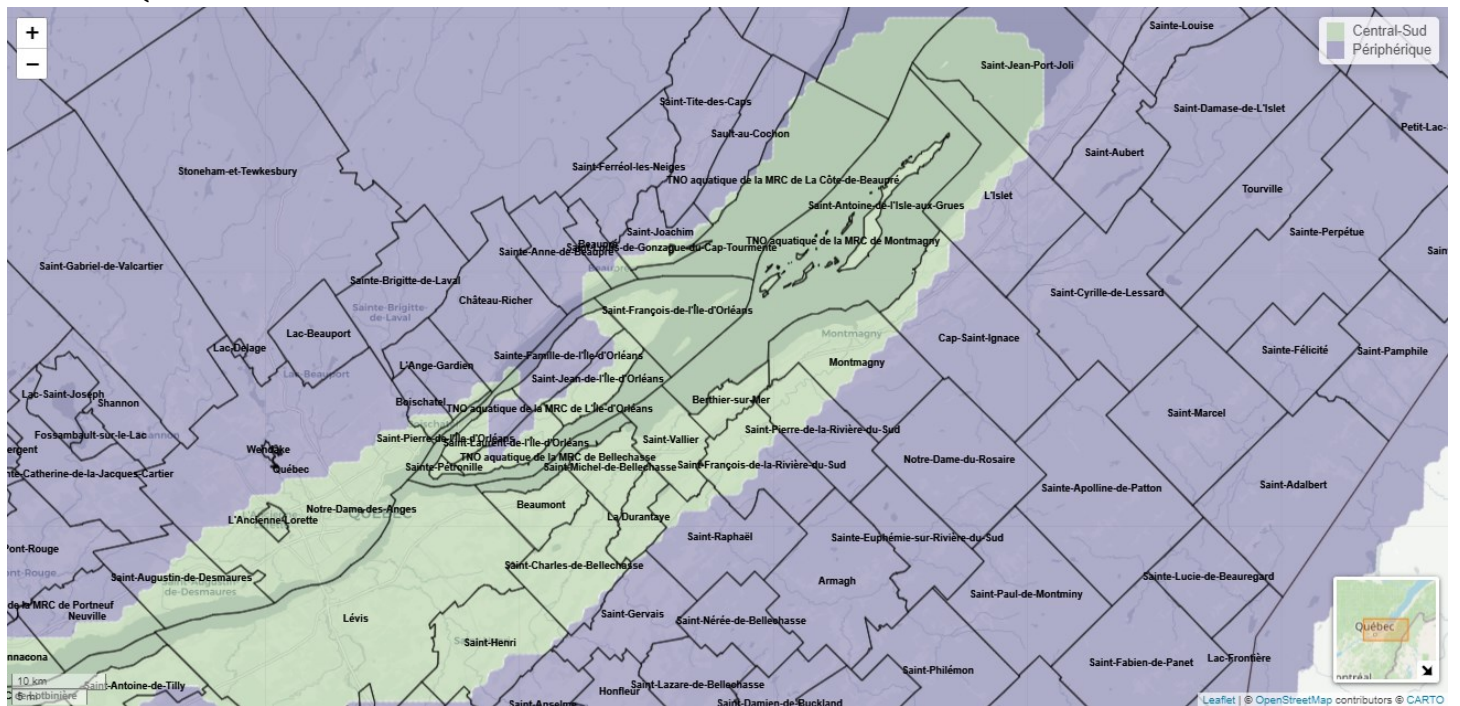
SE vers Sherbrooke



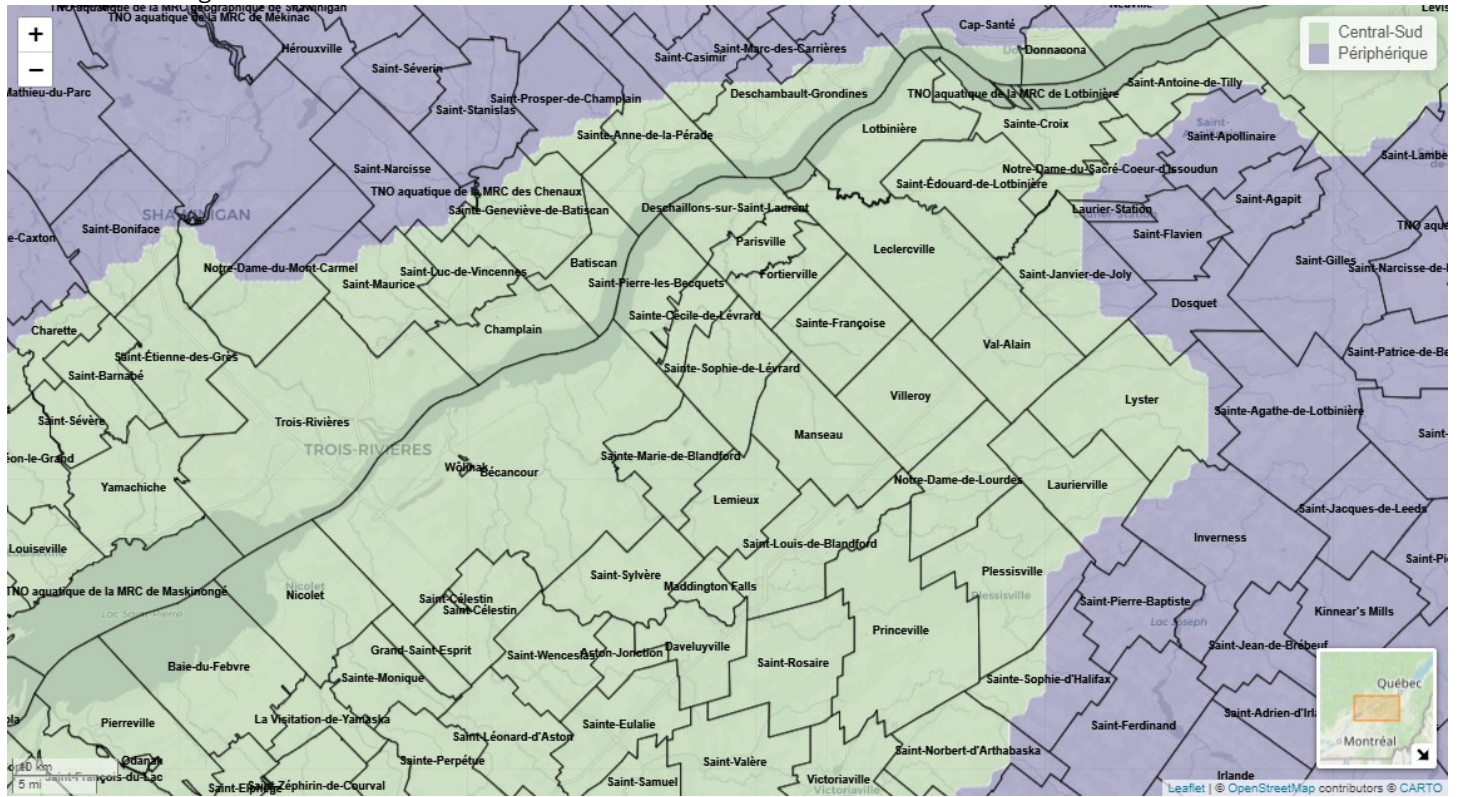
Est vers Drummondville



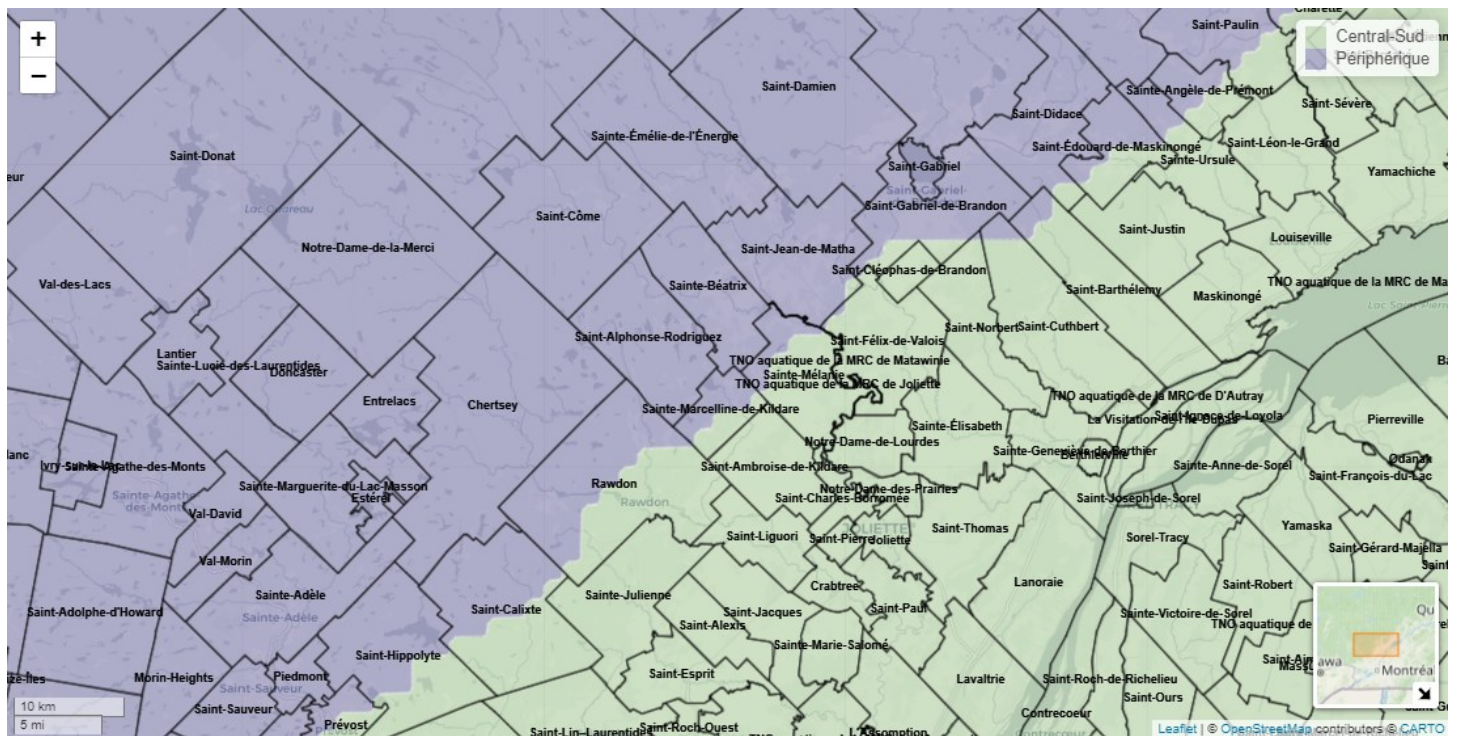
Nord vers Québec



NO vers Shawinigan



Nord-Ouest vers Saint-Donat



Ouest vers Gatineau

