

Rapport 1 de l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec
État de santé des principales séries de sols cultivées



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

Co-auteurs : Catherine Bossé, agr. B. Sc.
Chedzer-Clarc Clément, Ph. D.
Claude Bernard, Ph. D.,
Lucie Grenon, agr., B. Sc.
Jean-Benoît Mathieu, M. Sc.
Marie-Ève Tremblay, agr., M. Sc

Collaborateurs : Francis Allard, agr., M. Sc.
Eduardo Chavez Benalcazar, B. Sc.
Michèle Grenier, M. Sc.
Michaël Leblanc, Ph. D.
Nyck Rochel Ocean, agr., M. Sc.
Myck Wu, Ph. D.

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

Date : Avril 2023

Projet IRDA # : 820 050



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

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

Notre mission

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

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



Ce rapport peut être cité comme suit :

Gasser, M.-O., Bossé C., Clément, C.C., Bernard, C., Grenon., L., Mathieu, J.-B., Tremblay, M.-E. 2023. Rapport 1 de l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec : État de santé des principales séries de sols cultivées. Rapport final présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). IRDA. 190 pages.

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

Équipe de réalisation du projet

Responsable scientifique

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

Chercheur associé

Claude Bernard, Ph. D.

Chargés de projet et prof. de recherche :

Catherine Bossé, agr. B. Sc.

Marie-Ève Tremblay, agr., M. Sc.

Francis Allard, agr., M. Sc.

Chedzer-Clarc Clément, Ph. D.

Équipe de rédaction du rapport

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

Catherine Bossé, agr. B. Sc.

Chedzer-Clarc Clément, Ph. D.

Claude Bernard, Ph. D.

Lucie Grenon, agr., B. Sc.

Jean-Benoît Mathieu, M. Sc.

Marie-Ève Tremblay, agr., M. Sc.

Collaborateurs IRDA

Michèle Grenier, M. Sc.

Myck Wu, Ph. D.

Eduardo Chavez Benalcazar, B. Sc.

Nyck Rochel Occean, agr., M. Sc.

Pierre-Luc Lemire, Tech. A.

Rachelle Fecteau, Tech. A.

Philippe Fortin, Tech. A.

Collaborateurs externes

Lucie Grenon, agr., B. Sc.

Michaël Leblanc, Ph. D.

Mikaël Guillou, M.Sc.

Denis Angers, Ph.D.

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

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

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

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

Téléphone : 418 643-2380, poste 650

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

Remerciements

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

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

Comité d'orientation et de suivi du MAPAQ

Coordination :

Janylène Savard et Stéphane Martel, MAPAQ

Membres du comité :

Denis Angers et Lucie Grenon (retraités d'AAC)

Athyna Cambouris et Noura Ziadi (AAC)

Mikael Guillou, Odette Ménard et Denis Ruel (MAPAQ)

FAITS SAILLANTS

DES PROBLÈMES DE SANTÉ DES SOLS EN LIEN AVEC L'INTENSITÉ DES PRATIQUES AGRICOLES

Les phénomènes de dégradation des propriétés physiques et celles reliées à la matière organique des sols cultivés sont plus fréquemment observés dans les régions plus méridionales du Québec, dans la plaine de Montréal et le Centre du Québec où les cultures annuelles sont plus présentes et intensives.

La dégradation des propriétés physiques dans l'horizon B est plus critique, car elle est plus difficile à corriger. Les processus d'échanges d'air et l'écoulement de l'eau sont plus fréquemment affectés à cette profondeur et limitant dans les sols argileux, loameux et certains tills, surtout en régions plus méridionales.

Les sols sableux à squelettiques et certains tills peuvent être plus compacts en profondeur, mais ne devraient pas rencontrer les mêmes limitations. Ces sols démontrent plutôt une plus faible capacité de rétention en eau en profondeur inhérente au matériau.

En surface, la structure du sol est aussi plus souvent dégradée dans les sols des régions plus méridionales sous cultures intensives, mais la grosseur des agrégats affectée varie selon le type de matériaux.

L'intensité des pratiques agricoles et du travail de sol de même que la compaction engendrée par le passage de la machinerie de plus en plus lourde sont certainement responsables des problèmes plus importants remarqués en profondeur dans le sol au niveau des processus d'aération et d'infiltration de l'eau dans les sols plus lourds, de même que de rétention en eau dans les sols plus légers.

Ces pratiques plus intensives conditionnent aussi l'érosion des sols en interaction avec les conditions topographiques et le type de matériau parental.

La teneur en matière organique du sol et sa capacité à se minéraliser est affectée à la baisse par l'intensité des pratiques en lien avec le climat et atteint des niveaux plus critiques dans les sols sableux à squelettiques.

La comparaison de ces résultats avec ceux de l'inventaire de 1990 ne permet pas de conclure à un accroissement des phénomènes de dégradation des propriétés physiques. Les sols en régions plus méridionales demeurent plus compacts ou manquent d'aération comme en 1990, mais ceux en régions périphériques apparaissent aujourd'hui moins dégradés. Les phénomènes d'accumulation de P, Cu et Zn Mehlich-3 et dans une moindre mesure la diminution de la matière organique dans les sols se poursuivent.

RÉSUMÉ

L'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec est basée sur l'échantillonnage et la caractérisation de profils de sols réalisés sur 431 sites répartis dans la zone agricole du Québec. Soixante et onze séries de sols parmi les plus représentatives des sols cultivés ont été regroupées selon la granulométrie ou l'origine du matériau parental en six groupes de sols argileux, cinq groupes de sols loameux, six groupes de sols sableux à squelettiques, huit groupes de tills (sols issus de dépôts glaciaires) et un groupe de sols organiques. Chaque série a été échantillonnée sur quatre sites (champs) cultivés et deux sites témoins. Chaque site a été échantillonné à quatre endroits et à trois profondeurs dans la même série de sols. Les indicateurs de santé des sols ont été choisis pour évaluer la condition physique, l'activité biologique liée à matière organique, la chimie-fertilité du sol et la surfertilisation. Certains de ces indicateurs ont servi pour fin de comparaison avec l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols du Québec (Tabi et al., 1990).

On observe au niveau de la condition physique des sols, des problèmes de compaction, de manque d'aération et de capacité de diffusion des gaz, de circulation de l'eau et de détérioration de la structure. Les sols sableux à squelettiques et les tills cultivés sont plus souvent compacts, tandis que les sols argileux et loameux ont plus souvent des problèmes d'aération et de restriction de la diffusion des gaz en profondeur. À l'échelle de la province, le climat influence l'intensité des activités agricoles et la prépondérance des cultures annuelles dans les régions plus méridionales (Montérégie, Centre-du-Québec). L'influence de ce gradient climatique et de l'intensité des pratiques se traduit par une diminution plus importante de la macroporosité dans les sols argileux et les tills, de la capacité de rétention en eau dans les sols sableux à squelettiques et par une dégradation de la structure dans tous les groupes de séries de sols cultivés en régions plus méridionales dans les basses-terres du Saint-Laurent.

L'influence du climat est encore plus importante au niveau de la matière organique et l'activité biochimique qu'elle régule. Les sols cultivés en régions plus froides ont généralement des teneurs en matière organique plus élevées qu'en régions plus chaudes. Toutefois, les écarts entre sols cultivés et témoins sont plus élevés dans l'horizon de surface Ap1 en termes de capacités de minéraliser du carbone et de l'azote en incubation, peu importe la région. Même si les niveaux de matière organique demeurent plus élevés dans les sols cultivés en climat plus froid, leur plus faible capacité de minéralisation sous-tend que le travail du sol et l'activité agricole amenuisent ces réserves du sol liées à la matière organique. Les sols en régions plus méridionales et sous l'influence de pratiques culturales et agricoles plus intensives présentent aussi plus souvent des problèmes de détérioration de leur structure dans l'horizon Ap1 en lien avec les plus faibles teneurs en matière organique.

L'érosion des sols cultivés est moins importante dans les sols organiques et les sols loameux. Elle est un peu plus élevée dans les sols argileux et plus importante dans les sols sableux et les tills. Dans ces derniers, la perte moyenne de sols est supérieure à la limite de 6 t/ha/an tolérable pour les sols du Canada. Les conditions topographiques expliquent une faible part de l'érosion des sols, tandis que leur association aux régions pédologiques en expliquerait une part plus importante, du fait qu'elles intègrent les effets du type de matériau parental, des conditions topographiques et de l'intensité des pratiques agricoles (Bernard, 2022).

Les propriétés comme celles de la chimie-fertilité sont davantage affectées par les activités agricoles comme le chaulage, la gestion des engrais et des effluents d'élevage, ainsi que par le type de matériau ou le type de sols. Le niveau de saturation en P dépasse plus souvent le seuil critique dans l'horizon Ap1 des sols sableux à squelettiques. Les écarts entre indices de saturation en phosphore en sols cultivés et témoins, de même que les niveaux de saturation atteints dans l'horizon B sont souvent plus importants dans les matériaux sableux à squelettiques et

les tills, témoignant de l'importance de la gestion des effluents d'élevages dans ces sols. Les teneurs en Cu et Zn augmentent aussi dans les sols cultivés en lien avec la gestion des effluents d'élevages, mais les effets sont différents selon l'élément et les types de sols. Les sols argileux et les tills cultivés ont plus souvent des teneurs plus élevées en Cu, tandis que les sols sableux et les tills ont plus souvent des teneurs plus élevées en Zn.

Les résultats présentés dans la synthèse du présent rapport introduisent l'analyse de l'effet des pratiques agricoles sur la santé des sols abordée dans le rapport 2 de l'EESSAQ. Les signes de dégradation des sols cultivés sont similaires à ceux présentés dans l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols du Québec en lien avec les monocultures (Tabi et al., 1990). La comparaison de ces résultats avec ceux de 1990 ne permet pas de conclure à un accroissement des phénomènes de dégradation. À l'orée de 2020, les sols en régions plus méridionales demeurent plus compacts ou manquent d'aération comme en 1990, mais ceux en régions périphériques apparaissent aujourd'hui moins dégradés en termes physiques.

On observe des gradients dans les indicateurs de santé des sols, particulièrement ceux reliés à la matière organique, qui sont liés aux régions pédologiques et donc au climat qui dictent en bonne partie le choix des cultures et l'intensité des pratiques agricoles sur le territoire. Les sols sont plus compacts et leurs propriétés dynamiques plus dégradées dans les régions plus méridionales où l'intensité des pratiques est plus élevée. Les niveaux d'accumulations de P, Cu et Zn extraits en solution Mehlich-3 sont davantage reliés aux types de sols, mais la fréquence des apports en effluents d'élevage et les bilans d'apport sont fort probablement responsables des variations obtenues à l'intérieur des mêmes matériaux.

Plusieurs phénomènes ou processus de dégradation menaçant la santé des sols n'ont pas été mesurés dans le cadre de cette étude. La détection de métaux lourds, de pesticides, de produits antibiotiques, de contaminants éternels (PFAS) et autres contaminants d'intérêt émergent aurait nécessité des protocoles plus élaborés et des budgets supplémentaires. Certaines de ces analyses peuvent toutefois encore se réaliser sur des échantillons de sols conservés.

D'autres projets se sont aussi greffés à l'EESSAQ :

- Une analyse exploratoire du microbiome a été réalisée pour évaluer les liens entre les pratiques agricoles, les fonctionnalités et la diversité des espèces microbiennes identifiées, et donc la santé biologique des sols (Hogue et al., 2022).
- Au moment de la caractérisation des profils de sol, [les caractéristiques pédomorphologiques](#) ainsi que des images de sols révélant le niveau d'agrégation des sols ont été relevées permettant d'évaluer la qualité de la structure des profils de sols au champ à partir d'une interprétation visuelle et tactile ou à partir de l'analyse d'images par intelligence artificielle. Des travaux sont aussi en cours pour intégrer ces deux techniques dans une application mobile.
- De 2020 à 2022, des [essais sur la réponse du maïs et des prairies](#) de graminées à l'apport d'azote ont été réalisés sur certaines sites de l'EESSAQ (118 sites-années), dans le but d'identifier les paramètres du sol et du climat qui influencent la réponse des cultures aux engrais et d'intéresser les producteurs à mettre en place de tels essais pour évaluer la santé de leurs sols.

La réalisation de cette Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec aura donc permis d'amasser et de mettre à jour une importante somme de connaissances sur les sols, dont plusieurs résultats pratiques restent à transférer auprès de la communauté agricole.

TABLE DES MATIERES

Faits saillants	i
Résumé	iii
Liste des tableaux	viii
Liste des figures	xiii
Contexte de l'étude	1
Objectifs.....	1
Présentation des résultats en cinq rapports	1
Revue de littérature.....	2
Définitions de la santé des sols	2
Les inventaires régionaux rapportant l'état des sols	2
Le cadre d'interprétation des inventaires de santé des sols.....	3
Les principaux états ou phénomènes de dégradation des sols.....	5
Les indicateurs de l'état physique des sols	6
Les indicateurs de santé biologique liés au carbone et à l'azote	10
Les indicateurs de la chimie-fertilité des sols.....	14
Matériel et Méthodes	19
Choix et présentation des séries de sols	19
Sélection des sites	19
Sites cultivés	20
Sites témoins	20
Chronologie de la sélection des sites	21
Caractérisation des profils de sol par les pédologues	21
Protocole de caractérisation et d'échantillonnage des sols.....	22
Conditions à respecter avant l'échantillonnage	22
Positionnement des points d'échantillonnage.....	22
Aspect de la surface.....	23
Profil de sols	23
Examen visuel du profil de sol.....	23
Conductivité hydraulique	24
Prélèvement des cylindres de sol	24
Prélèvement de sol pour la stabilité des agrégats	24
Prélèvement de sol pour la mesure du césium-137.....	24
Prélèvement de sol en vrac	24
Conservation et transport des échantillons	24

Équipes d'échantillonnage	25
Chronologie de l'échantillonnage des sites.....	26
Analyses de laboratoire	27
Indicateurs de l'état physique des sols	27
Indicateurs de santé biologique des sols liés au carbone et à l'azote.....	28
Indicateurs de la chimie-fertilité des sols.....	29
Cadre d'interprétation des indicateurs de santé des sols utilisés.....	29
Les indicateurs de l'état physique des sols	29
Les indicateurs de la santé biologique des sols liés au carbone et à l'azote.....	32
Les indicateurs de chimie-fertilité des sols	33
Traitements statistiques.....	36
État des sols cultivés par groupe de séries de sols.....	37
Sols argileux.....	37
Groupe 1 : Séries Sainte-Rosalie et Saint-Urbain	39
Groupe 2 : Séries Saint-Laurent, Kierkoski et Dalhousie	43
Groupe 3 : Séries Providence, Rideau, Chambly et Saint-Blaise	47
Groupe 10 : Séries de l'Anse, Kamouraska, La Pocatière et Saint-Pascal.....	51
Groupe 12 : Séries Hébertville et Normandin	55
Groupe 24 : Séries Guérin, Palmarolle et Roquemaure	59
Sols loameux.....	64
Groupe 4 : Séries Beaudette, Sainte-Barbe, Saint-Hyacinthe et Lévrard.....	66
Groupe 5 : Séries Chaloupe, Saint-Aimé, Des Saults et Le Bras	70
Groupe 13 : Séries Alma et Taillon	74
Groupe 23 : Séries Bouchette et Montcerf	78
Groupe 25 : Séries Baby et Duhamel.....	82
Sols sableux à squelettiques.....	86
Groupe 6 : Séries Aston et Saint-Damase.....	88
Groupe 7 : Séries Achigan, Joseph et Valère	92
Groupe 11 : Séries Saint-Nicolas, Saint-André et Orléans.....	96
Groupe 14 : Séries Saint-Jude et Uplands	100
Groupe 15 : Séries Beurivage et Morin	104
Groupe 19 : Séries Saint-Bruno et Danby.....	108
Sols issus de dépôts glaciaires.....	112
Groupe 8-A : Séries Boucherville et Bedford.....	114
Groupe 8-B : Séries Sainte-Brigide et Raimbault.....	118
Groupe 16 : Séries Mawcook, Norbertville, Woodbridge et Sainte-Marie	122

Groupe 17 : Séries Shefford et Blandford	126
Groupe 18 : Séries Leeds, Chapais et Charlevoix.....	130
Groupe 20 : Séries Magog, Calais et Dufferin.....	134
Groupe 21 : Séries Sherbrooke, Ascot et Greensboro	138
Groupe 22 : Séries Amqui, Quisibis et Comis	142
Sols organiques.....	146
Groupe 9 : Séries Nobel, Saint-Dominique et Verchères	146
Synthèse des phénomènes de dégradation observés.....	151
Condition physique des sols	151
Érosion des sols	158
Matière organique et potentiel de minéralisation.....	159
Acidité des sols	162
Saturation des sols en phosphore	163
Accumulations de cuivre et de zinc	164
Conclusion sur les phénomènes de dégradation observés	167
Faits saillants	168
Évolution des phénomènes de dégradation des sols depuis 1990	169
Comparaison des constats réalisés dans les deux études.....	169
Compaction	169
Détérioration de la structure.....	171
Acidification.....	171
Diminution de la matière organique	171
Comparaison sur des sites rééchantillonnés.....	172
Analyse statistique	172
Résultats	173
Conclusion sur l'évolution des phénomènes de dégradation	176
Faits saillants	177
Conclusion générale	178
Références	180
Annexe A.....	187

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 :	Effet de la masse volumique apparente sur la croissance racinaire en fonction de la texture du sol (NSRC, 2019).....	8
Tableau 2 :	Critères utilisés par Tabi et al. (1990) pour interpréter la teneur en matière organique du sol selon la texture.	12
Tableau 3 :	Critères utilisés dans les rapports pédologiques pour interpréter la teneur en matière organique du sol.	13
Tableau 4 :	Classes de réaction (pH eau) des sols minéraux et cinq classes retenues pour l'EESSAQ.	15
Tableau 5 :	Critères d'interprétation pour les éléments majeurs, les bases échangeables et la capacité d'échange cationique (CEC) extraits à la solution Mehlich-3.....	16
Tableau 6 :	Critères d'interprétation pour les oligoéléments extraits à la solution Mehlich-3.....	16
Tableau 7 :	Critères d'interprétation pour l'accumulation de quelques éléments traces métalliques extraits à la solution Mehlich-3.....	16
Tableau 8 :	Valeurs critiques environnementales des indices de saturation des sols en phosphore (CRAAQ, 2010).....	18
Tableau 9 :	Critères d'interprétation pour l'aluminium extrait à la solution Mehlich-3.	18
Tableau 10 :	Informations saisies lors de la description morphologique d'un profil de sol par les équipes pédologiques.	22
Tableau 11 :	Entreprises retenues pour l'échantillonnage des sols dans le cadre de l'EESSAQ.....	25
Tableau 12 :	Répartition du nombre de sites échantillonnés durant les saisons 2018, 2019 et 2022.	26
Tableau 13 :	Critères d'interprétation pour la réaction (pH eau), les éléments extraits à la solution Mehlich-3, les bases échangeables et la capacité d'échange cationique (CEC).	34
Tableau 14 :	Principaux indicateurs utilisés pour évaluer la santé des sols.	35
Tableau 15 :	Caractéristiques définissant les groupes de séries de sols argileux.....	38
Tableau 16 :	Caractéristiques des sols du groupe 1 (Sainte-Rosalie et Saint-Urbain).	39
Tableau 17 :	Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 1 (Sainte-Rosalie et Saint-Urbain).	40
Tableau 18 :	Bilans de masse des sols du groupe 1 (Sainte-Rosalie et Saint-Urbain).....	40
Tableau 19 :	Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 1 (Sainte-Rosalie et Saint-Urbain).	41
Tableau 20 :	Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 1 (Sainte-Rosalie et Saint-Urbain).	42
Tableau 21 :	Caractéristiques des sols du groupe 2 (Saint-Laurent, Kierkoski et Dalhousie).	43
Tableau 22 :	Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 2 (Saint-Laurent, Kierkoski et Dalhousie).	44
Tableau 23 :	Bilans de masse des sols du groupe 2 (Saint-Laurent, Kierkoski et Dalhousie).....	44
Tableau 24 :	Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 2 (St-Laurent, Kierkoski et Dalhousie).	45
Tableau 25 :	Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 2 (Saint-Laurent, Kierkoski et Dalhousie).	46
Tableau 26 :	Caractéristiques des sols du groupe 3 (Providence, Rideau, Chambly et Saint-Blaise).	47
Tableau 27 :	Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 3 (Providence, Rideau, Chambly et St-Blaise). .	48
Tableau 28 :	Bilans de masse des sols du groupe 3 (Providence, Rideau, Chambly et Saint-Blaise).	48

Tableau 29 :	Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 3 (Providence, Rideau, Chambly et Saint-Blaise).	49
Tableau 30 :	Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 3 (Providence, Rideau, Chambly et St-Blaise). .	50
Tableau 31 :	Caractéristiques des sols du groupe 10 (De l'Anse, Kamouraska, La Pocatière, Saint-Pascal).	51
Tableau 32 :	Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 10 (De l'Anse, Kamouraska, La Pocatière et Saint-Pascal).....	52
Tableau 33 :	Bilans de masse des sols du groupe 10 (L'Anse, Kamouraska, La Pocatière et Saint-Pascal).	52
Tableau 34 :	Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 10 (De l'Anse, Kamouraska, La Pocatière et Saint-Pascal).	53
Tableau 35 :	Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 10 (De l'Anse, Kamouraska, La Pocatière et Saint-Pascal).....	54
Tableau 36 :	Caractéristiques des sols du groupe 12 (Hébertville et Normandin).	55
Tableau 37 :	Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 12 (Hébertville et Normandin).	56
Tableau 38 :	Bilans de masse des sols du groupe 12 (Hébertville et Normandin).....	56
Tableau 39 :	Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 12 (Hébertville et Normandin).	57
Tableau 40 :	Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 12 (Hébertville et Normandin).	58
Tableau 41 :	Caractéristiques des sols du groupe 24 (Guérin, Palmarolle et Roquemaure).	59
Tableau 42 :	Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 24 (Guérin, Palmarolle et Roquemaure).	60
Tableau 43 :	Bilans de masse des sols du groupe 24 (Guérin, Palmarolle et Roquemaure).....	61
Tableau 44 :	Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 24 (Guérin, Palmarolle, Roquemaure).61	
Tableau 45 :	Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 24 (Guérin, Palmarolle et Roquemaure).	62
Tableau 46 :	Caractéristiques définissant les groupes de séries de sols loameux.....	65
Tableau 47 :	Caractéristiques des sols du groupe 4 (Beaudette, Sainte-Barbe, Saint-Hyacinthe et Lévrard).....	66
Tableau 48 :	Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 4 (Beaudette, Sainte-Barbe, Saint-Hyacinthe et Lévrard).	67
Tableau 49 :	Bilans de masse des sols du groupe 4 (Beaudette, Sainte-Barbe, Saint-Hyacinthe et Lévrard).	67
Tableau 50 :	Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 4 (Beaudette, Sainte-Barbe, Saint-Hyacinthe et Lévrard).....	68
Tableau 51 :	Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 4 (Beaudette, Sainte-Barbe, Saint-Hyacinthe et Lévrard).	69
Tableau 52 :	Caractéristiques des sols du groupe 5 (Chaloupe, Saint-Aimé, Des Saults et Le Bras).	70
Tableau 53 :	Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 5 (Chaloupe, St-Aimé, Des Saults et Le Bras). ..	71
Tableau 54 :	Bilans de masse des sols du groupe 5 (Chaloupe, Saint-Aimé, Des Saults et Le Bras).	71
Tableau 55 :	Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 5 (Chaloupe, St-Aimé, Des Saults et Le Bras).....	72
Tableau 56 :	Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 5 (Chaloupe, St-Aimé, Des Saults et Le Bras). ..	73
Tableau 57 :	Caractéristiques des sols du groupe 13 (Alma et Taillon).	74
Tableau 58 :	Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 13 (Alma et Taillon).	75

Tableau 59 :	Bilans de masse des sols du groupe 13 (Alma et Taillon).....	75
Tableau 60 :	Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 13 (Alma et Taillon).	76
Tableau 61 :	Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 13 (Alma et Taillon).	77
Tableau 62 :	Caractéristiques des sols du groupe 23 (Bouchette et Montcerf).	78
Tableau 63 :	Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 23 (Bouchette et Montcerf).	79
Tableau 64 :	Bilans de masse des sols du groupe 23 (Bouchette et Montcerf).....	79
Tableau 65 :	Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 23 (Bouchette et Montcerf).	80
Tableau 66 :	Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 23 (Bouchette et Montcerf).	81
Tableau 67 :	Caractéristiques des sols du groupe 25 (Baby et Duhamel).....	82
Tableau 68 :	Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 25 (Baby et Duhamel).....	83
Tableau 69 :	Bilans de masse des sols du groupe 25 (Baby et Duhamel).	83
Tableau 70 :	Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 25 (Baby et Duhamel).....	84
Tableau 71 :	Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 25 (Baby et Duhamel).....	85
Tableau 72 :	Caractéristiques définissant les groupes de séries de sols sableux à squelettiques.....	87
Tableau 73 :	Caractéristiques des sols du groupe 6 (Aston et Saint-Damase).....	88
Tableau 74 :	Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 6 (Aston et Saint-Damase).....	89
Tableau 75 :	Bilans de masse des sols du groupe 6 (Aston et Saint-Damase).	89
Tableau 76 :	Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 6 (Aston et Saint-Damase).....	90
Tableau 77 :	Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 6 (Aston et Saint-Damase).....	91
Tableau 78 :	Caractéristiques des sols du groupe 7 (Achigan, Joseph et Valère).	92
Tableau 79 :	Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 7 (Achigan, Joseph et Valère).	93
Tableau 80 :	Bilans de masse des sols du groupe 7 (Achigan, Joseph et Valère).	93
Tableau 81 :	Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 7 (Achigan, Joseph et Valère).....	94
Tableau 82 :	Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 7 (Achigan, Joseph et Valère).	95
Tableau 83 :	Caractéristiques des sols du groupe 11 (Saint-Nicolas, Saint-André et Orléans).....	96
Tableau 84 :	Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 11 (Saint-Nicolas, Saint-André et Orléans).	97
Tableau 85 :	Bilans de masse des sols du groupe 11 (Saint-Nicolas, Saint-André et Orléans).	97
Tableau 86 :	Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 11 (Saint-Nicolas, Saint-André et Orléans). 98	
Tableau 87 :	Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 11 (Saint-Nicolas, Saint-André et Orléans).	99
Tableau 88 :	Caractéristiques des sols du groupe 14 (Saint-Jude et Uplands).	100
Tableau 89 :	Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 14 (Saint-Jude et Uplands).	101
Tableau 90 :	Bilans de masse des sols du groupe 14 (Saint-Jude et Uplands).....	101
Tableau 91 :	Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 14 (Saint-Jude et Uplands).	102
Tableau 92 :	Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 14 (Saint-Jude et Uplands).	103
Tableau 93 :	Caractéristiques des sols du groupe 15 (Beaurivage et Morin).	104
Tableau 94 :	Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 15 (Beaurivage et Morin).....	105

Tableau 95 : Bilans de masse des sols du groupe 15 (Beaurivage et Morin).....	105
Tableau 96 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 15 (Beaurivage et Morin).	106
Tableau 97 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 15 (Beaurivage et Morin).....	107
Tableau 98 : Caractéristiques des sols du groupe 19 (Saint-Bruno et Danby).....	108
Tableau 99 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 19 (Saint-Bruno et Danby).	109
Tableau 100 : Bilans de masse des sols du groupe 19 (Saint-Bruno et Danby).	109
Tableau 101 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 19 (Saint-Bruno et Danby).....	110
Tableau 102 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 19 (Saint-Bruno et Danby).	111
Tableau 103 : Caractéristiques définissant les groupes de séries des tills.	113
Tableau 104 : Caractéristiques des sols du groupe 8-A (Boucherville et Bedford).....	114
Tableau 105 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 8-A (Boucherville et Bedford).....	115
Tableau 106 : Bilans de masse des sols du groupe 8-A (Boucherville et Bedford).	116
Tableau 107 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 8-A (Boucherville et Bedford).....	116
Tableau 108 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 8-A (Boucherville et Bedford).....	117
Tableau 109 : Caractéristiques des sols du groupe 8-B (Sainte-Brigide et Rimbault).....	118
Tableau 110 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 8-B (Sainte-Brigide et Rimbault).	119
Tableau 111 : Bilans de masse des sols du groupe 8-B (Sainte-Brigide et Rimbault).	119
Tableau 112 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 8-B (Sainte-Brigide et Rimbault).....	120
Tableau 113 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 8-B (Sainte-Brigide et Rimbault).	121
Tableau 114 : Caractéristiques des sols du groupe 16 (Mawcook, Norbertville, Woodbridge et Sainte-Marie).	122
Tableau 115 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 16 (Mawcook, Norbertville, Woodbridge et Sainte-Marie).	123
Tableau 116 : Bilans de masse des sols du groupe 16 (Mawcook, Norbertville, Woodbridge et Sainte-Marie)..	124
Tableau 117 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 16 (Mawcook, Norbertville, Woodbridge et Sainte-Marie).....	124
Tableau 118 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 16 (Mawcook, Norbertville, Woodbridge et Sainte-Marie).	125
Tableau 119 : Caractéristiques des sols du groupe 17 (Shefford et Blandford).	126
Tableau 120 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 17 (Shefford et Blandford).....	127
Tableau 121 : Bilans de masse des sols du groupe 17 (Shefford et Blandford).	127
Tableau 122 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 17 (Shefford et Blandford).	128
Tableau 123 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 17 (Shefford et Blandford).....	129
Tableau 124 : Caractéristiques des sols du groupe 18 (Leeds, Chapais, Charlevoix).....	130
Tableau 125 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 18 (Leeds, Chapais, Charlevoix).	131
Tableau 126 : Bilans de masse des sols du groupe 18 (Leeds, Chapais, Charlevoix).	131
Tableau 127 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 18 (Leeds, Chapais, Charlevoix).....	132
Tableau 128 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 18 (Leeds, Chapais, Charlevoix).	133

Tableau 129 : Caractéristiques des sols du groupe 20 (Magog, Calais et Dufferin).	134
Tableau 130 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 20 (Magog, Calais et Dufferin).....	135
Tableau 131 : Bilans de masse des sols du groupe 20 (Magog, Calais et Dufferin).	135
Tableau 132 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 20 (Magog, Calais et Dufferin).	136
Tableau 133 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 20 (Magog, Calais et Dufferin).....	137
Tableau 134 : Caractéristiques des sols du groupe 21 (Sherbrooke, Ascot et Greensboro).	138
Tableau 135 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 21 (Sherbrooke, Ascot et Greensboro).....	139
Tableau 136 : Bilans de masse des sols du groupe 21 (Sherbrooke, Ascot et Greensboro).....	139
Tableau 137 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 21 (Sherbrooke, Ascot, Greensboro).140	
Tableau 138 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 21 (Sherbrooke, Ascot et Greensboro).....	141
Tableau 139 : Caractéristiques des sols du groupe 22 (Amqui, Quisibis et Comis).	142
Tableau 140 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 22 (Amqui, Quisibis et Comis).	143
Tableau 141 : Bilans de masse des sols du groupe 22 (Amqui, Quisibis et Comis).....	143
Tableau 142 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 22 (Amqui, Quisibis et Comis).	144
Tableau 143 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 22 (Amqui, Quisibis et Comis).	145
Tableau 144 : Caractéristiques définissant le groupe 9 de séries de sols organiques.....	147
Tableau 145 : Caractéristiques des sols du groupe 9 (Nobel, Saint-Dominique et Verchères).	147
Tableau 146 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 9 (Nobel, Saint-Dominique et Verchères).	148
Tableau 147 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 9 (Nobel, St-Dominique, Verchères). 149	
Tableau 148 : Propriétés de chimie-fertilité des sols du groupe 9 (Nobel, Saint-Dominique, Verchères).....	150
Tableau 149 : Évolution des phénomènes de dégradation observés par groupe de séries de sol.....	170
Tableau 150 : Évolution des indicateurs physiques et de chimie-fertilité des sols obtenue entre 2020 et 1990 dans l'horizon Ap (0-20 cm) et B (20-40 cm).	173
Tableau 151 : Principales caractéristiques ayant servi à sélectionner les séries de sols et former des groupes de séries de sols apparentés.	187

LISTE DES FIGURES

Figure 1 :	Exemple de courbes de réponse agronomiques (a), environnementales (b) et courbe finale (c) au P Olsen pour des sols sous pâturage. La courbe avec les points noirs représente la moyenne et les deux autres courbes représente un écart type du jugement des experts.....	4
Figure 2 :	Évolution conceptuelle de la qualité des sols indiquant la dégradation, le maintien et l’amélioration du sol (a). Les trois étapes du Soil Management Assessment Framework (SMAF) décrit par Wienhold et al. (2004) (b).....	4
Figure 3 :	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).....	5
Figure 4 :	Fonctions écosystémiques de la matière organique et les processus impliqués (figure adaptée de Hoffland et al., 2020).....	11
Figure 5 :	Situation géographique des sites échantillonnés dans les sols issus de matériaux argileux et leurs régions pédologiques.	37
Figure 6 :	Répartition géographique des sols du groupe 1 (Sainte-Rosalie et Saint-Urbain).....	39
Figure 7 :	Répartition géographique des sols du groupe 2 (Saint-Laurent, Kierkoski et Dalhousie).....	43
Figure 8 :	Répartition géographique des sols du groupe 3 (Providence, Rideau, Chambly et Saint-Blaise)... ..	47
Figure 9 :	Répartition géographique des sols du groupe 10 (De l’Anse, Kamouraska, La Pocatière et Saint-Pascal).....	51
Figure 10 :	Répartition géographique des sols du groupe 12 (Hébertville et Normandin).....	55
Figure 11 :	Répartition géographique des sols du groupe 24 (Guérin, Palmarolle et Roquemaure) – secteur Nord.....	59
Figure 12 :	Répartition géographique des sols du groupe 24 (Guérin, Palmarolle et Roquemaure) –Sud.....	60
Figure 13 :	Situation géographique des sites échantillonnés dans les sols issus de matériaux loameux et leurs régions pédologiques.	64
Figure 14 :	Répartition géographique des sols du groupe 4 (Beaudette, Sainte-Barbe, Saint-Hyacinthe et Lévrard).	66
Figure 15 :	Répartition géographique des sols du groupe 5 (Chaloupe, Saint-Aimé, Des Saults et Le Bras).	70
Figure 16 :	Répartition géographique des sols du groupe 13 (Alma et Taillon).....	74
Figure 17 :	Répartition géographique des sols du groupe 23 (Bouchette et Montcerf).....	78
Figure 18 :	Répartition géographique des sols du groupe 25 (Baby et Duhamel).	82
Figure 19 :	Situation géographique des sites échantillonnés dans les sols issus de matériaux sableux à squelettiques et leurs régions pédologiques.	86
Figure 20 :	Répartition géographique des sols du groupe 6 (Aston et Saint-Damase).	88
Figure 21 :	Répartition géographique des sols du groupe 7 (Achigan, Joseph et Valère).....	92
Figure 22 :	Répartition géographique des sols du groupe 11 (Saint-Nicolas, Saint-André et Orléans).	96
Figure 23 :	Répartition géographique des sols du groupe 14 (Saint-Jude et Uplands).....	100
Figure 24 :	Répartition géographique des sols du groupe 15 (Beaurivage et Morin).....	104
Figure 25 :	Répartition géographique des sols du groupe 19 (Saint-Bruno et Danby).	108

Figure 26 :	Position des sites échantillonnés dans les tills et leurs régions pédologiques.	112
Figure 27 :	Répartition géographique des sols du groupe 8-A (Boucherville et Bedford).	114
Figure 28 :	Répartition géographique des sols du groupe 16 (Mawcook, Norbertville, Woodbridge et Sainte-Marie).	122
Figure 29 :	Répartition géographique des sols du groupe 17 (Shefford et Blandford).	126
Figure 30 :	Répartition géographique des sols du groupe 18 (Leeds, Chapais, Charlevoix).	130
Figure 31 :	Répartition géographique des sols du groupe 20 (Magog, Calais et Dufferin).	134
Figure 32 :	Répartition géographique des sols du groupe 21 (Sherbrooke, Ascot et Greensboro).	138
Figure 33 :	Répartition géographique des sols du groupe 22 (Amqui, Quisibis et Comis).	142
Figure 34 :	Situation géographique des sites (sols organiques).	146
Figure 35 :	Comparaison de la masse volumique apparente entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.	151
Figure 36 :	Comparaison de la porosité totale entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.	152
Figure 37 :	Comparaison de la macroporosité entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.	153
Figure 38 :	Comparaison de la capacité au champ relative (<i>WFPS</i>) entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.	154
Figure 39 :	Comparaison de la diffusivité relative des gaz D/D_0 entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.	155
Figure 40 :	Comparaison de la conductivité hydraulique saturée entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.	156
Figure 41 :	Comparaison du diamètre moyen pondéré des agrégats (DMP) et des pourcentages d'agrégats stables (de 1 à 8 mm) entre sols cultivés et témoins dans l'horizon Ap1 de 25 groupes de séries de sols minéraux.	157
Figure 42 :	Comparaison du mouvement de sol (érosion) entre profils de sols cultivés et témoins de 25 groupes de séries de sols minéraux.	158
Figure 43 :	Comparaison de la teneur en matière organique (M.O.) entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.	159
Figure 44 :	Comparaison de l'azote minéralisable entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.	160
Figure 45 :	Comparaison du CO_2 dégagé entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.	161
Figure 46 :	Comparaisons des valeurs de pH eau entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.	162
Figure 47 :	Comparaison de l'indice de saturation en phosphore (ISP) entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.	163
Figure 48 :	Comparaisons des teneurs en P Mehlich-3 entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.	164

Figure 49 :	Comparaisons des teneurs en Cu Mehlich-3 entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.....	165
Figure 50 :	Comparaisons des teneurs en Zn Mehlich-3 entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.....	166
Figure 51 :	Évolution des indicateurs de santé des sols dans l'horizon Ap.....	174
Figure 52:	Évolution des indicateurs de santé des sols dans l'horizon B.	175

CONTEXTE DE L'ÉTUDE

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

Objectifs

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

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

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

Présentation des résultats en cinq rapports

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

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

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

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

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

REVUE DE LITTÉRATURE

Définitions de la santé des sols

Avant l'avènement du terme santé des sols, la qualité du sol était définie comme étant la capacité du sol à soutenir la croissance de cultures sans se dégrader ou nuire autrement à l'environnement (Doran et Parkin, 1994). Toutefois, selon les fonctionnalités du sol recherchées, par exemple, la production d'aliments de qualité, la santé humaine ou les aspects environnementaux, Karlen et al. (2003) ont conclu qu'il n'y a pas de définition universelle de la qualité de sols englobant l'ensemble de ces fonctionnalités. Pour englober celles-ci, Doran et Safley (1997) dans Pankhurst et al. (1997) proposent l'idée que le «sol» est une ressource dynamique et vivante dont la condition est vitale autant pour la production alimentaire et de fibres que pour l'équilibre global de la planète et la fonctionnalité des écosystèmes. Ainsi, la qualité et la santé des sols déterminent la durabilité des systèmes agricoles et la qualité de l'environnement et en conséquence la santé des plantes, des animaux et des humains.

Certains ont utilisés indifféremment les expressions santé des sols et qualité des sols (Acton et Gregorich, 1995). Pour d'autres, la qualité des sols met l'accent sur les caractéristiques quantitatives chimiques et physiques (Doran et al. 1996), alors que la santé des sols met l'emphase sur la nature dynamique et vivante du sol, englobant les attributs biologiques comme la biodiversité, la chaîne alimentaire et le fonctionnement des écosystèmes (Doran et Safley (1997) dans Pankhurst et al. 1997).

La FAO définit la santé des sols comme étant la capacité continue du sol à fonctionner comme un système vivant vital, dans les limites des écosystèmes et de l'utilisation des terres, pour soutenir la productivité biologique, promouvoir la qualité de l'air et de l'eau et maintenir la santé végétale, animale et humaine (FAO, 2015).

Les inventaires régionaux rapportant l'état des sols

Dans le cadre d'inventaires régionaux, la sélection des indicateurs de qualité ou de santé des sols devrait à la fois refléter l'état de santé du sol, les phénomènes de dégradation et les menaces à leur existence. Par exemple, la stratégie thématique européenne en faveur de la protection des sols liste l'imperméabilisation anthropique, l'érosion, le déclin du carbone organique, la compaction, la salinisation, la contamination, la baisse de biodiversité, l'acidification et les glissements de terrain comme principales menaces aux sols (Stotle et al., 2015; Beek et Tóth, 2012). Dans des analyses de cycle de vie sur la qualité des sols, Garrigues et al. (2012) établissent que ces modèles devraient incorporer ce qu'ils considèrent comme les principales menaces aux sols et leurs fonctions, soit l'érosion, le déclin de la matière organique, la baisse de biodiversité, la contamination, l'imperméabilisation, la compaction et la salinisation.

En France, Lemerrier et Walter (2011) ont évalué l'état des sols et leur dégradation par la mesure de différents indicateurs fonctionnels reflétant la chimie-fertilité, les teneurs en carbone et matière organique, la biodiversité, le stockage de carbone, la perte en sol, le degré de contamination en divers éléments indésirables et la compaction.

Dans l'Inventaire des problèmes de dégradation des champs du Québec de 1990, huit problèmes de dégradation des sols ont été ciblés et évalués soit: la dégradation de la structure, la perte de matière organique, la compaction, la surfertilisation, l'érosion éolienne et hydrique des sols, l'acidification et la pollution par les métaux (Tabi et al., 1990). Ces problèmes de dégradation ont été établis à partir de sols échantillonnés et des paramètres suivants analysés au laboratoire : masse volumique apparente, porosité totale, macroporosité, stabilité des agrégats,

teneur en matière organique, pH, teneurs en P, K, Ca, Mg, Al, Cu, Fe, Mn, Zn et en métaux contaminants (Co, Cr, Pb). La conductivité hydraulique a été mesurée au champ et l'érosion des sols estimée par modélisation (Tabi et al., 1990). L'analyse a été réalisée par série de sols et parfois même par phase de série de sols dans plus de 1000 champs échantillonnés. Les sols sous prairie ont été utilisés comme sols témoins pour définir l'état des sols cultivés à l'époque en monoculture de maïs, de céréales ou de pommes de terre, bien que certains indicateurs comme la masse volumique apparente ou la teneur en phosphore assimilable des sols par exemple, ne soient pas nécessairement à leur optimum sous la prairie (Newell-Price et al. 2013). Kruse (2007) retient de la littérature que les sols des prairies sont tout de même de meilleurs sols de référence que les sols forestiers. Pour certains indicateurs de l'Inventaire de 1990, le comportement de l'indicateur dans les horizons inférieurs a été comparé à celui des sols témoins pour révéler l'état du sol. Par exemple, une baisse du pH à l'eau notée sur deux couches successives de sol, dont l'une était significativement différente par rapport au sol témoin, a été considéré comme un indice d'acidification.

Le cadre d'interprétation des inventaires de santé des sols

Au début des années 2000, un inventaire de qualité des sols similaire à l'ampleur de celui de Tabi et al. (1990) a été réalisé en Nouvelle-Zélande en comparant une dizaine d'usages de sol, variant de sols forestiers à sols urbains en passant par une diversité d'usage agricole, répartis dans une quinzaine d'ordres de sols (Sparling et al., 2004; Sparling et Chippers, 2004). Malgré le nombre important de sites échantillonnés (> 500), l'étude démontre la difficulté de répartir uniformément l'échantillonnage en fonction des onze types d'occupation de sol et des treize ordres de sols catégorisés (Sparling et al., 2004). Nunes et al. (2020) ont aussi souligné la grande diversité des systèmes de cultures qui ne sont pas systématiquement distribués à travers les conditions pédoclimatiques des États-Unis et de l'effet de ces conditions pédoclimatiques sur les niveaux de référence à cibler pour des teneurs en carbone dans les sols.

Le cadre d'interprétation de l'étude en Nouvelle-Zélande est décrit dans Liburne et al. (2004). En bref, des courbes de réponses considérant des aspects agronomiques et environnementaux pour chaque propriété ont servi à évaluer l'état des sols pour chaque combinaison d'usage et d'ordre de sol. Un panel d'expert a utilisé des données statistiques issues d'une base de données nationale en sol pour définir les niveaux de matière organique ciblés et des considérations agronomiques et environnementales pour définir les cibles des autres propriétés physiques et de chimie/fertilité des sols. Le niveau d'incertitude est plus élevé dans les extrémités des courbes de réponse, soit au début de la courbe où les faibles teneurs en éléments fertilisants limitent la productivité des cultures et donc la réponse agronomique aux engrais, ainsi qu'au début et à la fin de la courbe où des aspects environnementaux sont en jeu, soit en situation de limitation de la productivité des cultures et de valorisation des intrants ou d'excès d'éléments fertilisants conduisant à des pertes vers l'environnement. Il importe donc au panel d'experts de prêter une attention particulière à ces extrémités de la courbe (Figure 1).

Le Soil Management Assessment Framework (SMAF; Andrews et al., 2004) est un outil qui a été développé pour évaluer comment l'usage des sols et les pratiques agricoles affectent la qualité et le fonctionnement des sols. Selon la revue de Wienhold et al. (2004), la conduite d'un inventaire ou d'une étude sur la qualité de sols comme le SMAF implique un suivi dynamique (Figure 2a) en 3 étapes (Figure 2b). La première consiste à identifier les indicateurs de sols qui vont composer la base de données minimale (minimum dataset) pour évaluer l'état des sols. Ces indicateurs devraient inclure des indicateurs physiques, chimiques et biologiques qui influencent des fonctions importantes du sol permettant d'atteindre certains objectifs en lien avec l'usage des sols et leurs services écosystémiques.

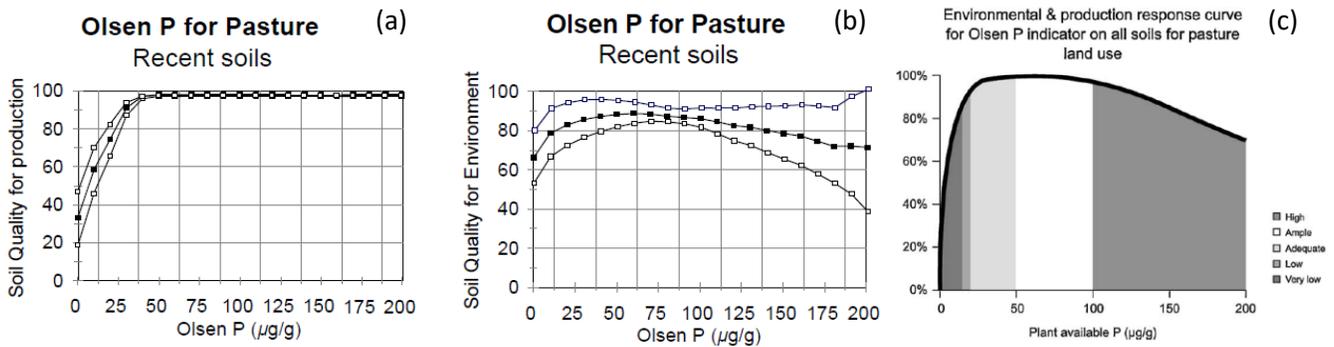


Figure 1 : Exemple de courbes de réponse agronomiques (a), environnementales (b) et courbe finale (c) au P Olsen pour des sols sous pâturage. La courbe avec les points noirs représente la moyenne et les deux autres courbes représente un écart type du jugement des experts.

Le SMAF visait trois objectifs d'usage des sols (productivité, recyclage des matières résiduelles et protection de l'environnement) en lien avec six fonctions de sols (recyclage des nutriments, équilibres hydriques, support et stabilité physique, capacité de tampon et filtration, résistance et résilience, biodiversité et habitat) au moment de l'établissement des règles de décisions dans la base de données. La deuxième étape consiste à interpréter les indicateurs mesurés à l'aide de courbes de réponse (scoring functions) spécifiques et la 3^e intègre les différents scores des indicateurs dans un indice global. Cette dernière étape est considérée moins importante et son but est de donner une simple valeur métrique générale de l'état de santé des sols (Andrews et al., 2004).

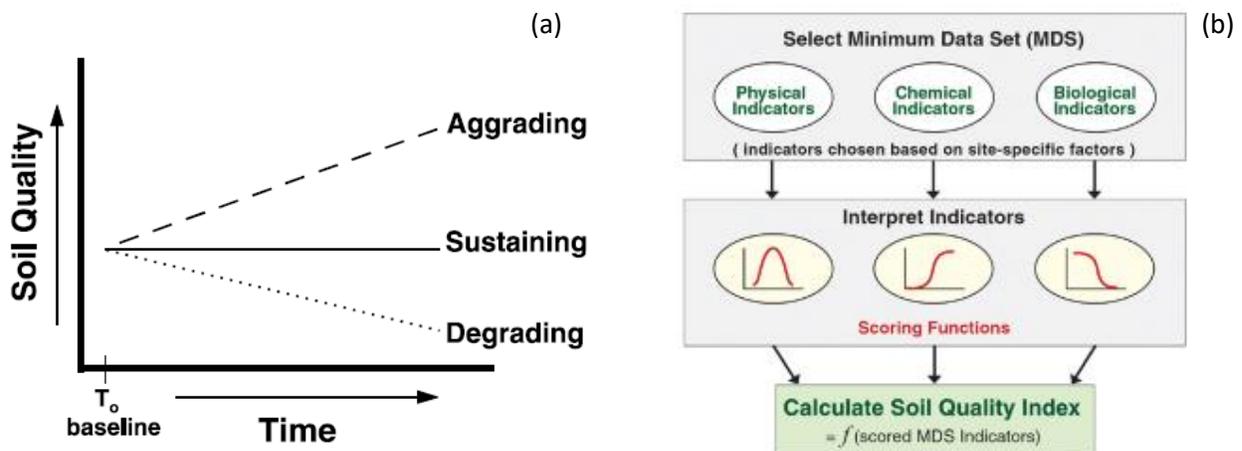


Figure 2 : Évolution conceptuelle de la qualité des sols indiquant la dégradation, le maintien et l'amélioration du sol (a). Les trois étapes du Soil Management Assessment Framework (SMAF) décrit par Wienhold et al. (2004) (b).

La définition et le développement de courbes de réponses (scoring functions) est de loin l'opération la plus influente sur la sensibilité de l'approche utilisée. Les différentes échelles de valeurs projetées pour chaque indicateur devraient considérer les conditions environnementales locales (e.g., précipitation, température, etc.), les usages de sols visés, et les propriétés inhérentes ou stables des sols (Andrews et al., 2004). En utilisant les connaissances sur les relations entre les indicateurs et les fonctionnalités désirées des sols, les courbes de réponses sont développées pour traduire les valeurs des indicateurs mesurés en score sans unité. Cette étape est

la plus utile pour comparer des scores entre traitements, régies ou usages du sol ou au cours du temps pour voir s'il a évolué en termes de fonctionnalité.

Le Comprehensive Assessment of Soil Health (CASH) a été développé sur la base du SMAF par l'Université de Cornell et est utilisé par les producteurs et les laboratoires privés pour établir l'état de santé des sols agricoles dans le nord-est de l'Amérique. Le CASH mesure 15 indicateurs physiques, biologiques et chimiques en utilisant une distribution statistique des observations cumulées dans quatre grandes régions s'étendant du nord-est au Midwest des États-Unis (Fine et al., 2017; Moebius-Clune et al., 2016). Le programme utilise à cet effet une distribution normale cumulée des données, ainsi que la moyenne et l'écart type pour graduer cinq classes selon trois systèmes de classement. Le système de classement A (Plus c'est mieux) s'applique pour la stabilité des agrégats, la capacité de rétention en eau, le carbone actif, la teneur en matière organique, la respiration du sol et l'azote potentiellement minéralisable. Le système de classement B (Moins c'est mieux) est employé dans le cas de certains éléments comme le manganèse et le fer ainsi que de la masse volumique apparente. Finalement, le classement C (Optimum) est employé avec le phosphore et le pH.

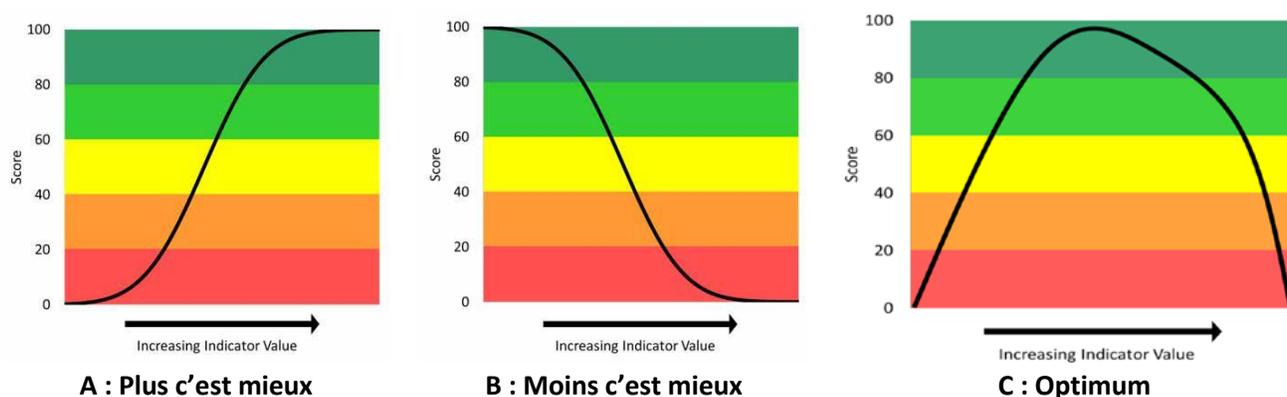


Figure 3 : Système d'interprétation des indicateurs de santé des sols utilisés dans le programme Comprehensive Assessment of Soil Health de Cornell (adapté de Moebius-Clune et al., 2016).

De ces inventaires nationaux et des systèmes utilisés pour évaluer la santé des sols, il faut retenir que la population de sols à échantillonner est très large variant en termes de nature et d'occupation et que les systèmes d'interprétation utilisés pour évaluer l'état de santé des sols sont autant diversifiés en termes de paramètres que d'échelles de comparaison.

Les principaux états ou phénomènes de dégradation des sols

Les principaux états du sol ou phénomènes de dégradation des sols agricoles sont plus souvent qualifiés avec des indicateurs regroupés en trois composantes décrivant soit l'état physique, la chimie-fertilité ou les processus liés à l'activité biologique ou la biochimie-minéralisation de la matière organique (Fine et al., 2017; Kruse, 2007). L'imperméabilisation des sols liés à l'activité humaine, la contamination des sols, et les glissements de terrain sont aussi des menaces pour les sols qui ne seront pas évaluées dans la présente étude (Stolte et al., 2015; Beek et Tóth, 2012).

Certains indicateurs peuvent affecter plusieurs de ces composantes en même temps. Par exemple, la teneur en C organique ou la matière organique du sol affecte autant l'état physique, la chimie-fertilité et les processus liés à l'activité biologique du sol (Hoffland et al., 2020). Elle est d'ailleurs depuis longtemps reconnue comme l'indicateur unique le plus significatif pour décrire l'état de santé des sols et les diverses fonctionnalités qu'elle occupe dans le sol (Nunes et al., 2020). La section suivante fait état des principaux états du sol ou phénomènes de dégradation définissant la santé des sols ainsi que des indicateurs utilisés pour les qualifier.

Les indicateurs de l'état physique des sols

L'état physique des sols est évalué avec des indicateurs révélant l'état de la structure, les degrés de compaction et d'aération du sol, la perméabilité ou la circulation de l'eau dans le sol, la capacité de rétention de l'eau dans le sol ainsi que son niveau d'érosion.

État de la structure

La structure du sol est un facteur clé dans le fonctionnement d'un sol et dans sa capacité à soutenir la vie animale et végétale. Elle influence, entre autres, la capacité de rétention et le mouvement de l'eau du sol, l'érosion, le recyclage des nutriments, la distribution des racines dans le sol ainsi que le rendement des cultures (Bronick et Lal, 2004). La structure résulte de l'agrégation de particules élémentaires du sol en un assemblage de dimension plus grande et de formes différentes. Les particules sont liées entre elles principalement par des substances organiques de différentes origines (exsudats racinaires, polysaccharides microbiens, substances dégradées et polycondensées, protéines de type glomaline, etc.) qui agissent comme agents de liaison et noyaux dans la formation des agrégats à différentes échelles (Bronick et Lal, 2004; Tisdall et Oades, 1982; Holatko et al., 2021). La structure se désagrège principalement sous les effets mécaniques de cisaillement et de compression causés par les instruments aratoires, et de l'appauvrissement du sol en matière organique et de l'activité biologique. La dégradation de la structure favorise la compaction du sol, augmente les risques d'érosion et de pollution causée par les pertes de nutriments et de pesticides, et entraîne des baisses de rendement par la réduction de la disponibilité de l'air, de l'eau et des éléments nutritifs (Bronick et Lal, 2004).

La mesure de la stabilité des agrégats est généralement utilisée pour décrire la structure du sol. Cet indicateur se mesure de différentes manières sur des agrégats séchés à l'air ou humides et avec des méthodes impliquant un seul tamis ou des tamis de différentes grosseurs (Angers et al., 2007; Gyawali et Stewart, 2019). La première méthode évalue généralement la stabilité des agrégats de diamètres supérieurs à 0,25 mm. En effet, les macro-agrégats (> 0,25 mm) constituent un bon indicateur de la qualité structurale du sol en raison de leur plus grande sensibilité aux effets du travail du sol et de la gestion de la matière organique (Gyawali et Stewart, 2019). La deuxième méthode, qui a été retenue dans le cadre de l'étude, consiste à mesurer la stabilité des agrégats avec la méthode multi-tamis après barattage dans l'eau d'un sol humide préalablement tamisé à 8 mm (Angers et al., 2007). La proportion d'agrégats supérieurs à 4 mm et le diamètre moyen des agrégats stables (DMP) sont les deux mesures sur lesquelles est basée l'interprétation de l'état structural du sol cultivé par rapport au sol témoin. L'idée centrale derrière le choix de ces deux indicateurs est que l'obtention d'agrégats plus gros après barattage dans l'eau implique une plus grande stabilité structurale (Nimmo et Perkins, 2002). À l'inverse, un DMP réduit indique que le sol a été soumis à des phénomènes de dégradation. La stabilité des agrégats est aussi fortement influencée par le type de sol. Les agrégats étant beaucoup moins importants dans les sols sableux par rapport aux sols argileux par exemple, il importe donc de réaliser des comparaisons entre sols similaires.

Degré de compaction

La compaction est définie comme étant un processus qui réarrange les particules de sol en les rapprochant et en réduisant les espaces vides; ce qui se traduit par une augmentation de la masse volumique apparente du sol (Soil Science Society of America, 1996). Cette réorganisation des particules se fait principalement sous l'effet des forces de compression exercées par le passage de la machinerie, du travail intensif du sol et des pratiques agricoles qui réduisent les apports en matière organique au sol et détruisent la structure (Hamza et Anderson, 2005; Batey, 2009). Les roues de tracteurs, de remorques et des moissonneuses-batteuses peuvent générer de la compaction en profondeur lorsque les charges excèdent 3500 kg à la roue, tandis que d'autres opérations peuvent exercer des forces de compression en profondeur comme c'est le cas pour la semelle de labour à l'interface de la couche cultivée (Håkansson et Reeder, 1994; Schjønning et al., 2012). La compaction se manifeste aussi bien dans la couche cultivée que dans le sous-sol. Outre la charge mécanique, les caractéristiques intrinsèques du sol et son niveau d'humidité, ainsi que le type de culture et ses pratiques culturales associées sont d'autres facteurs qui peuvent influencer le degré de compaction d'un sol (Hamza et Anderson, 2005).

Les sols n'ont pas tous la même susceptibilité à la compaction. Par exemple, les sols de texture fine et pauvres en matière organique, surtout lorsqu'ils sont travaillés dans des conditions trop humides, sont plus vulnérables (Hamza et Anderson, 2005). En effet, l'augmentation de l'humidité du sol s'accompagne d'une réduction des macropores, augmentant ainsi la plasticité du sol et sa susceptibilité à la compaction (Lipiec et al., 2002). À l'inverse, une teneur plus élevée en matière organique confère une meilleure stabilité structurale au sol et le rend moins vulnérable à la compaction (Batey, 2009). De plus, les résidus organiques présents dans la couche de surface agissent comme une éponge en préservant la forme et la structure des agrégats après avoir été comprimés au passage des machines agricoles.

La compaction affecte négativement presque toutes les propriétés et fonctions du sol, que celles-ci soient physiques, chimiques ou biologiques. Entre autres, elle modifie la structure du sol en broyant les agrégats ou en les combinant en unités plus grandes, augmente la densité apparente et diminue la macroporosité du sol (Needham et al., 2004; Delgado et al., 2007). Ces changements entraînent une diminution de la perméabilité à l'eau et à l'air du sol (Douglas et al., 1998; Mooney et Nipattasuk, 2003) ainsi qu'une augmentation du risque de ruissellement et d'érosion (Schack-Kirchner et al., 2007). Il en résulte une baisse de rendement des cultures attribuable à une diminution du nombre de racines profondes et bien développées, à une réduction de l'absorption des nutriments (Batey et Mackenzie, 2006) ou à la formation de zones gorgées d'eau ou anoxiques (Stalham et al., 2005).

La masse volumique apparente (MVA), la porosité totale et la résistance à l'enfoncement d'un cône sont des mesures plus couramment utilisées pour qualifier la compaction des sols (Fine et al., 2017; Kruse, 2007; Congreves et al., 2017; Marshall et al., 2021). Le Département de l'agriculture des États-Unis a publié des valeurs de références de MVA en fonction de la texture pour lesquelles la croissance racinaire peut être limitée ou stoppée (Tableau 1) (NSRC, 2019).

Aération du sol et diffusion des gaz

Un sol ayant moins de 10 % de volume ou de porosité d'air est généralement reconnu compact car la diffusion des gaz et les échanges d'air sont limités (Zou et al., 2001; Benjamin et Karlen, 2014). Grable et Siemer (1968) ont démontré que la croissance racinaire était complètement inhibée à 10 % de porosité d'air alors qu'à 20 % elle ne l'était aucunement. La porosité d'air varie dans le sol en fonction de sa porosité totale et de sa teneur en eau. La macroporosité définie par le volume d'air occupé par les pores plus larges entre les agrégats de sols représente

une bonne approximation de la quantité d'air disponible aux plantes pour les échanges gazeux. Cette macroporosité est plus couramment mesurée à des tensions variant de 1 à 10 kPa pour estimer les volumes d'air présents dans des pores supérieurs à 300 et 30 µm de largeur respectivement (Vizioli et al., 2021; Curran Cournane et al., 2013; Reynolds et al., 2009). Les pores entre 30 et 75 µm sont considérés comme des mésopores tandis que ceux supérieurs à 75 µm sont des macropores (SSSA, 1986).

Tableau 1 : Effet de la masse volumique apparente sur la croissance racinaire en fonction de la texture du sol (NSRC, 2019).

Texture du sol	MVA idéale (g/cm ³)	MVA limitant la croissance racinaire (g/cm ³)	MVA restreignant la croissance racinaire (g/cm ³)
Sable, loam sableux	< 1,60	1,69	> 1,80
Sable loameux et loam	< 1,40	1,63	> 1,80
Loam sablo-argileux, loam argileux	< 1,40	1,60	> 1,75
Limon, loam limoneux	< 1,40	1,60	> 1,75
Loam limoneux, loam limono-argileux	< 1,40	1,55	> 1,65
Argile sableuse, argile limoneuse, loam argileux	< 1,10	1,49	> 1,58
Argile (> 45% argile)	< 1,10	1,39	> 1,47

La diffusivité des gaz dans le sol est souvent reliée à la macroporosité et la porosité totale, mais la grosseur, la connectivité et la tortuosité entre les pores est aussi en cause (Allaire et al., 2008). Plusieurs équations permettent d'estimer le coefficient de diffusivité des gaz à partir de la macroporosité et de la porosité totale (Allaire et al., 2008), permettant de qualifier des effets des systèmes de culture sur les sols (Vizioli et al., 2021).

Capacité de rétention en eau

La capacité au champ est la capacité de rétention maximale en eau du sol après ressuyage. Elle correspond plus précisément à la quantité d'eau retenue après 48 heures d'égouttement de l'eau libre vers la nappe phréatique, par un sol préalablement saturé en eau (par des pluies ou un arrosage intensif). La teneur en eau à capacité au champ permet entre autres, d'estimer avec la teneur en eau au point de flétrissement, la capacité du sol à retenir de l'eau utile aux plantes. Elle est souvent estimée au laboratoire à des tensions matricielles de 33 kPa (Soutter et al. 2007), mais elle est également estimée à des tensions matricielles de 10 kPa pour des fins d'estimation de la capacité relative du sol à retenir de l'eau par rapport à sa porosité totale (Vizioli et al., 2021; Reynolds et al., 2009). Selon Reynolds et al. (2009), lorsque la capacité au champ relative (*relative field capacity*) se situe dans un intervalle entre 0,60 et 0,70, les sols minéraux sous régime pluvial ont des teneurs en eau et en air idéales pour la minéralisation et la production microbienne de nitrate, par rapport à des sols qui présentent des ratios inférieurs ou supérieurs à cet intervalle. Cette capacité au champ relative est aussi appelée espace poral occupé par l'eau (*waterfilled pore space ou WFPS*) (Doran et al., 1990).

Circulation de l'eau dans le sol

L'amélioration de la qualité des sols passe souvent par le maintien ou l'augmentation de la capacité de l'eau à circuler dans le sol. Celle-ci intègre les effets combinés de la texture et la structure du sol, de la porosité et de la connectivité des pores ainsi que de la teneur en eau initiale du profil (Soutter et al., 2007; Gobat et al., 2010). Les pores sont généralement classés selon leur diamètre. Les micropores, de faible diamètre (< 0,2 à 10 µm), permettent le déplacement de l'eau principalement sous l'action de la force capillaire et sont responsables de la

rétenion en eau du sol (Duval et al., 1993; Gobat et al., 1998). Dans un sol non saturé, la circulation de l'eau à travers les micropores est très lente. Elle s'effectue des zones où l'eau est faiblement retenue par le sol vers celles où elle est retenue plus énergiquement. Les mésopores et les macropores de diamètre plus important ($> 10 \mu\text{m}$), permettent le déplacement rapide de l'eau sous l'action de la force gravitationnelle. La présence de pores de diamètre plus important ($> 200 \mu\text{m}$) est généralement corrélée à la conductivité hydraulique (Duval et al., 1993; Gobat et al., 1998). Les macropores favorisent l'aération du sol après ressuyage. Un sol loameux en condition idéale contient, en volume, 45% de particules minérales, 5% de matière organique, 25% d'eau et 25% d'air (AAC-MAPAQ, 1994).

Le semis direct réalisé sur une longue période peut réduire le volume de ruissellement de surface de l'ordre de 10 à 98% en augmentant la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol (Baker, 1987; Glenn et al., 1987; Edwards et al., 1988). Cette tendance peut être expliquée par une diminution de la battance du sol et une meilleure connectivité des macropores continus (USDA, 2015). Toutefois, l'augmentation de l'infiltration et de la conductivité hydraulique liées à la macroporosité peut aussi s'accompagner d'une augmentation des pertes de nitrates et de phosphore vers les drains souterrains. En effet, les risques de pollution (nitrates, produits phytosanitaires, etc.) augmentent avec la rapidité de circulation de l'eau. Les sols les plus à risque sont ceux qui présentent des écoulements préférentiels, qu'ils soient de texture sableuse ou argileuse, ceux comportant des fentes de retrait (Schwartz et al., 2005) ainsi que les champs en semis direct à long terme où les biopores sont plus nombreux (USDA, 2015). Un excès d'eau dans le sol peut aussi entraîner plusieurs types de dégradation. La stabilité structurale des sols argileux peut être réduite par gonflement des colloïdes et dispersion des particules argileuses. Les sols offrent alors moins de résistance à la compaction liée aux passages d'équipements agricoles. Le ruissellement de surface devient plus important et les particules de sol (principalement les sables fins et les limons) peuvent être entraînées par l'eau, surtout en l'absence de couverture du sol (Blanco et Lal, 2010).

La circulation de l'eau dans le sol s'évalue par des mesures d'infiltration à la surface du sol et de conductivité hydraulique en régime saturé ou non de diverses manières et à diverses profondeurs selon le diagnostic recherché (voir chap. 75 à chap. 84 dans Carter et Gregorich, 2007). La conductivité hydraulique est plus rarement utilisée comme indicateur de qualité ou de santé des sols dans les inventaires régionaux ou dans les trousseaux de santé des sols fournies aux producteurs comme le CASH (Fine et al., 2016). Certains pays d'Europe l'utilisent pour qualifier les risques de compaction des sols, l'Allemagne utilisant un seuil de 10 cm/j et la Finlande 24 cm/j pour qualifier ces risques de compaction (van Beek et Toth, 2012). La conductivité hydraulique saturée mesurée avec l'infiltromètre de Côté a permis de qualifier la circulation de l'eau dans les différents horizons de sols cultivés de l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols du Québec (Tabi et al., 1990).

Érosion hydrique

L'érosion hydrique des sols constitue un processus naturel qui contribue à former les paysages (érosion à l'échelle géologique). L'érosion devient un problème lorsque le taux d'enlèvement du sol excède de beaucoup sa capacité naturelle de régénération. On parle alors d'érosion anthropique ou accélérée. À l'échelle du champ, l'érosion hydrique des sols est la résultante de trois processus complémentaires et interreliés :

- Arrachement de particules de la masse de sol par les gouttes de pluie et les eaux de ruissellement;
- Transport des particules arrachées;
- Redéposition d'une partie des particules transportées.

Sous l'impact des gouttes de pluie, plusieurs dizaines, voire quelques centaines de tonnes de matériel peuvent être arrachées à l'hectare. Seule une fraction de ce matériel sera effectivement transportée, en raison de la limitation de la capacité de transport du ruissellement superficiel. Par la suite, une fraction du matériel transporté redéposera à la faveur d'obstacles physiques ou topographiques au ruissellement qui en réduisent la vitesse et la capacité de transport. Ce n'est donc qu'une fraction du sol initialement mobilisée qui sera finalement exportée hors des champs. Cet enchaînement fait de l'érosion un processus très sélectif. En effet, de nombreuses études ont démontré que le sol érodé se démarque du sol d'où il origine par un fort accroissement de sa teneur en fractions fines, en matière organique et en nutriments, ainsi que par une réduction significative de sa teneur en fractions sableuses (Bernard et al., 1992; Kenimer et al., 1987; Sinukaban, 1981). Cette sélectivité se traduit par un appauvrissement graduel du sol et par des charges polluantes dans les cours d'eau proportionnellement plus importantes que la perte de matériel en soi.

Divers facteurs influencent le risque d'érosion hydrique (Blanco et Lal, 2010; Wischmeier et Smith, 1978) :

- La hauteur et l'intensité des précipitations;
- La topographie (longueur, inclinaison et complexité de la pente);
- L'érodabilité intrinsèque du sol (influencée notamment par la teneur en matière organique, la granulométrie, la stabilité structurale);
- Les cultures et les pratiques culturales associées;
- Le recours à des pratiques de conservation.

Si certains de ces facteurs (caractéristiques des pluies, texture du sol et topographie) échappent à l'action humaine, d'autres sont fortement tributaires de celles-ci, notamment le choix des systèmes agricoles (rotations et pratiques culturales associées). L'érosion du sol peut aussi être exacerbée par d'autres dégradations du sol. Ainsi, la perte de matière organique et la dégradation de la structure du sol contribuent directement à accroître l'érodabilité de celui-ci (Blanco et Lal, 2010).

Le taux de formation naturelle du sol varie selon divers facteurs : nature du substrat, agressivité du climat, etc. Basé sur une revue de 188 études, Montgomery (2007) rapporte un taux de formation du sol médian et moyen de 0,017 et 0,036 mm/an respectivement. Considérant qu'un mm correspond à environ 12 t/ha, les taux de formation rapportés par Montgomery correspondent à environ 0,20 et 0,43 t/ha/an respectivement.

Certains auteurs ont proposé des limites d'érosion acceptable tenant compte du taux de formation de celui-ci. Ainsi, Verheijen et al. (2009) ont suggéré une perte maximale de 0,3 à 1,4 t/ha/an pour l'Europe, alors que Bui et al. (2011) avançaient une valeur de 0,20 t/ha/an pour l'Australie. Aux USA, il est recommandé de ne pas excéder une perte de sol variant de 5 à 12 t/ha/an (Schertz, 1983). Au Canada, pour la plupart des sols, le seuil tolérable est de 6 t/ha/an (Wall et al., 2002).

Les indicateurs de santé biologique liés au carbone et à l'azote

Teneur en matière organique

La matière organique (M.O.) constitue l'un des plus importants indicateurs de la qualité des sols. Elle affecte le fonctionnement chimique, physique et biologique ainsi que la santé globale du sol (Martinez et al., 2010). En plus d'être un réservoir d'éléments nutritifs, la M.O. améliore la capacité de rétention en eau du sol, colmate et cimente les particules minérales entre elles, protège les terres contre l'érosion, et ainsi joue un rôle préminent

pour la santé des cultures et de l'écosystème en général (Hoffland et al., 2020). La Figure 4 illustre bien ses rôles dans les sols et les fonctions écosystémiques qui en découlent.

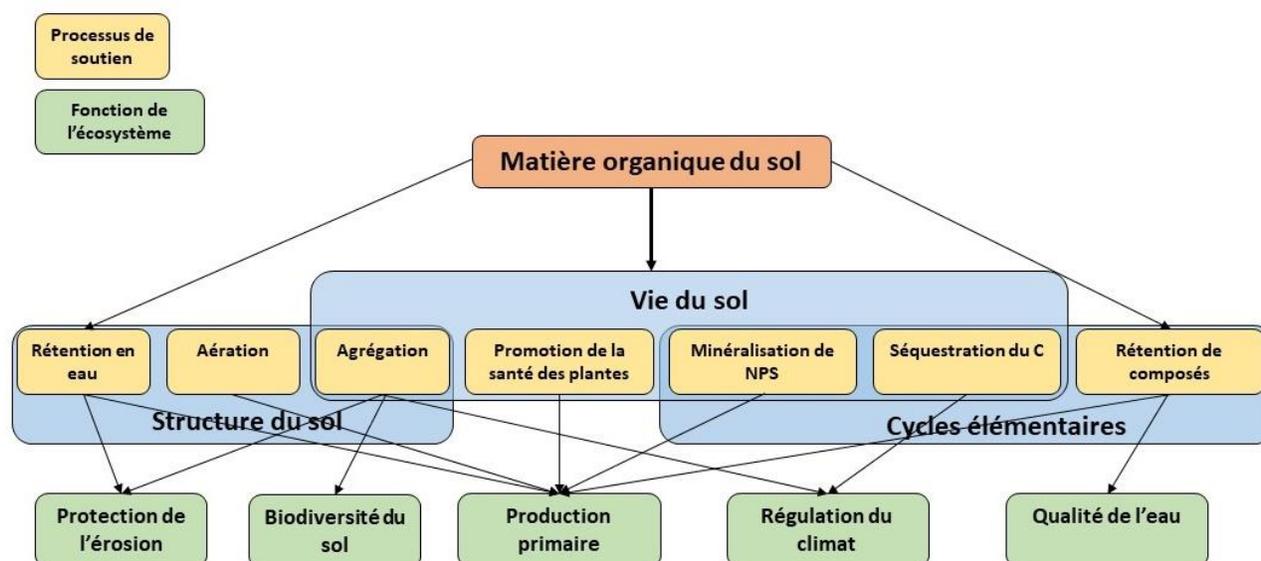


Figure 4 : Fonctions écosystémiques de la matière organique et les processus impliqués (figure adaptée de Hoffland et al., 2020).

La M.O. du sol est constituée de molécules de carbone organique provenant des organismes vivants ou en cours de décomposition, principalement des plantes, mais aussi des microorganismes et des animaux comme les vers de terre (Hoffland et al., 2020). Elle réagit et forme avec les colloïdes minéraux des complexes argilo-humiques responsables de la stabilité des agrégats et de la qualité de la structure (Bipfubusa et al., 2008) ainsi que de la capacité d'échange cationique du sol (Parfitt et al., 1995). La théorie de l'humification qui a prévalu jusqu'à récemment pour décrire les phénomènes d'accumulation de la M.O. dans les sols, et qui supposait que ses composés formaient au fil du temps des molécules récalcitrantes (substances humiques) difficilement dégradables par les microorganismes, est maintenant majoritairement écartée. On conceptualise plutôt la M.O. sous trois formes distinctes, dont les deux premières sont plus importantes (Cotrufo et Lavelle, 2022) :

- La matière organique particulaire (MOP), qui représente 20 à 30% de la M.O. du sol, parfois moins dans les sols sableux tempérés, est constituée principalement de résidus végétaux plus ou moins grossiers (< 50-60 µm) dont la minéralisation est relativement rapide, parce qu'elle est peu stabilisée sur les particules ou dans les agrégats de sol (Matus, 2021). Certaines fractions de la MOP peuvent toutefois se retrouver physiquement protégées dans les agrégats. Cette forme de M.O. est ainsi caractérisée par un *turnover* rapide, de l'ordre de quelques mois à quelques années.
- La matière organique fine (MOF), principalement adsorbée aux particules minérales et stockée physiquement au sein des agrégats, représente environ 70 à 80 % de la M.O. du sol. Elle est reconnue comme la forme la plus stable pouvant séjourner jusqu'à des dizaines de milliers d'années (Cotrufo et Lavelle, 2022). Cette forme de M.O. provient à la fois de la dégradation des composés de la MOP, surtout la cellulose et l'hémicellulose, et des composés issus de l'activité microbienne.

- La matière organique dissoute (MOD) représente seulement de 0,05 à 0,4 % de la M.O. des sols agricoles, mais jusqu'à 2% dans les sols forestiers (von Lützow et al., 2007). Cette forme est beaucoup plus mobile que les deux précédentes et peu souvent analysée étant donné sa grande variabilité et la complexité de son prélèvement, car elle doit être déterminée *in situ*. Elle peut conduire à la formation de MOF une fois fixée aux particules minérales du sol.

L'activité biologique nécessaire à la minéralisation de la M.O. est un phénomène naturel qui dépend entre autres des conditions de température et d'humidité du sol (CRAAQ, 2010). Par conséquent, l'évolution de la teneur en M.O. peut varier d'une région à une autre. Elle est influencée également par la texture du sol et dans une moindre mesure par la composition minéralogique des particules (Matus, 2021). Les pratiques culturales sont un autre facteur à prendre en compte dans la gestion de la M.O., car elles peuvent exercer une grande influence sur la dispersion du carbone dans le profil du sol. Il est cependant difficile d'établir des constats clairs relativement au bilan de masse de M.O. qui peut s'y accumuler en fonction du travail du sol. Par exemple, un labour profond peut entraîner une hausse de la minéralisation de la M.O. en surface et ainsi une perte M.O. dans l'horizon perturbé, mais du même coup l'enfouissement de résidus de culture dans les horizons profonds du sol permet de stocker la M.O. sur une longue période puisque la minéralisation à cette profondeur est très lente (Poirier et al., 2009). À l'inverse, le semis direct conduit généralement à une augmentation de la teneur en M.O. dans l'horizon de surface, mais très peu en profondeur.

La teneur en C ou en M.O. (%) ou le bilan de masse de C (tm/ha) du sol ont été utilisés pour qualifier la M.O. du sol dans de multiples inventaires de qualité ou de santé de sols (Tabi et al., 1990; Lilburne et al., 2004; Marshall et al., 2021; Nunes et al. 2021). La teneur est une mesure de concentration dans un horizon de sol, tandis que le bilan de masse est un bilan de masse surfacique réalisé dans un horizon ou profil de sol à partir d'une concentration, de la masse volumique apparente et de la profondeur. Dans l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols du Québec (Tabi et al., 1990), les teneurs en C ou en M.O. dans les horizons de sols sous monoculture ont été comparées aux sols sous prairie. Des critères basés sur des distributions d'observations provenant d'analyses de sols agricoles réalisées à l'échelle du Québec et subdivisés en texture légère et lourde ont également été utilisés (Tableau 2). Les inventaires pédologiques, tel que l'Étude pédologique des sols défrichés de l'Abitibi-Témiscamingue (1997), utilisent aussi des seuils de matière organique, mais sans faire référence à la texture des sols (Tableau 3).

Tableau 2 : Critères utilisés par Tabi et al. (1990) pour interpréter la teneur en matière organique du sol selon la texture.

Classes	Texture légère	Texture lourde
	-----%-----	-----%-----
Très faible	0 - 2	0 - 2
Faible	2,1 - 3,5	2,1 - 4,5
Modérée	3,6 - 6,5	4,6 - 10,0
Élevée	6,6 - 8,0	10,1 - 13,0
Très élevée	≥ 8,0	≥ 13,0

Tiré du Guide de fertilisation (Association des fabricants d'engrais du Québec, 1987).

Tableau 3 : Critères utilisés dans les rapports pédologiques pour interpréter la teneur en matière organique du sol.

Classes	Matière organique
	-----%-----
Très faible	< 2,0
Faible	2,0 – 3,0
Modérée	3,0 – 4,0
Élevée	4,0 – 6,0
Très élevée	≥ 6,0

Tiré de l'Étude pédologique des sols défrichés de l'Abitibi-Témiscamingue (1997).

Une teneur de 2 % de C organique a été rapportée dans quelques publications comme un seuil au-dessous duquel la structure des sols se détériorait et ce seuil a depuis été promu comme règle du pouce par ceux concernés par l'impact de l'agriculture intensive sur la dégradation de la qualité et de la fonctionnalité des sols (Loveland et Webb, 2002). À travers leur revue, ces auteurs avaient conclu qu'il n'y avait pas d'évidence d'un seuil très tranché de teneur en C au-delà duquel les propriétés physiques se détériorent, alors que pour la nutrition des plantes, on pouvait envisager un tel seuil si la minéralisation de la M.O. est la seule source de nutriments pour la culture. Néanmoins, ce seuil de 2 % de C organique est depuis utilisé dans plusieurs pays pour qualifier l'état des sols dont certains de la Communauté Européenne (Stotle et al., 2015; van Beek et Toth, 2012). Notons que cette teneur de 2 % de C organique équivaut à une teneur de 3,4 % de M.O. en utilisant un facteur de conversion de 58 % ou 1,724. Le MAPAQ a retenu dans un des objectifs de son Plan d'agriculture durable un indicateur relié à un seuil de 4 % de M.O. (2,3 % de C organique) à atteindre sur au moins 85 % des superficies cultivées au Québec (MAPAQ, 2020).

La matière organique labile ou active

La teneur en matière organique ou C organique du sol est certainement l'un des indicateurs les plus utilisés pour évaluer la quantité de matière disponible à l'activité biologique dans le sol. Toutefois, elle varie moins rapidement que la matière organique labile en réponse aux pratiques culturales. Par conséquent, la teneur en matière organique est utile pour mesurer des changements à long terme de l'état des sols, mais elle serait moins sensible aux effets des pratiques culturales à court terme que la matière organique labile, qui est davantage associée aux formes de carbone directement assimilables par les microorganismes. Ce carbone labile est composé d'hydrates de carbone, d'acides aminés et de sucres (DuPont et al., 2010; Weil et al., 2003). Il est impliqué dans divers processus fondamentaux qui protègent le sol contre la dégradation (Gugino et al., 2009). Il stimule l'activité des microorganismes qui y puisent leur énergie, contribuant ainsi au recyclage et à la minéralisation des éléments nutritifs. Il améliore la structure du sol en participant à la formation des agrégats et contribue à l'infiltration et à la capacité de rétention en eau. Le carbone actif mesuré par oxydation au KMnO_4 serait un indicateur de la fraction labile du carbone organique du sol (Weil et al., 2003). Sa teneur a été significativement corrélée à celles du C organique, du C de la biomasse microbienne et du C lié à la matière organique particulaire, mais peut démontrer une plus grande sensibilité aux changements de pratiques agricoles que ces autres paramètres (Weil et al., 2003; Culman et al., 2012).

L'azote minéralisable et la respiration du sol

La décomposition et la minéralisation de la matière organique du sol par des mécanismes biologiques et des réactions chimiques aboutissent à la transformation de composés organiques complexes en composés

inorganiques simples. Elles permettent au sol de fournir aux plantes une bonne partie des éléments nutritifs (N, P, S) essentiels à leur croissance et leur développement. L'azote minéralisable et la respiration du sol sont deux indicateurs plus récemment retenus pour évaluer l'activité biologique et la capacité du sol à fournir des nutriments aux plantes à partir de la minéralisation et du cycle de la matière organique.

Azote minéralisable

La majeure partie de l'azote du sol (>80 %) est sous forme polymérisée et donc généralement reconnue inaccessible pour des prélèvements directs par la microflore du sol ou les plantes (Farzadfar et al., 2021). Dans les systèmes agricoles, l'azote organique constitue de 80 à 90 % de l'azote total, n'étant disponible à la plante qu'après sa minéralisation. Il est composé de diverses substances organiques dont la biomasse microbienne, les résidus de culture et l'humus (Carter et Gregorich, 2008).

L'azote potentiellement minéralisable (APM) reflète la capacité du sol à minéraliser une fraction de cet azote organique. L'APM est ainsi un indicateur qui renseigne sur la capacité du sol à fournir de l'azote aux cultures aussi bien que sur le risque de pertes de nitrates par lessivage (Congreves et al., 2015; Gasser et al., 2003). Selon Drinkwater et al. (1996), la quantité d'azote minéralisée sur une base annuelle varie en fonction de l'historique des pratiques agricoles, du climat et des propriétés du sol. Les recherches effectuées plus récemment ont montré que le travail du sol et les rotations de cultures influencent l'APM du sol ainsi que d'autres paramètres liés à l'activité biologique dans le sol comme les teneurs en matière organique et en C actif (Congreves et al., 2015). En général, les sols qui ont les taux d'APM les plus élevés sont également ceux qui ont les plus hauts taux de carbone actif, de matière organique et une plus grande stabilité des agrégats (Gugino et al., 2009).

Respiration du sol

La respiration du sol, aussi connue sous le nom de « minéralisation du carbone », correspond à la production de CO₂ résultant de l'activité biologique du sol par les microorganismes, la faune du sol et les racines des cultures. Elle résulte, entre autres, de la décomposition microbienne en condition aérobie de la matière organique du sol, de la respiration des racines et de la faune et éventuellement de la dissolution des carbonates dans la solution du sol.

Même s'il semble difficile de démontrer un lien direct entre la respiration hétérotrophe et l'état de santé du sol, la mesure du CO₂ est considérée comme un indicateur de l'activité biologique et, par conséquent, est indirectement liée à la minéralisation de la M.O. et de la libération potentielle d'éléments nutritifs comme l'azote, le phosphore et le soufre sous formes inorganiques qui sont assimilables par les cultures. Dans la littérature, il n'existe pas de valeur de référence crédible pour cet indicateur. Une plus grande respiration ne peut qu'indiquer une grande activité microbienne, mais ne peut pas être liée à une propriété d'intérêt en lien avec la santé des sols. Une respiration excessive des sols arrive généralement après un labour, dû à une décomposition accélérée des agrégats du sol qui protégeait la matière organique du sol et favorisait l'aération des sols.

Les indicateurs de la chimie-fertilité des sols

Les indicateurs décrits dans cette section incluent ceux reliés à la réaction du sol (niveau d'acidité et besoin en chaux) et la disponibilité des éléments pour les cultures, sauf les propriétés reliées à la matière organique et l'activité biochimique qui sont traités dans une autre section.

Niveau d'acidité

L'acidité active du sol est mesurée avec le pH à l'eau ou dans une solution saline diluée (CaCl_2 0,01M, par exemple). La disponibilité des éléments nutritifs est maximale dans un intervalle de pH entre 6,0 et 7,0 pour la plupart des cultures en sol minéral (Tableau 4) (CRAAQ, 2010). En sol organique, cet intervalle se situe plutôt entre 5,0 et 5,8. Dans le cas des éléments comme le cuivre, le zinc, le manganèse et le fer, il existe un risque de toxicité pour les cultures en sols acides en raison de la très grande disponibilité de ces éléments à de faibles pH.

Tableau 4 : Classes de réaction (pH eau) des sols minéraux et cinq classes retenues pour l'EESSAQ.

Classes de réaction	pH _{eau} (ratio 1 :1)	Classification EESSAQ
Extrêmement acide	3,0 - 4,5	Très acide
Très fortement acide	4,6 - 5,0	Très acide
Fortement acide	5,1 - 5,5	Très acide
Moyennement acide	5,6 - 6,0	Acide
Faiblement acide	6,1 - 6,5	Neutre
Neutre	6,6 - 7,3	Neutre
Faiblement alcalin	7,4 - 7,8	Alcalin
Moyennement alcalin	7,9 - 8,4	Alcalin
Fortement alcalin	≥ 8,5	Très alcalin

Tiré du Guide de référence en fertilisation 2^e édition (CRAAQ, 2010)

Capacité d'échange cationique et la disponibilité des éléments nutritifs

Les éléments minéraux du sol sont dits majeurs ou mineurs selon qu'ils soient nécessaires en grande ou en petite quantité à la croissance des plantes. Le phosphore (P), le potassium (K), le magnésium (Mg) et le calcium (Ca) font partie des éléments majeurs alors que le fer (Fe), le manganèse (Mn), le cuivre (Cu), le bore (B), le zinc (Zn) et le molybdène (Mb) font partie des éléments mineurs (CRAAQ, 2010).

La capacité d'échange cationique (CEC) d'un sol est une propriété importante définissant la disponibilité des éléments nutritifs pour la plante. Son origine réside dans les charges négatives portées par les particules de sol, généralement de l'argile, de la matière organique et des sesquioxydes (Sumner et Miller, 1996). Ces charges négatives peuvent retenir des ions chargés positivement (cations) comme le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}) et le potassium (K^+) par des forces électrostatiques. Ces cations retenus sont facilement échangeables avec ceux dans la solution du sol, améliorant ainsi la capacité des sols à CEC élevée à maintenir des quantités adéquates de Ca^{2+} , Mg^{2+} et K^+ disponibles pour la plante. Les charges négatives peuvent aussi être occupées par des cations acides comme l'hydrogène (H^+) et l'aluminium (Al^{3+}). Par conséquent, un sol avec une CEC élevée n'est pas nécessairement plus fertile qu'un autre avec une CEC plus faible. Toutefois, lorsque combinés avec d'autres mesures de fertilité, la CEC est un bon indicateur de la qualité des sols et de productivité.

Dans les guides de référence en fertilisation (CRAAQ, 2003; CRAAQ, 2010), les niveaux de disponibilité en éléments nutritifs sont établis en fonction des différentes cultures et parfois des types de sol. Un exercice de reclassification est donc requis pour aboutir à des critères d'interprétation avec des niveaux de disponibilité communs. Dans le cadre d'inventaires pédologiques, un tel exercice a préalablement été réalisé et des niveaux communs faisant abstraction des cultures et des types de sols sont utilisés. Le Tableau 5 fait état des critères retenus dans l'Étude pédologique des sols en culture des comtés de Matane et Matapédia (Leblanc et Gagné, 2017) pour interpréter

les niveaux de disponibilité en éléments majeurs (P, K, Ca, Mg et Na) extraits à la solution Mehlich-3, la capacité d'échange cationique (CEC) et la saturation en bases.

Pour les éléments Mn, Zn et Cu, le Guide de référence en fertilisation présente des niveaux de disponibilité en oligoéléments pour les plantes (Tableau 6) et des niveaux d'accumulation dans les sols pour ces mêmes éléments (Tableau 7) (CRAAQ, 2010).

Tableau 5 : Critères d'interprétation pour les éléments majeurs, les bases échangeables et la capacité d'échange cationique (CEC) extraits à la solution Mehlich-3.

Classes	P	K	Ca	Mg	Na	CEC	Saturation en bases
	----- mg/kg -----					cmol/kg	%
Très faible	< 20	< 50	< 600	< 50	< 15	< 6,0	< 20
Faible	20-55	50-100	600-1900	50-200	15 - 35	6,0 - 12,0	20 – 40
Modérée	55-90	100-175	1900-3200	200-350	35 - 70	12,0 - 25,0	40 – 60
Élevée	90-125	175-225	3200-4500	350-500	70 - 135	25,0 - 40,0	60-80
Très élevée	≥ 125	≥ 225	≥ 4500	≥ 500	≥ 135	≥ 40	≥ 80

Tiré de l'Étude pédologique des sols en cultures des comtés de Matane et Matapédia (Leblanc et Gagné, 2017).

Tableau 6 : Critères d'interprétation pour les oligoéléments extraits à la solution Mehlich-3.

Classes	Mn	Zn	Cu
	----- mg/kg -----		
Très bas		< 1,0	
Bas	0 - 5	1,1 – 1,8	0,3
Moyen	6 - 11	1,9 - 2,8	0,3 - 0,6
Adéquat	> 11	> 2,8	> 0,8
Élevé (ou toxique)	-	-	-

Tiré du Guide de Référence en Fertilisation 2^e édition (CRAAQ, 2010).

Tableau 7 : Critères d'interprétation pour l'accumulation de quelques éléments traces métalliques extraits à la solution Mehlich-3.

Classes	Distribution percentile	Mn	Zn	Cu
		----- mg/kg -----		
Très faible	< 25	< 15,2	< 1,2	< 1,1
Faible	25 - 50	15,2 - 25,3	1,2 - 1,9	1,2-1,8
Modérée	50 – 75	25,3 - 35,0	1,9 - 3,0	1,8 - 2,8
Élevée	75 – 99	35,0 - 98,6	3,0 - 14,0	2,8 - 9,0
Très élevée	> 99	> 98,6	> 14,0	> 9,0

Tiré du Guide de Référence en Fertilisation 2^e édition (CRAAQ, 2010) et de Deschênes et al. (2005).

Tiré du Guide de référence en fertilisation 1^{ère} édition (CRAAQ, 2003).

La plupart des sols du Québec sont naturellement peu pourvus en phosphore mais au fil des ans, celui-ci s'est accumulé dans plusieurs sols de façon excessive à la suite d'apports répétés en engrais organique et minéraux au-delà des prélèvements des cultures (CRAAQ, 2010). Le phosphore est majoritairement associé à la phase solide du sol sous forme d'Al-P, Fe-P, Mn-P, Ca-P ou sous forme colloïdale avec l'argile ou la matière organique du sol. Certaines formes solides de phosphore peuvent se dissoudre dans la solution du sol en continu, tandis que d'autres se maintiennent sous forme insoluble et donc non disponibles aux plantes (CRAAQ, 2010).

Dans les sols naturellement acides du Québec ($\text{pH} < 6,6$), la principale barrière à l'absorption de phosphore est un pH trop acide ($\text{pH} < 5,5$) qui limite le développement racinaire (CRAAQ, 2010). Dans ses formes les plus courantes, le phosphore n'est pas toxique ou nocif pour l'humain. Une quantité excessive dans les eaux de surface peut toutefois nuire à l'environnement. Le phosphore biodisponible favorise une croissance rapide et excessive de la flore aquatique qui peut entraîner une eutrophisation accélérée des plans d'eau et modifier l'habitat faunique. Cette croissance excessive de la flore aquatique peut aussi interférer avec les systèmes de traitement de l'eau de consommation et causer certains problèmes sanitaires. La prolifération de cyanobactéries et la libération de leurs toxines nocives peuvent provoquer des problèmes de santé humaine tels des irritations de la peau, l'atteinte du système nerveux ou des troubles hépatiques (Beaudin et al., 2008). Le critère de protection contre l'eutrophisation des cours d'eau se situe à 0,03 mg/l de phosphore total et celui des lacs, à 0,02 mg/l (MELCC, 2020).

Parmi les principaux facteurs qui favorisent la mobilité du phosphore vers les plans d'eau figurent :

- la teneur ou la saturation du sol en phosphore;
- le bilan des apports en phosphore provenant des engrais de ferme et des engrais minéraux;
- les modalités des apports des engrais de ferme (Beaudin et al., 2008).

En réponse aux préoccupations croissantes à l'égard de la mobilité du phosphore vers les écosystèmes aquatiques, la caractérisation des risques de perte de phosphore vers les cours d'eau s'est greffée aux besoins d'évaluer la quantité de phosphore disponible pour les plantes. L'indice de saturation des sols en phosphore (ISP) répond à cet impératif environnemental en définissant des seuils environnementaux au-delà desquels le risque de contamination des eaux de surface est accru. Au Québec, les indices de saturation correspondant au rapport P/Al ou P/(Al+Fe) extrait à la solution Mehlich3 ont été validés comme indice de solubilité et de désorption du phosphore dans les sols agricoles (Beaudin et al., 2008). Les critères d'interprétation utilisés sont présentés au Tableau 8. Au-delà de ces valeurs critiques, les recommandations en phosphore ne devraient pas dépasser les exportations par les récoltes (CRAAQ, 2010).

Tableau 8 : Valeurs critiques environnementales des indices de saturation des sols en phosphore (CRAAQ, 2010).

Type de sol	Sols minéraux	Sols organiques
		$ISP_1 = \left[\frac{P}{Al} \right]_{M-3}^1$
	<i>ISP_{critique}</i> en fonction des groupes de texture ²	
G1a (argile ≥ 60 %)	6 %	
G1b (argile < 60 %)	8 %	5 %
G2	11 %	
G3	15 %	

¹ Le phosphore (P), l'aluminium (Al) et le fer (Fe) sont exprimés en mg/kg.

² G1, G2 et G3 sont respectivement les groupes de texture fine, moyenne et grossière.

La classe de capacité de fixation des sols en phosphore est évaluée avec la teneur en Al extrait à la solution Mehlich-3 (Tableau 9).

Tableau 9 : Critères d'interprétation pour l'aluminium extrait à la solution Mehlich-3.

Classe de capacité de fixation des sols en P	Al
	mg/kg
Faible	$Al_{M-III} < 1100$
Moyenne	$1100 \leq Al_{M-III} \leq 1600$
Élevée	$Al_{M-III} \geq 1600$

Tiré du Guide de Référence en Fertilisation 2^e édition (CRAAQ, 2010).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Cette section décrit la méthode d'échantillonnage des sols et leur caractérisation, la nature et la description des indicateurs de santé des sols utilisés, de même que les méthodes d'analyses de laboratoire et statistiques utilisées pour évaluer l'état de santé des sols.

Choix et présentation des séries de sols

Pour assurer une bonne représentativité des différents sols cultivés du Québec et pour comparer les résultats avec l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols (Tabi et al., 1990), l'étude a eu recours aux séries de sols comme assise de stratégie d'échantillonnage. La série de sols est le niveau final du système de classification canadien des sols. Elle regroupe des sols qui sont semblables pour toutes les caractéristiques principales de leurs horizons, sauf la couche de surface. On retrouve plus de 690 séries de sols nommées dans les différentes études pédologiques du Québec (Leblanc et Gagné, 2007; Lamontagne et Nolin, 1997).

Avant l'octroi du mandat à l'IRDA en 2017, le MAPAQ a mandaté Lucie Grenon, pédologue, agronome retraitée, pour réaliser une première sélection de séries de sols à étudier, basée sur leur importance en termes de superficies cultivées, de leur répartition dans les douze principales régions pédologiques agricoles du Québec et de la nature et origine de leur matériau parental. La sélection devait aussi contenir une certaine représentation des séries de sols évaluées dans le cadre de l'Inventaire de 1990 (Tabi et al., 1990), des séries issues d'études pédologiques plus récentes (Iberville, Napierville, Matane-Matapédia, bassin versant du Bras d'Henri), ainsi que des séries de sols organiques en raison de leur importance économique (Boudache, 2014).

Cette liste a été révisée par l'équipe de pédologues et de professionnels de l'IRDA en concertation avec les professionnels du MAPAQ. L'importance des séries de sols en termes de superficies cultivées a été recalculée avec les superficies agricoles déclarées à la Financière agricole du Québec (FADQ) en 2016 et comparée à la zone agricole de la carte écoforestière. Ainsi des séries jugées plus importantes en termes de superficies cultivées, ou de représentation d'une région pédologique ont été ajoutées. Finalement, la sélection des séries de sols a aussi été réalisée en considérant la possibilité de les regrouper dans des groupes de séries dont la nature et les propriétés sont suffisamment apparentées pour augmenter le nombre d'observations et permettre des comparaisons adéquates entre sols cultivés et sols témoins. En Annexe A, le Tableau 151 présente les différents critères de nature pédologique qui ont permis de sélectionner et de regrouper les différentes séries de sols retenues pour l'étude. Quelques séries de sols sont distribuées sur plusieurs régions pédologiques (e.g. Mawcook, Bedford, Saint-Jude), transgressant le concept d'uniformité des conditions pédo-climatiques dans une même série. Toutefois, les caractéristiques à l'intérieur de ces séries de sols demeurent uniformes et cohérentes. Certaines superficies cartographiées peuvent être surestimées dans les tableaux présentant les caractéristiques des séries de sols pour différentes raisons.

Sélection des sites

Pour assurer un nombre suffisant d'échantillons tout en respectant les limites budgétaires de l'étude, chaque série de sols a été échantillonnée dans quatre parcelles agricoles cultivées (dénommées sites cultivés) et deux sites témoins. Pour s'assurer de la validation et de l'échantillonnage de ces six sites par série de sols, un minimum de 12 sites ont été présélectionnés par les pédologues en recoupant plusieurs couches d'information de nature pédologique (séries de sols, régions pédologiques), topographique (route, hydrographie, courbe de niveau, etc.),

administrative (municipalité, no. de lot du cadastre rénové ou ancien), ainsi que sur l'occupation du territoire (zone agricole, types de cultures, délimitation des zones en friches, zones de production bovine). L'imagerie satellitaire provenant de diverses sources a également été utilisée pour définir l'occupation des sites cultivés ou témoins. Certains sites de l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols (Tabi et al., 1990) ont été sélectionnés, lorsque leur localisation était certaine, pour faire partie de l'échantillon et/ou valider le concept de la série par les pédologues sur le terrain. Le choix des autres sites devait se faire de façon aléatoire selon les besoins sur les terres cultivées ou en friches, à l'échelle de la région pédologique à laquelle la série était associée de façon prédominante.

De plus, les critères suivants ont été appliqués pour la sélection des sites :

- Le site ne devait pas se trouver sur une ferme expérimentale;
- Le site devait disposer d'une bonne uniformité pédologique et respecter le concept de la série visée;
- Le site était rejeté s'il avait été récemment nivelé ou s'il présentait des problématiques majeures comme des cuvettes et des zones mal drainées ou dégradées de façon non représentative par rapport à la série;
- Les sites échantillonnés lors d'études antérieures (Inventaire de 1990, par exemple) étaient priorisés.

Tant pour les sites témoins que pour les sites cultivés, une fois le site sélectionné, l'exploitant et/ou le propriétaire du site a été contacté pour lui expliquer brièvement le projet et l'étendue de son implication. Le site a été retenu uniquement si le répondant acceptait toutes les conditions de l'étude (signatures d'ententes, accès au site pour la caractérisation, échantillonnage et prise de rendement de cultures et accès à l'information sur l'historique et les pratiques agricoles antécédentes liées au site) et qu'après discussion, le site ne présentait pas de limitations majeures (récent travaux de drainage ou de nivellement, compaction majeure, etc.) pouvant entraîner son déclassement. Le déroulement de l'étude a été décrit aux exploitants de la façon suivante :

Dans l'année en cours, une première équipe de pédologues se rendait sur place afin de valider si le sol sur le site correspondait aux critères de la série et aux conditions précédemment définies. Dans l'affirmative, une deuxième équipe se rendait sur le site la saison suivante, une première fois entre le mois d'avril et le mois de juillet pour échantillonner et caractériser les sols et seconde fois plus tard en saison, pour mesurer les rendements de la culture, si celle-ci était visée par l'étude (soya, canola, et petites céréales, prairies (1^{ière} coupe), maïs-grain ou ensilage, pommes de terre). Finalement, à l'hiver suivant la dernière visite, un questionnaire était acheminé aux producteurs participants pour documenter les pratiques agricoles réalisées sur le site au cours des cinq dernières années.

Sites cultivés

La sélection des sites cultivés a été réalisée de façon aléatoire sur l'ensemble de la zone cultivée occupée par la série de sols évaluée. Les sites devaient sous grandes cultures (maïs, soya, petites céréales, canola, etc.), prairies, pâturages, cultures maraîchères, ou pommes de terre.

Sites témoins

Pour qualifier l'état de référence de la série de sols en conditions agricoles, les deux sites témoins devaient présenter un état de sol non-dégradé ayant déjà été cultivés, aménagés et améliorés. Les sites en milieux forestiers ou boisés ont été évités, tandis que les sites sous couvert de plantes pérennes herbacées, n'ayant pas été cultivés (sol travaillé ou récolté) depuis les cinq dernières années au minimum, ont été priorisés. Au moment de la

validation sur le terrain, les pédologues s'assuraient que le site ne présentait pas de perturbation anthropique importante (dépôt de roches ou d'ordures, remblai), mais que le sol présentait un état physique (structure, consistance et macroporosité) non-dégradé et une activité biologique importante reliée à la présence de racines de plantes pérennes, entre autres.

Les occupations suivantes ont été priorisées par ordre de préférence :

1. Friche herbacée récente;
2. Prairie extensive;
3. Pâturage extensif.

Les conditions de *friche* étant plus rare dans les régions à très forte occupation agricole, l'aide de conseillers agricoles connaissant bien le secteur a été sollicitée sur le terrain pour la sélection de sites témoins. De plus, des sites témoins ont été retenus en bordure de champ sous des haies brise-vents, sur des bords de clôture, dans des terrains engazonnés, des boisés, des plantations et des vergers. En dernier recours, lorsqu'aucun site témoin sous plante pérenne ne convenait, un sol cultivé présentant un très bon état structural jugé par les pédologues a été retenu.

Chronologie de la sélection des sites

Au cours de l'année 2017, 24 séries de sol ont été validées et caractérisées par les équipes pédologiques, soit le tiers du nombre de séries visé. Un total de 136 sites ont été caractérisés et sélectionnés. De ce nombre, 25 étaient des sites caractérisés lors de l'Inventaire de 1990 (Tabi et al., 1990), répartis dans 16 séries de sols. En 2018, 44 séries de sols ont été validées par les équipes pédologiques. Selon le plan initial, la totalité des sites devait avoir été sélectionnée en février 2018. Les séries Lapointe, Parent, Coaticook et Sheldon qui n'avaient pas été validées par l'équipe pédologique au cours de la saison de terrain en 2018 ont été remplacées par les séries, Uplands, Valère, Orléans et Le Bras afin de mieux couvrir quatre zones sous-échantillonnées à l'échelle provinciale. Ces quatre séries ont été validées et échantillonnées au printemps de 2019.

Caractérisation des profils de sol par les pédologues

Au moment de la validation du site, l'équipe pédologique procédait à une description morphologique complète d'un profil de sols sur au moins un des points d'échantillonnage (PE) et validait la présence de la série sur les trois autres PE (Tableau 10) du même site. Chaque PE identifié par les équipes pédologiques était géoréférencé avec un DGPS à 0,60 m de résolution et la profondeur de l'horizon Ap a été relevée afin de fournir cette information aux équipes d'échantillonnage l'année suivante.

Tableau 10 : Informations saisies lors de la description morphologique d'un profil de sol par les équipes pédologiques.

Informations générales	Identifiant du site Date Responsable de la description	
Descripteurs pédo-morphologiques du site*	% de pente Type de pente Exposition de la pente	Pierrosité Roccosité Drainage Profondeur du gley et des carbonates
Descripteurs pédo-morphologiques des horizons pédologiques*	Numéro de l'horizon Désignation de l'horizon Profondeur de la limite supérieure et inférieure de l'horizon Consistance à l'état humide Texture Remarques	% de fragments grossiers Classe dominante des fragments Couleur de la matrice et des marbrures Description des marbrures (abondance, dimension, contraste) Structure (type, classe, grade) * Degré d'effervescence Porosité
Descripteurs pédo-morphologiques supplémentaires en sol organique		% de fibres frottées, échelle de décomposition Von post, origine botanique de la fibre

*Certains descripteurs sont décrits sur deux niveaux d'échelle par horizon.

Protocole de caractérisation et d'échantillonnage des sols

Cette section présente de façon concise le protocole de caractérisation et d'échantillonnage des sites retenus. Le protocole détaillé peut être consulté dans Gasser et al. (2019).

Conditions à respecter avant l'échantillonnage

Afin d'obtenir des échantillons de sol comparables d'un site à l'autre, notamment pour certaines propriétés pouvant évoluer au cours de la saison, comme l'azote minéralisable ou le carbone actif, le sol devait être échantillonné au printemps. La date d'échantillonnage a cependant varié selon les régions en fonction des conditions de terrain et de cultures.

Idéalement, l'échantillonnage devait être réalisé avant toute opération de fertilisation au printemps. Cependant, l'échantillonnage de champs ayant été récemment fertilisés (fertilisation minérale ou organique) ou travaillés devait être reporté d'au minimum trois semaines. Pour les cultures sur billon, l'échantillonnage devait être réalisé avant le semis, afin d'assurer une profondeur d'échantillonnage conforme au protocole, tout en limitant les risques d'échantillonner dans la bande d'engrais.

Par ailleurs, le sol devait être dégelé, ressuyé après des précipitations abondantes, tout en conservant assez d'humidité pour faciliter l'examen visuel et le prélèvement de mottes et de cylindres de sol.

Positionnement des points d'échantillonnage

Les équipes d'échantillonnage devaient d'abord retrouver avec un DGPS opérant à une résolution de 60 cm les quatre points d'échantillonnage géolocalisés par les équipes pédologiques de l'IRDA.

Aspect de la surface

Le positionnement et l'aspect de la surface de chaque point d'échantillonnage ont été décrits en termes de position sur la pente, position sur une planche arrondie, position par rapport aux drains, état de la surface, type de végétation présente, rugosité de la surface du sol et trace de fertilisation récente.

Profil de sols

À chaque point d'échantillonnage, une fosse de 60-100 cm de largeur et de 40-60 cm de profondeur a été creusée et géoréférencée avec un DGPS d'une précision de 60 cm. Les horizons pédologiques Ap (ou Ap₁ et Ap₂) et B ont été identifiés. Selon l'épaisseur de l'horizon Ap, la délimitation des horizons d'échantillonnage a été définie en trois variantes :

Ap1 : de 1 à 10 cm de la surface du sol;

Ap2 : trois situations :

- aucun échantillon, si la profondeur du Ap était inférieure à 17 cm;
- de 10 cm jusqu'à la fin du Ap (25 cm max.), si la profondeur du Ap se situait entre 17 et 30 cm;
- de 15 à 30 cm, si la profondeur du Ap excédait 30 cm.

B : dans les premiers 15 cm sous la fin du Ap (début du B).

Examen visuel du profil de sol

Les caractéristiques suivantes ont été relevées dans les horizons d'échantillonnage Ap1, Ap2 et B préalablement délimités :

- Présence et description d'une ou deux couches compactes limitantes;
- Présence de graviers (2 à 75 mm), cailloux, (75 à 250 mm) ou de pierres (> 250 mm), quand ces catégories représentaient plus de 10 % du volume de sol;
- Présence de marbrures si elles excédaient 10 % de la surface de l'horizon;
- Évaluation de la structure à partir de mottes de sol prélevées dans l'horizon ciblé, en notant le type, la classe et le grade de la structure;
- Évaluation de la porosité aussi à partir d'un bloc de sol (± 10 cm x 10 cm x 10 cm) prélevé dans l'horizon ciblé en notant l'abondance des pores fins (0,5 à 2 mm) et grossiers (> 2 mm) sur la surface de l'un des côtés du bloc extrait;
- Évaluation de la consistance du sol, à partir de mottes de sol prélevées dans l'horizon ciblé, en exerçant une pression avec la main pour briser les agrégats;
- Évaluation visuelle de la qualité structurale du sol dans l'horizon ciblé selon la méthode VESS développée par Ball et al. (2007) et Guimarães et al. (2011).

Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique saturée a été estimée au champ avec un perméamètre de Guelph, à 15 cm et 40 cm de profondeur dans le sol (Reynolds, 2007). L'appareil était disposé à moins de 3 m du profil de sol de chaque point d'échantillonnage.

À chaque profondeur, la conductivité a été mesurée avec une hauteur de colonne d'eau de 5 cm. Les trois derniers débits obtenus à régime constant, c'est-à-dire lorsque les intervalles de temps et de hauteurs d'eau étaient trois fois identiques, ont été enregistrés.

Prélèvement des cylindres de sol

À chaque point d'échantillonnage, trois cylindres de sol de 6,00 cm de diamètre x 6,35 cm de hauteur ont été prélevés à 2 cm de la limite supérieure des horizons prédéfinis. Les trois cylindres ont été prélevés sur le côté du profil de sol, à la même profondeur et distants de 20 à 30 cm l'un de l'autre.

Deux cylindres servaient à évaluer la masse volumique apparente du sol et le contenu en fragments grossiers > 2 mm. Après leur prélèvement, le sol excédant les extrémités des cylindres était enlevé en le découpant avec un couteau, sans compacter ou perdre de matériel. Le contenu des deux cylindres a ensuite été vidé dans un sac identifié à cet effet.

Un troisième cylindre a été conservé intact pour la mesure au laboratoire de la porosité totale et de la macroporosité sur table de tension. Une fois le cylindre retiré du sol, les bouts étaient sommairement égalisés au couteau pour laisser un excès de 5-10 mm de sol. Le cylindre de sol était ensuite placé dans un sac de plastique identifié et scellé pour le transport.

Prélèvement de sol pour la stabilité des agrégats

Un bloc non perturbé de sol de 8 cm x 8 cm x 8 cm a été prélevé dans le premier horizon (Ap1) uniquement, soit entre 1 et 10 cm de profondeur. Ce bloc était par la suite placé dans un sac pré-identifié, fermé hermétiquement et transféré dans un contenant de transport rigide.

Prélèvement de sol pour la mesure du césium-137

Une sonde d'échantillonnage d'un diamètre de 5 cm et d'environ 80 cm de long a été enfoncée dans le sol à chaque point d'échantillonnage jusqu'à une profondeur de 55 cm, afin de capter la totalité de l'inventaire de césium-137. Le contenu de la sonde a été transféré dans un sac de plastique pré-identifié.

Prélèvement de sol en vrac

À l'aide d'une tarière Edelman de 5 cm de diamètre, le sol a été échantillonné sur 6 à 8 endroits dans un rayon de 5 m autour du profil de sol dans chaque horizon d'échantillonnage prédéfini, soit sur une épaisseur de moins de 10 cm dans l'horizon de surface Ap1 et de 15 cm dans les deux horizons inférieurs Ap2 et B. Le sol a été échantillonné en retirant le premier centimètre à la surface du sol ainsi que les premiers centimètres à l'interface entre deux horizons. Les 6 à 8 prélèvements ont formé un échantillon composite d'environ 1 kg de sol.

Conservation et transport des échantillons

Dès leur prélèvement, les échantillons de sol ont été conservés au frais, dans des glacières avec blocs réfrigérants. À la fin de la journée, les échantillons étaient déposés dans une chambre froide jusqu'au moment de leur

expédition en moins d'une semaine vers le Laboratoire d'analyse agroenvironnementale de l'IRDA à Québec. Le transport des échantillons s'est fait dans les boîtes de carton isolées fournies à cet effet.

Équipes d'échantillonnage

En raison de la nécessité de procéder rapidement à cette opération, l'IRDA a sollicité des entreprises de service-conseils ou des organismes pour réaliser l'échantillonnage des sols en 2018 et 2019 (Tableau 11). Les équipes d'échantillonnage devaient inclure un chef d'équipe avec une expérience d'au moins deux ans dans l'échantillonnage et la caractérisation des sols agricoles, ainsi qu'au moins une ou deux autres personnes capables de réaliser des travaux d'échantillonnage des sols.

Tableau 11 : Entreprises retenues pour l'échantillonnage des sols dans le cadre de l'EESSAQ.

Année	Région	Entreprise en service-conseil ou organisme
2018	Bas-Saint-Laurent	Biopterre
	Chaudière-Appalaches	Fertior
	Mauricie-Portneuf	Groupe Conseils Agro Bois-Francs
	Montérégie Est	Groupe PleineTerre Inc.
	Montérégie Ouest	Groupe PleineTerre Inc.
	Saguenay-Lac-Saint-Jean	Groupe-Conseil Agri-Vert
2019	Bas-Saint-Laurent-Gaspésie	Biopterre
	Chaudière-Appalaches Nord	Club-conseil Agro-Champs
	Chaudière-Appalaches Sud	Fertior et OptiConseils Chaudière-Appalaches
	Centre-du-Québec	Groupe PleinTerre Inc.
	Estrie	Dura-Club
	Montérégie Nord	Dura-Club
	Montérégie Sud-Est	Groupe PleineTerre Inc.
	Montérégie Sud-Ouest	Groupe PleineTerre Inc.
	Lanaudière-Mauricie	Services Agrixpert
	Abitibi-Témiscamingue	Groupe-Conseil Agricole Abitibi-Témiscamingue
	Mont-Laurier-Outaouais	Club conseil Profit-eau-sol
	Capitale Nationale	Club Agroenvironnemental de la Rive-Nord

Pour assurer une uniformité des conditions d'échantillonnage, ce dernier devait se faire entre la fin du mois d'avril et la fin du mois de juillet sur tous les sites localisés dans une région donnée. Les quatre points d'échantillonnage sur chaque site devaient être échantillonnés en moins de trois jours consécutifs. Après toute opération de fertilisation organique ou minérale, un délai de trois semaines était exigé avant d'échantillonner le sol.

Les chefs d'équipes, et idéalement les autres membres des équipes, ont été convoqués à une formation avant le début des travaux d'échantillonnage. La supervision des travaux a été effectuée par des visites de contrôle à au moins deux reprises dans les champs durant l'échantillonnage pour vérifier et harmoniser les procédures le cas échéant.

Chaque équipe avait la responsabilité de convenir avec le producteur ou le propriétaire du terrain de la meilleure journée pour procéder à l'échantillonnage du site, idéalement avant les opérations de fertilisation et de semis.

Elle était également responsable de mettre en place les mesures nécessaires pour assurer la biosécurité sur les différents sites échantillonnés et prévenir le transport d'organismes nuisibles d'un site à l'autre.

Enfin, un calendrier d'échantillonnages réalisés et à venir devait être révisé et transmis à l'IRDA à chaque vendredi de la semaine, afin de démontrer une évolution satisfaisante de l'échantillonnage et la capacité de l'équipe à terminer son mandat dans les délais prescrits.

Chronologie de l'échantillonnage des sites

En 2018, les six équipes d'échantillonnage ont caractérisé et échantillonné 149 sites distribués dans 25 séries de sol entre le 11 mai et le 23 octobre. En 2019, les six équipes d'échantillonnage ont caractérisé et échantillonné 276 sites distribués dans 46 séries de sol entre le 29 avril et le 10 octobre. En 2022, six sites supplémentaires ont été échantillonnés et caractérisés dans les séries Sainte-Rosalie et Saint-Urbain pour augmenter le nombre d'échantillons des sols du groupe 1 dont les surfaces cultivées sont parmi les plus importantes. Le Tableau 12 présente la répartition de l'échantillonnage des sites durant les saisons 2018, 2019 et 2022.

Tableau 12 : Répartition du nombre de sites échantillonnés durant les saisons 2018, 2019 et 2022.

Mois	2018	2019	2022
Avril		1	
Mai	36	69	5
Juin	76	101	1
Juillet	28	84	
Août	6	8	
Septembre	2	11	
Octobre	1	2	
Somme	149	276	6

Analyses de laboratoire

Les échantillons ont été conservés au réfrigérateur dès leur arrivée au laboratoire. Les échantillons de sol en vrac ont été pesés humides, séchés à l'air et tamisés à 2,00 mm en moins d'une semaine après leur arrivée.

Indicateurs de l'état physique des sols

La granulométrie a été déterminée avec la méthode à l'hydromètre de Bouyoucos modifiée (CPVQ, 1997; Gee et Bauder, 1986; Kroetsch et Wang, 2017). Sommairement, environ 40 g de sol a été pesé et mélangé à 100 ml de solution dispersante (hexamétaphosphate de sodium) et le volume a été porté à 1 L dans un cylindre. La densité de la suspension de sol est mesurée à l'aide d'un hydromètre à 0,5, 1, 5, 30, 120 et 1440 minutes et corrigée pour la température, ce qui permet d'obtenir la proportion de sable, de limons fin, moyen et grossier et d'argile. La granulométrie des sables a ensuite été déterminée en tamisant la même suspension sur une série de tamis de 1000, 500, 250, 100 et 50 μm . Les sols ayant > 5 % de teneur en M.O. ont été préalablement traités avec une solution de H_2O_2 . La présence de carbonate a également été traitée avec une solution d'acide acétique.

L'analyse de la stabilité des agrégats a été menée sur l'échantillon de sol non perturbé prélevé en bloc de sol d'horizon de surface (Ap1). La méthode multi-tamis avec barattage dans l'eau a été utilisée (Angers et al., 2007). Environ 100 g de sol humide tamisé à 8 mm a été prélevé puis déposé sur le premier tamis d'une suite de tamis de 4, 2, 1, 0,5 et 0,25 mm (w_i). Les tamis ont été immergés dans l'eau puis agités pendant 10 minutes. Une fois le barattage terminé, le contenu de chaque tamis a été transvidé dans un erlenmeyer puis séché à 105°C pour obtenir les poids de chaque grosseur d'agrégats (w_{2i}). Un volume de 5 ml de solution défloculante d'hexamétaphosphate de sodium a été ajouté à chaque erlenmeyer et complété à un volume de 50 ml avec de l'eau déminéralisée avant agitation pendant 45 minutes. Le contenu de chaque erlenmeyer a été déposé dans son tamis respectif pour récupérer les graviers, sables et détritiques, et ensuite séchés et pesés. La masse de détritiques obtenue (w_{3i}) est soustraite à la masse de chaque grosseur d'agrégats (w_{2i}). La proportion de chaque grosseur d'agrégats ASE_i est rapportée sur la somme des masses de chaque grosseur d'agrégats avec la formule qui suit :

$$ASE_i = \frac{w_{2i} - w_{3i}}{\frac{w_1}{1 + eg} - \sum_{i=1}^n w_{3i}}$$

où : ASE_i correspond à la proportion d'agrégats stables obtenus sur chaque tamis i ,
 $i = 1, 2, 3, \dots, n$ correspond à chaque tamis,
 eg correspond à la teneur en eau gravimétrique.

Le diamètre pondéré des agrégats stables (DMP) est calculé en fonction des fractions d'agrégats obtenus sur chaque tamis lors de la précédente analyse, selon la formule suivante (Carter et Gregorich, 2008):

$$DMP = \sum_{i=1}^n x_i ASE_i$$

où : $i = 1, 2, 3, \dots, n$ correspond à chaque tamis,
 x_i correspond au diamètre moyen des agrégats, soit la moyenne de la grosseur du tamis sur lequel sont retenus les agrégats et du tamis supérieur.

La masse volumique apparente (MVA) a été mesurée sur trois cylindres de sol prélevés au champ. Une première mesure de MVA a été prise avec deux de ces cylindres prélevés au champ puis rapportés en vrac pour analyse de la masse volumique apparente au laboratoire. Le sol a été séché à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante et pesé. Le sol a ensuite été tamisé à 8 mm et 2 mm et les fractions pesées pour établir les proportions de graviers et débris plus grands que 8 et 2 mm respectivement. La MVA a été calculée avec la masse totale de sol sec sur le volume des deux cylindres. Une deuxième mesure de MVA a été effectuée sur le troisième cylindre de sol non perturbé et rapporté intact au laboratoire sur lequel des mesures de porosité totale et de teneur en eau à 10 kPa ont été réalisées aux préalables et décrites au paragraphe suivant. À la fin de ces mesures, le sol a été séché à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante et pesé. La MVA a été calculée avec la masse totale de sol sec sur le volume du cylindre. Une MVA moyenne a été calculée avec la MVA des deux cylindres en vrac et la MVA du cylindre non perturbé rapporté au laboratoire.

La teneur en eau volumétrique à saturation et la teneur en eau volumétrique après équilibre sur une plaque de tension à 10 kPa a été mesurée sur un cylindre de sol non perturbé rapporté intact au laboratoire. Le cylindre de sol a été entreposé au frais ensaché de façon hermétique jusqu'à sa préparation. Au laboratoire, le sol a été égalisé pour correspondre au volume du cylindre et pesé humide. La porosité totale est définie comme étant la teneur en eau à saturation. La macroporosité a été définie comme étant la différence des teneurs en eau à saturation et 10 kPa de tension. La teneur en air au champ a été définie comme étant la différence des teneurs en eau à saturation et la teneur en eau au champ au moment de l'échantillonnage, c'est à dire celle correspondant à la pesée du cylindre de sol humide à la réception. La conductivité hydraulique saturée a été estimée au champ avec un perméamètre de Guelph (Conductivité hydraulique).

Pour la mesure du césium-137, les sols ont été séchés à 80°C puis tamisés à 2,00 mm. Les quatre échantillons prélevés au champ ont été combinés et un aliquote d'environ 1 kg de l'échantillon composite (fraction $\leq 2,00$ mm) a été compté avec un compteur gamma au laboratoire de l'IRDA.

Indicateurs de santé biologique des sols liés au carbone et à l'azote

Les teneurs en C total et en N total ont été déterminées par combustion sèche sur un analyseur LECO CN828 à une température de 950°C. Des échantillons de 0,2 g de sol broyés et tamisés au travers d'un tamis de 100 mesh ont été analysés. Les résultats de C total et N total sont rapportés en pourcentage. Le pourcentage de matière organique (% M.O.) a été obtenu en multipliant les valeurs de C par 1,724, tel que mentionné dans le Guide de référence en fertilisation (CRAAQ, 2010).

Le carbone actif a été évalué par oxydation du carbone au permanganate de potassium (KMnO_4) avec une méthode adaptée du Laboratoire de santé des sols de l'Université de Cornell (Weil et al., 2003). Environ 2,5 g de sol séché à l'air libre et tamisé à 2 mm est pesé et mis en réaction dans une solution KMnO_4 0,02 M et agité par intervalle pendant 10 minutes. La couleur violette caractéristique de la solution de KMnO_4 0,02 M diminue d'intensité de manière directement proportionnelle à la quantité de carbone oxydé. Ce dernier a été déterminé dans la solution par spectrophotométrie et l'absorbance a été mesurée à 520 nm (au lieu de 550 nm tel que réalisé à Cornell). Les résultats sont rapportés en mg de C actif / kg de sol.

L'azote potentiellement minéralisable (APM) 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 (1996). Pour déterminer les teneurs en N minéral initiales, environ 5 g de sols séchés à l'air et tamisés à 2 mm a été placé dans 25 ml de solution de KCl 2M (ratio 1:5) et agité

30 minutes. Les teneurs en N minéral ($\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_3^-$) ont été dosées par colorimétrie avec un système d'analyse automatisé *Seal Analytical AA3* sur deux canaux. Les teneurs en N minéral sont corrigées pour la teneur en eau résiduelle avec un échantillon de sol séché à 105°C. Pour l'incubation aérobie, le taux de saturation en eau de chaque sol a d'abord été évalué pour déterminer la proportion d'eau à utiliser pour réhumecter un échantillon de sol sec à 45% de son taux de saturation gravimétrique. Environ 40 g de sol séché à l'air a été réhumecté à 45% de son taux de saturation dans un bécher recouvert pour l'incubation. Un tube d'essai contenant une solution de NaOH 0,2 M a été inséré dans chaque bécher pour la détermination du dégagement de CO_2 (voir section suivante). À la fin de la période d'incubation de 14 jours, l'azote minéral a été déterminé avec la même extraction au KCl décrite précédemment et corrigé avec un échantillon de sol séché à 105°C. L'APM a été calculé en soustrayant l'azote minéral initial à l'azote minéralisé pendant la période d'incubation ($\text{N}_{14 \text{ jours}} - \text{N}_{0 \text{ jour}}$).

La respiration microbienne, ou le dégagement de CO_2 , a été déterminée en captant le CO_2 dans des tubes d'essai contenant une solution de NaOH 0,2 M et placés dans le bécher pendant l'incubation des sols pour la détermination de l'APM. Après 3 jours d'incubation (CO_2 0-3 jours), le CO_2 fixé dans un premier tube a été titré à l'acide chlorhydrique (HCl) 1N. Un deuxième tube a été placé pour déterminer la quantité de CO_2 dégagée à 14 jours d'incubation (CO_2 4-14 jours). Le dégagement de CO_2 après 14 jours d'incubation (CO_2 0-14 jours) a été calculé avec la somme des deux valeurs mesurées précédemment.

Indicateurs de la chimie-fertilité des sols

Le pH à l'eau a été déterminé sur les sols séchés à l'air libre avec une électrode dans une solution de sol et d'eau dans un ratio 1:1 pour les sols minéraux et 1:2 pour les sols organiques. Le pH tampon (SMP) a été déterminé dans un ratio de 1:2 après ajout de la solution tampon SMP à pH 7,5 et après une agitation de 15 minutes.

Les teneurs en éléments P, K, Ca, Mg, Na, B, Al, Cu, Fe, Mn et Zn ont été extraits à la solution Mehlich-3 dans un ratio sol:solution de 1:10 (3 ml de sol pesé, 30 ml de solution) (Ziadi et Tran, 2008) puis dosées par spectrométrie d'émission au plasma d'argon (ICP) (Eaton et al., 2005; Greenberg et al., 1992). Les teneurs en P, B, Al, Cu, Fe et Zn ont été rapportées en mg/kg, alors que les teneurs en K, Mg, Ca et Na extraits au Mehlich-3 ont été rapportées en cmol/kg pour estimer les teneurs en bases échangeables de la capacité d'échange cationique (CEC). L'acidité échangeable a été estimée à partir du pH tampon SMP (CRAAQ, 2010). La CEC a été estimée avec la somme des bases échangeables et de l'acidité échangeable estimée (CRAAQ, 2010).

Cadre d'interprétation des indicateurs de santé des sols utilisés

Les indicateurs ont été sélectionnés et dérivés à partir de propriétés communément analysées dans le cadre d'inventaires nationaux de santé des sols ou de troussees déployées par les laboratoires pour évaluer la santé des sols chez les producteurs. Les indicateurs devaient refléter les états physiques, de chimie-fertilité et biochimiques des sols et finalement les principaux phénomènes de dégradation auxquels font face les sols du Québec.

Les indicateurs de l'état physique des sols

L'état physique des sols a été évalué avec des indicateurs révélant l'état de la structure, les degrés de compaction et d'aération du sol, la perméabilité et la capacité de rétention de l'eau dans le sol ainsi que son niveau d'érosion.

État de la structure

L'état de la structure a été évalué en comparant le comportement des proportions d'agrégats stables retenus sur les cinq grosseurs de tamis (0,25, 0,5, 1, 2, 4 mm) ainsi que le diamètre moyen pondérés des agrégats stables

(DMP) entre les sols cultivés et les sols témoins échantillonnés dans les 10 premiers cm de l'horizon de surface (Ap1). La proportion d'agrégats supérieurs à 4 mm et le diamètre moyen pondéré des agrégats stables (DMP) ont reçu une attention particulière pour baser l'interprétation de l'état structural du sol cultivé par rapport au sol témoin. L'idée centrale derrière le choix de ces deux indicateurs est que l'obtention d'agrégats plus gros après barattage dans l'eau implique une plus grande stabilité structurale (Nimmo et Perkins, 2002). Par exemple, plus le pourcentage des agrégats supérieurs à 4 mm est élevé, plus la structure est stable. À l'inverse, un DMP réduit indique que le sol a été soumis à des phénomènes de dégradation. La stabilité des agrégats est aussi fortement influencée par le type de sol. Les agrégats étant beaucoup moins stables dans les sols sableux par rapport aux sols argileux, par exemple, il importe donc de réaliser des comparaisons entre sols similaires.

Degré de compaction

La compaction des sols cultivés a été évaluée en comparant la masse volumique apparente (MVA) et la porosité totale des sols cultivés aux sols témoins. Les valeurs de MVA critiques déterminées en fonction de la texture ont aussi servi de critère de référence (Tableau 1). Le sol cultivé est déclaré compact lorsque ses propriétés sont significativement dégradées par rapport à celles du sol témoin. La compaction est dite superficielle lorsqu'elle est observée dans l'horizon Ap (en particulier dans la deuxième partie de l'horizon Ap, soit l'horizon Ap2) et profonde lorsqu'elle se trouve dans l'horizon B.

Aération du sol et diffusion des gaz

Le degré d'aération du sol a été évalué en comparant la macroporosité et la teneur en air au champ des sols cultivés aux sols témoins. La macroporosité a été estimée par différence entre la porosité totale et la teneur en eau à 10 kPa de tension matricielle (pores > 30 µm). La teneur en air au champ a été estimée par différence entre la porosité totale et la teneur en eau au champ au moment de l'échantillonnage des sols. Le seuil généralement reconnu de 10 % ou 0,10 cm³/cm³ de macroporosité a aussi été utilisé pour qualifier les sols limitant l'aération, même si des travaux plus récents indiquent qu'un seuil de 0,14 cm³/cm³ serait plus pertinent dans les sols loameux (Reynolds et al., 2009).

La diffusivité relative des gaz dans le sol a aussi été comparée entre sols cultivés et sols témoins. Elle a été estimée avec l'équation proposée par Millington and Quirk (1961), telle que rapportée par Allaire et al. (2004) et utilisée par Vizioli et al. (2021), en utilisant la macroporosité mesurée à 10 kPa de tension matricielle et la porosité totale de chaque échantillon :

$$\frac{D}{D_0} = \frac{\varepsilon^{10/3}}{\theta_s} \quad (\text{Eq. 1})$$

où: D/D_0 est la diffusivité relative des gaz (sans dimension); ε est la macroporosité (cm³ cm⁻³) mesurée à 10 kPa de tension et θ_s est la porosité totale évaluée avec la teneur en eau à saturation (cm³ cm⁻³).

Vizioli et al. (2021) rapportent qu'une diffusivité relative des gaz (D/D_0) inférieure à 0,005 peut limiter le développement racinaire des cultures et donc sera retenue comme premier critère. À un seuil inférieur à 0,005 la diffusivité relative des gaz est suffisamment ralentie pour favoriser la production de N₂ au détriment de N₂O lors de la dénitrification, tandis qu'entre 0,005 et 0,03, la production de d'oxyde nitreux (N₂O) serait favorisée (Balaine et al., 2016; Delespesse, 2021). Le seuil de 0,03 est retenu comme deuxième critère sous lequel la dénitrification (N₂O et N₂) serait favorisée.

La tortuosité des pores (τ , sans dimension) dans les sols cultivés a été comparée à celle des sols témoins, en l'estimant à partir de la porosité totale tel que proposé par Yu et Li (2004) et utilisé par Vizioli et al. (2021) :

$$\tau = 0,5 \left(1 + 0,5\sqrt{1 - \theta_s} + \sqrt{1 - \theta_s} \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{\sqrt{1-\theta_s}} - 1\right)^2 + \frac{1}{4}}{1 - \sqrt{1-\theta_s}}} \right) \quad (\text{Eq. 2})$$

où: θ_s est la porosité totale ou la teneur en eau à saturation ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).

Teneur en eau à capacité au champ

La capacité au champ relative, ou l'espace poral occupé par l'eau, a été estimée avec la teneur en eau à 10 kPa de tension matricielle et la porosité totale (Vizioli et al., 2021; Reynolds et al., 2009), selon l'équation suivante :

$$CCr = \frac{\theta_{10kPa}}{\theta_s} \quad (\text{Eq. 3})$$

où: CCr est la capacité au champ, θ_{0kPa} est la teneur en eau ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) à 10 kPa de tension et θ_s est la porosité totale évaluée avec la teneur en eau à saturation ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).

Selon Reynolds et al. (2009), lorsque la capacité au champ relative («*relative field capacity*») se situe dans un intervalle entre 0,60 et 0,70, les sols minéraux sous régime pluvial ont des teneurs en eau et en air idéales pour la minéralisation et la production microbienne de nitrate, plus fréquemment que les sols qui présentent des ratios inférieurs ou supérieurs.

Circulation de l'eau dans le sol

La circulation de l'eau dans le sol a été évaluée au champ par des mesures de conductivité hydraulique en régime saturé avec le perméamètre de Guelph à deux profondeurs (15 et 45 cm) (Reynolds, 2007) La conductivité hydraulique peut être évalué en régime saturé ou non, de diverses manières et à diverses profondeurs selon le diagnostic recherché (voir chap. 75 à chap. 84 dans Carter et Gregorich, 2007). La conductivité hydraulique est plus rarement utilisée comme indicateur de qualité ou de santé des sols dans les inventaires régionaux ou dans les trousse de santé des sols fournies aux producteurs comme le CASH (Fine et al., 2016). La conductivité hydraulique saturée mesurée avec l'infiltromètre de Côté a permis de qualifier la circulation de l'eau dans les différents horizons de sols cultivés de l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols du Québec (Tabi et al., 1990). Certains pays d'Europe l'utilisent pour qualifier les risques de compaction des sols, l'Allemagne utilisant un seuil de 10 cm/j et la Finlande de 24 cm/j pour qualifier ces risques de compaction (van Beek et Toth, 2012). Au Québec, la pose de drain agricole n'a été pas recommandée dans un sol dont la conductivité hydraulique était inférieure à 3 cm/j, car jugée inefficace ou non rentable (Laberge et al., 2005). Dans les sols organiques, une conductivité hydraulique supérieure à 100 cm/j serait considérée optimale pour la production agricole (Lévesque et Mathur, 1988). Dans le cadre de l'EESQAQ, la comparaison de la conductivité hydraulique saturée entre sols cultivés et sols témoins, de même qu'un seuil de 10 cm/j pour les sols minéraux et 100 cm/j pour les sols organiques ont été utilisés pour interpréter la capacité de l'eau à circuler dans le sol.

Érosion hydrique

L'importance de l'érosion hydrique a été évaluée en comparant l'inventaire en césium-137 (Bq m⁻²) des sites échantillonnés au niveau résiduel des retombées historiques de cet isotope estimées au même endroit. La différence d'inventaire a été traduite en perte de sol en utilisant le modèle *Mass Balance Model 1* de Walling et al. (2014) :

$$M = -Cl \frac{1}{R} \left(1 - \frac{N_s}{N_o} \right)^{1/n} \quad (\text{Eq. 4})$$

où M = mouvement de sol (t/ha/an), ajusté au 01-01-2019,

Cl = Masse de sol dans la couche de labour (t/ha),

R = coefficient d'enrichissement du sol érodé/déposé en ¹³⁷Cs : 3 en sol minéral, 2 en sol organique,

N_s = activité spécifique du sol en ¹³⁷Cs (Bq m⁻²) telle que mesurée au champ,

N_o = valeur résiduelle des retombées de ¹³⁷Cs (Bq m⁻²),

n = nombre d'années entre 2019 et le pic de retombées (1963) : 56.

La mesure de la masse volumique et de l'épaisseur des horizons Ap1 et Ap2 a permis le calcul de la masse de la couche de labour. La teneur du sol en ¹³⁷Cs (Bq kg⁻¹), le poids total de l'échantillon composite de sol (kg) et la surface de sol échantillonnée par la sonde (m²) ont servi à calculer l'inventaire moyen de ¹³⁷Cs des champs étudiés (Bq m⁻²). Cette dernière valeur correspond à la variable N_s de l'équation.

L'érosion hydrique des sols cultivés a été comparée à celle des sols témoins. Un niveau de référence de 6 t/ha/an de perte de sol, considéré comme acceptable au Canada, a aussi été utilisé pour qualifier l'érosion de sols (Wall et al., 2002).

Les indicateurs de la santé biologique des sols liés au carbone et à l'azote

Teneur en matière organique et stock de C

Les teneurs en matière organique (M.O.) (%) et en C (%) ainsi que le bilan de masse de C (Mg/ha) du sol sont trois indicateurs qui ont été utilisés pour qualifier les sols cultivés par rapport aux sols témoins. Les deux premiers sont des mesures de concentration, tandis que le troisième est un bilan de masse surfacique réalisé dans le profil de sol à partir de la teneur en C total, de la masse volumique apparente et de la profondeur des trois horizons Ap1, Ap2 et B. Des critères d'interprétation basés sur les niveaux recommandés dans les rapports pédologiques comme l'Étude pédologique des sols défrichés de l'Abitibi-Témiscamingue (1997) ont également été utilisés pour qualifier les teneurs en M.O. dans les horizons Ap1 et Ap2 (Tableau 3). Une valeur-seuil de 2 % de C a aussi été utilisée pour qualifier l'état des sols, de même que la valeur-seuil de 4 % de M.O. visé par le Plan d'agriculture durable du MAPAQ (2020).

Carbone actif

Les teneurs en carbone actif mesurées dans les horizons Ap1, Ap2 et B des sols cultivés ont été comparées à ceux des sols témoins. Des niveaux plus faibles en carbone actif reflètent une réduction de la source de C facilement assimilable par les microorganismes et donc une dégradation de la santé biologique du sol. Aucun autre critère n'a été retenu pour qualifier la teneur en carbone actif.

L'azote minéralisable et la respiration du sol

L'azote minéralisable et la respiration du sol sont deux autres indicateurs qui ont été retenus pour évaluer la santé biologique du sol.

Azote minéralisable

L'azote minéralisé après 14 jours d'incubation en condition aérobie provenant des horizons Ap1, Ap2 et B des sols cultivés a été comparé à celui des sols témoins. Des niveaux plus faibles de N minéralisé reflètent une réduction de la capacité du sol à fournir de l'azote aux cultures et donc une dégradation de la santé biologique du sol. Le ratio N minéralisé : N organique a également été retenu pour comparer les sols cultivés aux sols témoins.

Respiration du sol

La respiration hétérotrophe (RH) du sol ou la quantité de CO₂ dégagée après 14 jours d'incubation en condition aérobie, provenant des horizons Ap1, Ap2 et B des sols cultivés a été comparée à celle des sols témoins. Des niveaux plus faibles en RH reflètent une réduction de la capacité du sol à fournir de l'azote aux cultures et donc une dégradation de la santé biologique du sol. Aucun autre critère n'a été retenu pour qualifier la RH.

Les indicateurs de chimie-fertilité des sols

Les indicateurs de chimie-fertilité des sols retenus dans le cadre de l'EESSAQ incluent ceux reliés à la réaction du sol (acidité), la capacité d'échange cationique et la disponibilité des éléments nutritifs pour les cultures. Puisque les sols témoins devaient provenir de sols au repos sous plantes pérennes, souvent sans activité agricole récente, pour servir de référence en termes de qualité physique et de teneur en matière organique optimale, ils sont souvent inappropriés pour évaluer l'état de la chimie-fertilité des sols cultivés. Des critères définis à partir de ceux présentés dans le Guide de référence en fertilisation (CRAAQ, 2010) et dans les rapports pédologiques, comme dans l'Étude pédologique des sols en culture des comtés de Matane et Matapédia (Leblanc et Gagné, 2017) (voir Tableau 5 à Tableau 9) ont donc été utilisés pour interpréter l'acidité, la capacité d'échange cationique (CEC), la saturation en bases et les niveaux d'éléments extraient en solution Mehlich-3. Le Tableau 13 synthétise les critères d'interprétation précédemment rapportés en cinq classes permettant d'interpréter les différents indicateurs de chimie-fertilité en termes absolus.

Tableau 13 : Critères d'interprétation pour la réaction (pH eau), les éléments extraits à la solution Mehlich-3, les bases échangeables et la capacité d'échange cationique (CEC).

Indicateurs	Unité	Niveaux				
		Très faible	Faible	Modéré	Élevé	Très élevé
pH eau	mg/kg	< 5,4	5,5 - 6,0	6,1 - 7,3	7,4 - 8,4	> 8,5
P M3	mg/kg	< 20	20-55	55-90	90-125	≥ 125
Al M3	mg/kg	< 1100		1100 - 1600		≥ 1600
Fe M3	mg/kg	----- n.d. -----				
Mn M3	mg/kg	< 25	25 -50	50 -75	75-99	> 99
B M3	mg/kg	----- n.d. -----				
Cu M3	mg/kg	< 1,1	1,1 - 1,8	1,8 - 2,8	2,8 - 9,0	>9,0
Zn M3	mg/kg	< 1,2	1,2-1,9	1,9- 3,0	3,0 - 14,0	> 14,0
K M3	cmol/kg	< 0,13	0,13-0,26	0,26-0,45	0,45-0,58	≥ 0,58
Na M3	cmol/kg	< 0,07	0,07-0,15	0,15-0,3	0,3-0,59	≥ 0,59
Ca M3	cmol/kg	< 3	3-9,5	9,5-16	16-22,5	≥ 22,5
Mg M3	cmol/kg	< 0,41	0,41-1,65	1,65-2,88	2,88-4,12	≥ 4,12
(K+Na)/(Ca+Mg)	cmol/kg	----- n.d. -----				
CEC	cmol/kg	< 6,0	6,0 - 12,0	12,0 - 25,0	25,0 - 40,0	≥ 40
Saturation en bases	%	< 20	20 – 40	40 – 60	60-80	≥ 80

Tiré du Guide de référence en fertilisation (CRAAQ, 2010) et de l'Étude pédologique des sols en cultures des comtés de Matane et Matapédia (Leblanc et Gagné, 2017).

Bilans de masse

Des bilans de masse surfacique ont été calculés en intégrant les teneurs en C total et en P, K, Zn et Cu extraits à la solution Mehlich-3, la profondeur des horizons dans lesquels les échantillons ont été prélevés et la masse volumique apparente (MVA) de ces mêmes horizons. Les teneurs sur base massique de sol (mg/kg par exemple) sont ainsi converties en masse par unité de surface (kg/ha par exemple). Le mouvement de sol calculé avec l'inventaire de Cs-137 représente une masse par unité de surface évoluant sur une base annuelle (tm/ha/an). Ces bilans de masse ont permis de comparer et de qualifier comment les profils de sols cultivés ont évolué par rapport aux sols témoins.

Le Tableau 14 liste sommairement les principaux indicateurs utilisés pour évaluer la santé des sols.

Tableau 14 : Principaux indicateurs utilisés pour évaluer la santé des sols.

Composantes de la santé du sol	États du sol ou phénomènes de dégradation	Indicateurs	Interprétation
Physique	État de la structure	Stabilité des agrégats (DMP; agrégats 4-8 mm; agrégats 2-4 mm; agrégats 1-2 mm; agrégats 0,5-1 mm; agrégats 0,25-0,5 mm)	DMP réduit par rapport aux sols témoins = dégradation de la structure, Pourcentage de macro-agrégats (1-8 mm) plus élevé = meilleure structure.
	Degré de compaction	Masse volumique apparente et porosité totale	Augmentation significative de la MVA et de la porosité totale par rapport aux sols témoins : compaction du sol.
	Aération du sol et diffusion des gaz	Macroporosité et teneur en air au champ. Coefficients de diffusivité des gaz calculés.	Diminution de la macroporosité et des coefficients de diffusivité des gaz par rapport au témoin: réduction de l'aération et de la diffusion des gaz.
	Disponibilité de l'eau	Teneur en eau à capacité au champ, teneur en eau au champ et teneurs en eau relatives	Diminution de la capacité au champ par rapport au témoin.
	Circulation de l'eau	Conductivité hydraulique saturée	Diminution de la conductivité hydraulique saturée par rapport aux sols témoins = réduction de la perméabilité et de la circulation de l'eau dans le sol.
	Niveau d'érosion du sol	Inventaire de Cs	Perte nette de sol inférieure au seuil tolérable de 6 t/ha/an = érosion importante des sols.
Chimie - fertilité	Niveau d'acidité	pH _{eau} et pH _{tampon}	Basée sur des niveaux de référence et sur la comparaison avec les sols témoins.
	Capacité d'échange cationique et bases échangeables	Saturation en bases échangeables, CEC calculée	Basée sur des niveaux de référence et sur la comparaison avec les sols témoins.
	Disponibilité ou excès en éléments minéraux	Teneur en éléments minéraux (P, K, Ca, Mg, Al, Mn, Zn, Cu, B, Fe), Ratio (Na, K) : (Ca, Mg); Indice de saturation en P	Basée sur des niveaux de référence et sur la comparaison avec les sols témoins.
Biochimie - minéralisation de C et N	Suffisance en matière organique	Teneur en M.O., stock de C	Basée sur des niveaux de référence et sur la comparaison avec les sols témoins.
	Disponibilité de M.O. labile	C actif	Importance de la réserve en C facilement oxydable des sols cultivés par rapport aux sols témoins.
	Activité biologique	Respiration hétérotrophique (dégagement de CO ₂)	Importance de la respiration des sols cultivés par rapport aux sols témoins.
	Capacité du sol à minéraliser de l'azote	N minéralisable	Capacité des sols cultivés à minéraliser l'azote par rapport aux sols témoins.

Traitements statistiques

Pour déterminer l'effet de cultiver les sols (sites cultivés vs témoins) sur les indicateurs de l'état de santé des sols retenus, les modèles linéaires généralisés mixtes ont été utilisés afin de prendre en compte la structure hiérarchique (nichée) des données. En effet, les indicateurs de santé de sols ont été mesurés à quatre endroits (points d'échantillonnage ou PE) répartis sur un même site, de type cultivé ou témoin, appartenant à une série de sol à l'intérieur d'un groupe de séries. Dans ce cas, la variation résiduelle des indicateurs (non-expliquée par l'effet sol cultivé ou non et l'horizon d'échantillonnage) n'est pas indépendante d'une observation à une autre. En particulier, les mesures effectuées sur des échantillons provenant d'un même site sont plus similaires que celles provenant de sites différents, en raison des conditions particulières imposées au niveau du site (historique des pratiques agricoles, sol, climat) qui ne sont pas imposées de la même façon entre les sites. La variabilité entre les sites et celle entre les points d'échantillonnage ont été intégrées dans l'analyse en modélisant les effets aléatoires *site niché dans type d'occupation du sol* et *PE niché dans site* selon l'équation suivante :

$$g(Y) \sim \text{Intercept} + \beta_1 X_{\text{Type}} + \beta_2 \dots X_{\text{HZN}} + \beta_3 \dots X_{\text{Type}} \cdot X_{\text{HZN}} + \alpha_i + \alpha_j + \varepsilon$$

Où :

- $g(Y)$: une fonction de l'indicateur de santé des sols,
- *Intercept* : une constante représentant la valeur moyenne de l'indicateur mesuré lorsque l'influence des variables explicatives (*Type*, *HZN*) est nulle,
- β_1 : coefficient de l'influence du type d'occupation du sol sur l'indicateur mesuré,
- X_{Type} : représente l'effet fixe du type d'occupation de sol,
- β_2 : coefficient de l'influence de l'horizon sur l'indicateur de santé des sols Y ,
- X_{HZN} : représente l'effet fixe de l'horizon d'échantillonnage du sol,
- β_3 : coefficients de l'interaction entre le type d'occupation du sol et l'horizon d'échantillonnage,
- $X_{\text{Type}} \cdot X_{\text{HZN}}$: représente l'effet fixe de l'interaction entre le type d'occupation du sol et l'horizon d'échantillonnage,
- α_i : effet aléatoire (déviations) du site niché dans le type d'occupation du sol,
- α_j : effet aléatoire (déviations) du PE niché dans site,
- ε : variation aléatoire de l'indicateur dont la distribution dépend du type de mesure.

La manipulation et l'analyse finales des données ont été réalisées dans l'environnement de programmation *R* pour les statistiques (R Core Team, 2021). De façon générale, les indicateurs retenus ont été bien décrits par l'un des trois types de distribution suivants : Gaussienne ou normale (DMP), Gamma ou logarithmique (C actif, macroporosité, MVA, P, etc.) et Beta (C, N). Après inspection des résidus, la distance de Cook a été utilisée pour estimer l'influence des valeurs extrêmes sur le modèle. Les observations se trouvant à une distance supérieure à 1 ont été déclarées problématiques et exclues de l'analyse. Les modèles ont été implémentés dans l'environnement *R* en utilisant la fonction *glmmTMB* issue de la librairie du même nom. La validité des modèles a été vérifiée en inspectant les résidus avec la fonction *simulateResiduals* de la librairie *DHARMA*. Les comparaisons entre les sols témoins et cultivés au niveau des trois horizons d'échantillonnage ont été soumises au test de Tukey (HSD) avec la fonction *pairs* de la librairie *emmeans* de *R*. La moyenne d'un indicateur de santé des sols sur sites cultivés est considérée significativement différente de celle des sites témoins lorsque la probabilité de *P* est inférieure à 0,10.

ÉTAT DES SOLS CULTIVÉS PAR GROUPE DE SÉRIES DE SOLS

Sols argileux

Au Québec, les sols argileux ont une fertilité naturellement élevée, liée à la réaction (pH) neutre du sol, ainsi qu'à une capacité d'échange cationique et une teneur en bases échangeables élevées (Lavoie et al., 1999). Ils sont toutefois considérés naturellement mal drainés, nécessitant la plupart du temps du drainage souterrain. Ils sont situés dans les zones de basses terres des régions pédologiques de la Plaine de Montréal (A1), de la Plaine littorale et les îles du Saint-Laurent (A2), de la Plaine du Lac-Saint-Jean (A3), de la Plaine de l'Abitibi (D1) et des Hautes-terrasse du Saint-Laurent (A4) (Figure 5).

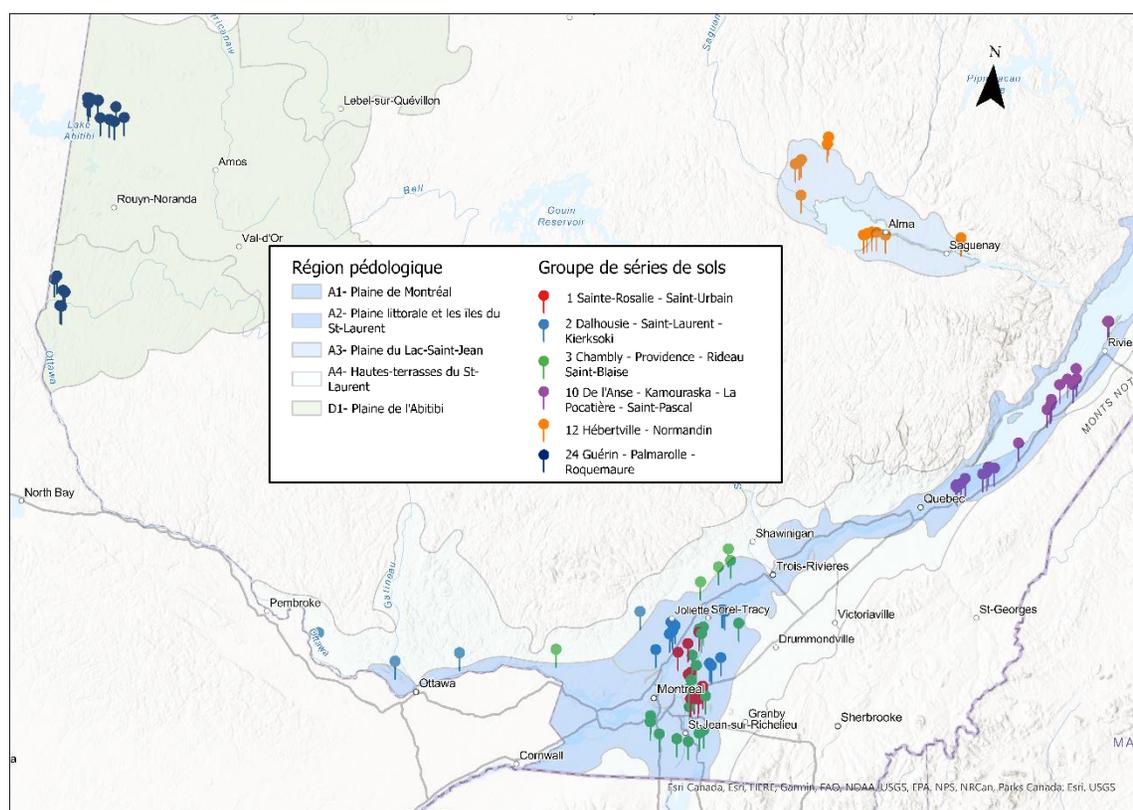


Figure 5 : Situation géographique des sites échantillonnés dans les sols issus de matériaux argileux et leurs régions pédologiques.

Dans l'EESSAQ, les sols argileux sont représentés par 18 séries de sols. Ces séries ont été regroupées en six groupes de séries de sols, en fonction principalement de la région pédologique dominante, de la granulométrie du matériau parental, de l'origine ou mode de dépôt (type de dépôt) du matériau parental et de la perméabilité (Tableau 15). Dans la région pédologique de la Plaine de Montréal, la perméabilité liée au type de dépôt du matériau parental de ces sols a aussi été utilisée pour séparer les sols plus perméables du groupe 1, des sols du groupe 3.

Tableau 15 : Caractéristiques définissant les groupes de séries de sols argileux.

Groupe	Série de sols	Granulométrie du matériau parental	Type de dépôt	Perméabilité	Région pédologique dominante
1	Sainte-Rosalie*	Argileux-très fin	Marin	Rapide	Plaine de Montréal
	Saint-Urbain*	Argileux-très fin	Marin	Rapide	Plaine de Montréal
2	Saint-Laurent*	Argileux (lité)	Fluviatile	Lente	Plaine de Montréal
	Kierkoski	Argileux-fin (stratifié)	Lacustre	Modérée	Plaine de Montréal
	Dalhousie*	Argileux-fin	Glacio-lacustre	Modérée	Hautes-terrasses du Saint-Laurent
3	Providence*	Argileux-très fin	Fluviatile	Lente	Plaine de Montréal
	Rideau*	Argileux-très fin	Fluviatile	Lente	Plaine de Montréal
	Chambly	Argileux-fin	Glacio-lacustre	Lente	Plaine de Montréal
	Saint-Blaise*	Argileux-fin sur loameux-fin	Fluviatile sur till	Lente	Plaine de Montréal
10	De l'Anse*	Argileux-fin	Alluvion récente	Modérée	Plaine littorale et les îles du Saint-Laurent
	Kamouraska*	Argileux-fin	Estuarien	Lente	Plaine littorale et les îles du Saint-Laurent
	La Pocatière*	Argileux-fin	Estuarien	Modérée	Plaine littorale et les îles du Saint-Laurent
	Saint-Pascal*	Argileux-fin	Estuarien	Modérée	Plaine littorale et les îles du Saint-Laurent
12	Hébertville*	Argileux-fin	Marin	Modérée	Plaine du Lac-Saint-Jean
	Normandin*	Argileux-fin	Marin	Lente	Plaine du Lac-Saint-Jean
24	Guérin*	Argileux-très fin	Glacio-lacustre	Modérée	Plaine de l'Abitibi
	Palmarolle*	Argileux-très fin	Glacio-lacustre	Modérée	Plaine de l'Abitibi
	Roquemaure*	Argileux-très fin	Glacio-lacustre	Modérée	Plaine de l'Abitibi

*Série de sols évaluée dans le cadre de l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec (Tabi et al., 1990).

Groupe 1 : Séries Sainte-Rosalie et Saint-Urbain

Les séries de sols Sainte-Rosalie et Saint-Urbain se sont développées sur un matériau argileux très-fin (> 60 % d'argile) d'origine marine, leur conférant une bonne capacité à se structurer et une meilleure perméabilité par rapport aux autres séries de sols développées sur matériau argileux dans la Plaine de Montréal (groupe 2 et 3).

Tableau 16 : Caractéristiques des sols du groupe 1 (Sainte-Rosalie et Saint-Urbain).

Caractéristiques	Sainte-Rosalie (SSL)	Saint-Urbain (SUB)
Granulométrie du matériau, réaction	Argileux-très fin, neutre	Argileux-très fin, alcalin
Type de dépôt	Marin	Marin
Classe de drainage	Mauvais	Mauvais
Perméabilité	Rapide	Rapide
Groupe hydrologique	C	B
Taxonomie (sous-groupe)	Gleysol humique orthique	Gleysol humique orthique
Superficie cartographiée (ha)	197 128	41 660

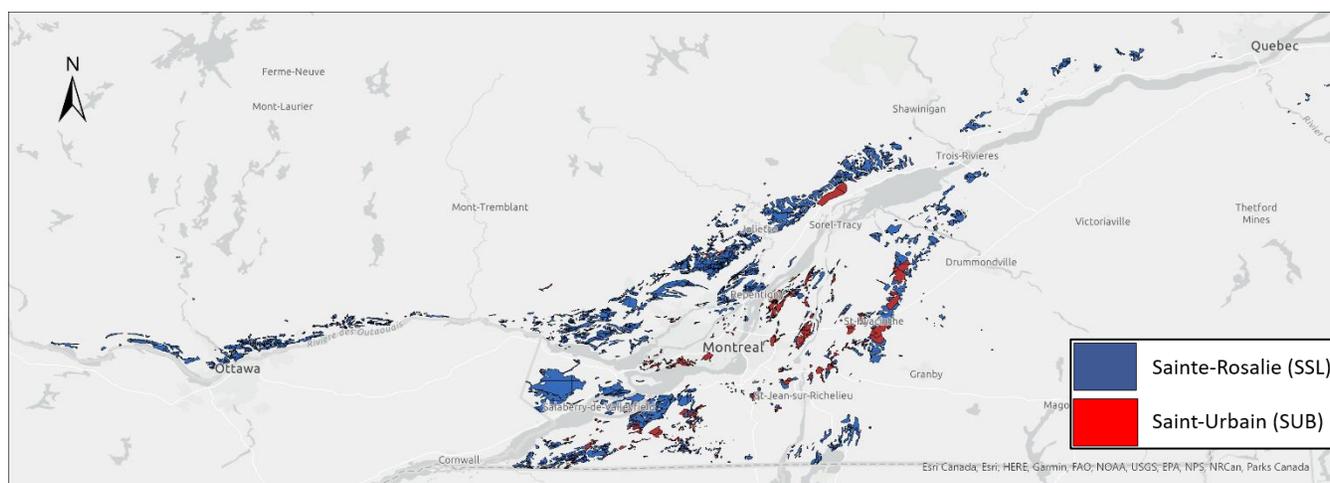


Figure 6 : Répartition géographique des sols du groupe 1 (Sainte-Rosalie et Saint-Urbain).

Une augmentation significative de la masse volumique apparente et une diminution significative de la porosité totale dans l'horizon Ap1 des sols cultivés indiquent qu'ils sont plus compacts en surface (Tableau 17). De plus, une baisse significative de la macroporosité et de la teneur en air dans les trois horizons des sols cultivés, sous le seuil de $0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, indique un manque d'aération par rapport aux sols témoins. La tortuosité des pores significativement plus élevée dans les horizons Ap1 et Ap2 des sols cultivés, de même que la diffusivité relative des gaz plus faible et inférieure à 0,005 dans les trois horizons des sols cultivés indiquent aussi des conditions limitantes pour les échanges gazeux par rapport aux sols témoins. La capacité au champ relative plus élevée et supérieure à 0,7 dans les trois horizons des sols cultivés indique des quantités d'eau en excès favorisant des processus anaérobies. La conductivité hydraulique saturée est significativement plus faible à 15 cm et à 40 cm de profondeur dans les sols cultivés par rapport aux témoins et sous le seuil de 10 cm/jour à 40 cm de profondeur, indiquant une circulation réduite de l'eau à cette profondeur. Un plus petit diamètre moyen pondéré des agrégats

(DMP), ainsi qu'une plus faible proportion d'agrégats supérieurs à 2 mm dans les sols cultivés indiquent une dégradation de la structure de ces sols.

Tableau 17 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 1 (Sainte-Rosalie et Saint-Urbain).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
Nombre d'observations	56	16	55	16	56	16
Sable (%)	7	5	5	4	3	1
Limon (%)	30	26	30	25	25	21
Argile (%)	63	69	65	71	72	78
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,29	1,19	1,39	1,31	1,42	1,40
Porosité totale (cm ³ /cm ³)	0,514	0,580	0,481	0,526	0,483	0,508
Macroporosité (cm ³ /cm ³)	0,088	0,188	0,052	0,131	0,040	0,074
Teneur en air au champ (cm ³ /cm ³)	0,116	0,284	0,065	0,194	0,056	0,129
Tortuosité des pores τ (—)	1,441	1,351	1,497	1,423	1,499	1,452
Diffusivité relative des gaz D/D0 (—)	0,002	0,012	0,000	0,005	0,000	0,001
Capacité au champ relative (—)	0,831	0,677	0,893	0,753	0,917	0,852
K _{sat} (cm/jour)			41,8	310,2	1,0	22,3
Diamètre moyen pondéré des agrégats (mm)	3,38	4,49				
Agrégats 4-8mm (%)	48,6	64,0				
Agrégats 2-4mm (%)	11,9	15,7				
Agrégats 1-2mm (%)	6,7	7,7				
Agrégats 0,5-1mm (%)	4,4	3,3				
Agrégats 0,25-0,5mm (%)	1,9	0,9				

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

K_{sat} : Conductivité hydraulique saturée mesurée à 15 cm (Ap2) et 40 cm de profondeur (B).

Les pertes de sol par érosion indiquées par le mouvement net de sol au Tableau 18 sont significativement plus élevées dans les sols témoins par rapport aux sols cultivés et elles dépassent le seuil d'érosion de 6 t/ha/an tolérable pour la plupart des sols au Canada. Deux sites témoins choisis sous des haies brise-vent accusaient des mouvements de sols particulièrement élevés (-16,9 et -42,1 t/ha/an), sans raison apparemment liée à une érosion récente des sols.

Tableau 18 : Bilans de masse des sols du groupe 1 (Sainte-Rosalie et Saint-Urbain).

Descripteurs	Cultivé	Témoin
Profondeur (cm)	47	48
Mouvement net de sol (t/ha/an)	-6,1	-16,1
C _{total} (t/ha)	121	92
C _{M3} (kg/ha)	46	29
K _{M3} (kg/ha)	1 741	1 525
P _{M3} (kg/ha)	285	73
Zn _{M3} (kg/ha)	17,2	13,2

Les valeurs en gras indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10 entre sols cultivés et témoins.

Profondeur : correspond à la profondeur de l'horizon Ap plus 15 cm dans le B.

La teneur en matière organique n'est pas significativement différente entre sols cultivés et témoins (Tableau 19). Selon les critères utilisés par Tabi et al. (1991) pour des sols à texture lourde, elle est de niveau élevé dans l'Ap1 et modéré dans l'Ap2 des sols cultivés. Elle a aussi tendance à être plus élevée dans l'horizon Ap2 des sols cultivés par rapport aux témoins. La teneur en C est quant à elle légèrement au-dessus du seuil de 2 %. Les quantités de CO₂ dégagées et de N minéralisé après une incubation de 14 jours sont plus faibles dans les horizons Ap des sols cultivés indiquant une diminution des sources de C et N disponible et de l'activité biologique par rapport aux sols témoins.

Tableau 19 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 1 (Sainte-Rosalie et Saint-Urbain).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
M.O. (%)	4,19	3,98	3,68	2,90	1,64	1,23
C total (%)	2,43	2,31	2,13	1,68	0,95	0,71
N organique (mg/kg)	2 050	2 150	1 815	1 594	893	822
Ratio C/N	11,8	11,1	11,8	10,7	10,4	8,3
C actif (mg/kg)	520	495	435	362	197	158
Ratio C actif/C total (mg/g)	21,4	21,1	20,5	20,9	21,5	22,0
CO ₂ dégagé 14 jours (mg/kg)	330	656	255	423	174	222
N minéralisé 14 jours (mg/kg)	32,3	48,7	25,8	27,3	10,2	5,6
Ratio N minéralisé/N org. (mg/g)	16,2	22,0	14,5	16,6	10,1	6,5

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

M.O. : matière organique du sol estimée avec C total Leco et un facteur de 1,724.

N organique : N total Leco moins N minéral.

Ratio C/N : C total Leco divisé par N total Leco.

Le pH des sols cultivés n'est pas différent de celui des sols témoins. Les niveaux de pH mesurés (cultivés et témoins) varient de neutres à faiblement alcalins (Tableau 20). La teneur en bases échangeables des sols cultivés n'est pas statistiquement différente de celle des témoins, avec des niveaux variant de faibles à modérés (Na et Ca) à très élevés (K et Mg). La teneur en P est significativement plus élevée dans les trois horizons des sols cultivés; ce qui se traduit par des bilans de masse dans le profil quatre fois plus élevés que dans les témoins (Tableau 18). Il résulte de cet enrichissement en P un niveau de saturation dans l'horizon Ap1 supérieur à la valeur critique agroenvironnementale de 6 % pour les sols du groupe G1a (Argile ≥ 60 %) (Tableau 20). Les sols cultivés ont des teneurs plus élevées en Cu sur tout le profil par rapport aux témoins (Tableau 18 et Tableau 20). Pour les autres éléments mineurs, il n'y a pas de différences entre les sols cultivés et témoins, les teneurs en Mn demeurent très faibles sur tout le profil, les teneurs en B sont faibles, tandis que les teneurs en Zn varient de niveau faible dans l'horizon B à élevé dans l'Ap1.

Tableau 20 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 1 (Sainte-Rosalie et Saint-Urbain).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
pH	6,7	6,4	6,8	6,5	7,2	7,1
pH _{SMP}	6,7	6,6	6,7	6,7	6,9	6,9
P _{M3} (mg/kg)	67,0	22,5	48,1	13,1	14,3	4,9
Al _{M3} (mg/kg)	986,0	873,4	1 000,3	935,2	1 031,5	993,8
Fe _{M3} (mg/kg)	291,9	227,5	293,4	238,7	240,9	183,7
ISP (%)	6,7	2,6	4,8	1,4	1,4	0,5
Mn _{M3} (mg/kg)	16,5	17,8	14,8	17,8	20,1	35,2
B _{M3} (mg/kg)	0,5	0,38	0,46	0,29	0,28	0,2
Cu _{M3} (mg/kg)	7,20	4,64	6,97	4,57	5,79	4,09
Zn _{M3} (mg/kg)	3,82	3,17	2,85	2,23	1,58	1,33
K _{M3} (cmol/kg)	0,792	0,765	0,663	0,626	0,603	0,612
Na _{M3} (cmol/kg)	0,107	0,125	0,138	0,184	0,238	0,340
Ca _{M3} (cmol/kg)	16,1	13,5	16,2	13,2	15,6	13,4
Mg _{M3} (cmol/kg)	4,66	6,31	5,09	7,02	7,50	9,52
(K+Na)/(Ca+Mg)	0,047	0,046	0,039	0,041	0,036	0,042
CEC (cmol/kg)	29,1	28,7	28,9	28,6	29	29,1
Sat. bases (%)	74,4	72,1	76	73,2	81,9	81,6

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

ISP : indice de saturation en phosphore.

CEC : capacité d'échange cationique.

M3 : extrait Mehlich-3.

Niveau d'interprétation (sauf Fe, B, ISP et (K+Na)/(Ca+Mg))

Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
-------------	--------	-------	-------	------------

Synthèse de l'état de santé des sols du groupe 1 (Sainte-Rosalie et Saint-Urbain).

Problèmes de dégradation observés dans les sols cultivés

- Les sols sont plus compacts dans l'horizon Ap1.
- L'aération et les conditions pour les échanges gazeux sont limitantes dans les trois horizons.
- Les quantités d'eau en excès favorisent des processus anaérobies dans les trois horizons.
- La circulation de l'eau est réduite à 15 et 40 cm de profondeur.
- La structure est dégradée dans l'horizon Ap1.
- La teneur en matière organique n'est pas différente entre sols cultivés et témoins. Elle est de faible niveau, mais la teneur en C est légèrement au-dessus du seuil de 2 %.
- La respiration et la quantité d'azote minéralisable sont plus faibles dans l'horizon Ap1.
- Les teneurs en P et en Cu sont plus élevées dans les horizons Ap1, Ap2 et B.
- L'indice de saturation en P est supérieur à 6 % dans l'horizon Ap1.
- Les autres indicateurs de chimie-fertilité ne sont pas différents entre sols cultivés et témoins.
- Les bilans de masse indiquent un enrichissement en P et Cu dans le profil.

Groupe 2 : Séries Saint-Laurent, Kierkoski et Dalhousie

Les séries Saint-Laurent, Kierkoski et Dalhousie se sont développées sur un matériau argileux-fin (40 à 60 % d'argile) parfois stratifié ou lité et sont situées à la fois sur la rive-nord et la rive-sud du fleuve Saint-Laurent. Les sols de ces séries ont une moins bonne perméabilité que les sols du groupe 1 (Figure 7).

Tableau 21 : Caractéristiques des sols du groupe 2 (Saint-Laurent, Kierkoski et Dalhousie).

Caractéristiques	Saint-Laurent (SIE)	Kierkoski (KRY)	Dalhousie (DHU)
Granulométrie du matériau, réaction	Argileux (lité), alcalin	Argileux-fin (stratifié), alcalin	Argileux-fin, neutre
Type de dépôt	Fluviatile	Lacustre	Glacio-lacustre
Classe de drainage	Mauvais	Mauvais	Mauvais
Perméabilité	Lente	Modérée	Modérée
Groupe hydrologique	C	C	C ou D
Taxonomie (sous-groupe)	Gleysol humique orthique	Gleysol humique orthique	Gleysol humique orthique
Superficie cartographiée (ha)	16 712	9 025	37 681

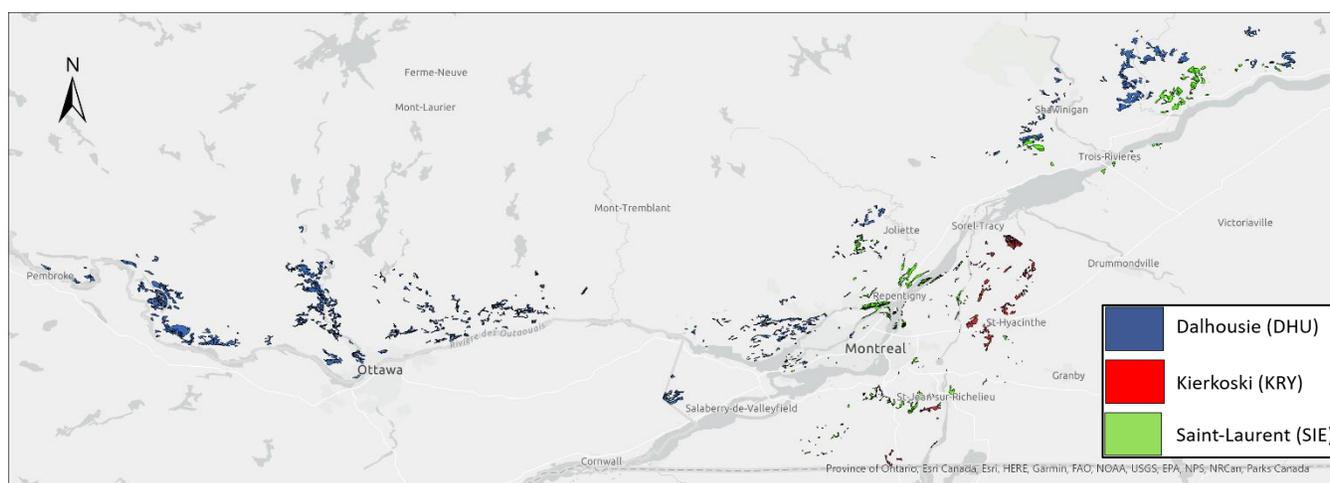


Figure 7 : Répartition géographique des sols du groupe 2 (Saint-Laurent, Kierkoski et Dalhousie).

La masse volumique apparente plus élevée de l'horizon Ap1 des sols cultivés et une tendance à l'augmentation dans l'Ap2 par rapport aux témoins indique de la compaction de ces sols (Tableau 22). Une diminution significative de la macroporosité et de la teneur en air au champ dans l'horizon Ap2 des sols cultivés par rapport aux témoins, sous le seuil de $0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ indique un manque d'aération. La diffusivité relative des gaz est légèrement plus élevée dans l'Ap1 des sols cultivés, mais sous le seuil critique de 0,005, défavorisant les échanges gazeux aux niveaux des racines. De même, la capacité au champ relative est plus faible dans l'Ap1 et plus élevée dans l'Ap2 des sols cultivés, par rapport aux témoins, mais demeure supérieure au seuil de 0,7 favorisant donc des processus anaérobies. La conductivité hydraulique saturée est significativement plus faible à 15 cm de profondeur dans les sols cultivés par rapport aux témoins et sous le seuil de 10 cm/jour dans tout le profil, indiquant une circulation

de l'eau réduite dans les sols cultivés. La structure des sols cultivés est légèrement dégradée : la proportion des agrégats dont le diamètre est compris entre 2 et 4 mm est significativement inférieure à celles des témoins ; la proportion d'agrégats supérieurs à 4 mm et le DMP ont aussi tendance à être inférieurs.

Tableau 22 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 2 (Saint-Laurent, Kierkoski et Dalhousie).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
Nombre d'observations	48	24	48	24	48	24
Sable (%)	16	13	15	12	10	7
Limon (%)	43	46	43	46	40	46
Argile (%)	41	41	42	42	50	47
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,40	1,30	1,51	1,47	1,49	1,49
Porosité totale (cm ³ /cm ³)	0,482	0,498	0,437	0,453	0,451	0,451
Macroporosité (cm ³ /cm ³)	0,113	0,091	0,058	0,083	0,051	0,064
Teneur en air au champ (cm ³ /cm ³)	0,129	0,104	0,067	0,102	0,066	0,079
Tortuosité des pores τ (—)	1,505	1,482	1,599	1,574	1,565	1,562
Diffusivité relative des gaz D/D0 (—)	0,004	0,002	0,001	0,001	0,000	0,001
Capacité au champ relative (—)	0,766	0,819	0,869	0,815	0,888	0,860
K _{sat} (cm/jour)			5,8	28,7	1,2	3,2
Diamètre moyen pondéré des agrégats (mm)	3,18	3,61				
Agrégats 4-8mm (%)	44,2	49,1				
Agrégats 2-4mm (%)	13,2	16,8				
Agrégats 1-2mm (%)	6,9	8,6				
Agrégats 0,5-1mm (%)	4,3	4,3				
Agrégats 0,25-0,5mm (%)	1,8	1,7				

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

K_{sat} : Conductivité hydraulique saturée mesurée à 15 cm (Ap2) et 40 cm de profondeur (B).

Les pertes de sol par érosion indiquées par le mouvement net de sol au Tableau 23 ne sont pas significativement différentes entre sols cultivés et témoins et elles demeurent tolérables en étant sous le seuil d'érosion de 6 t/ha/an.

Tableau 23 : Bilans de masse des sols du groupe 2 (Saint-Laurent, Kierkoski et Dalhousie).

Descripteurs	Cultivé	Témoin
Profondeur (cm)	46	44
Mouvement net de sols (t/ha/an)	-4,8	-5,6
C _{total} (t/ha)	98	119
C _{UM3} (kg/ha)	23	19
K _{M3} (kg/ha)	1 055	967
P _{M3} (kg/ha)	282	165
Zn _{M3} (kg/ha)	17,7	14,7

Les valeurs en gras indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10 entre sols cultivés et témoins.

Profondeur : correspond à la profondeur de l'horizon Ap plus 15 cm dans le B.

La teneur en matière organique est plus faible dans les trois horizons des sols cultivés par rapport aux témoins, avec une différence significative dans les horizons Ap1 et B (Tableau 24). Selon les critères utilisés par Tabi et al. (1991) pour des sols à texture lourde, elle est de faible niveau dans les horizons Ap1 et Ap2 des sols cultivés et témoins. La teneur en C total est aussi inférieure au seuil de 2 % dans les deux horizons de surface Ap1 et Ap2. Le

ratio C actif/C total est plus élevé dans les trois horizons des sols cultivés en raison principalement d'une quantité significativement plus faible de C total dans les sols cultivés. La quantité de CO₂ dégagée après une incubation de 14 jours est plus faible dans les trois horizons des sols cultivés par rapport aux témoins indiquant un niveau d'activité biologique plus faible. L'azote minéralisé après 14 jours d'incubation est aussi significativement plus faible dans l'horizon Ap1 des sols cultivés.

Tableau 24 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 2 (Saint-Laurent, Kierkoski et Dalhousie).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
M.O. (%)	3,24	4,24	2,82	3,49	1,55	2,17
C total (%)	1,88	2,47	1,64	2,03	0,90	1,26
N organique (mg/kg)	1 597	2 006	1 367	1 603	821	1 000
Ratio C/N	11,5	12,1	11,7	12,3	11,3	12,1
C actif (mg/kg)	452	470	361	351	210	213
Ratio C actif/C total (mg/g)	24,1	19,3	22,8	17,5	22,6	18,5
CO₂ dégagé 14 jours (mg/kg)	366	542	277	395	175	261
N minéralisé 14 jours (mg/kg)	38,2	55,4	28,0	36,0	12,1	16,1
Ratio N minéralisé/N org. (mg/g)	24,0	27,6	21,6	22,1	16,4	15,0

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

M.O. : matière organique du sol estimée avec C total Leco et un facteur de 1,724.

N organique : N total Leco moins N minéral.

Ratio C/N : C total Leco divisé par N total Leco.

Le pH des sols cultivés n'est pas statistiquement différent de celui des témoins. Les niveaux de pH mesurés (cultivés et témoins) varient de faiblement acides à neutres (Tableau 25). La teneur en bases échangeables des sols cultivés n'est pas différente de celle des sols témoins, avec des niveaux allant de modérés à élevés pour le K, élevés à très élevés pour le Mg, modérés pour le Ca et de très faibles à moyens pour le Na. La teneur en P a augmenté dans les trois horizons des sols cultivés avec une augmentation significative dans l'horizon Ap2, se traduisant par des bilans de masse dans le profil qui sont significativement plus élevés que dans les sols témoins (Tableau 23 et Tableau 25). Le niveau de P dans les sols cultivés demeure toutefois modéré dans l'Ap1, faible dans l'Ap2 et très faible dans le B. L'indice de saturation en P est en-dessous de la valeur critique agroenvironnementale de 8 % pour les sols du groupe G1b (Argile <60 %) (Tableau 25). La teneur en éléments mineurs n'est pas significativement différente entre les sols cultivés et témoins avec des niveaux variant de moyens à élevés pour le Cu, de faibles à élevés pour le Zn et très faibles pour le Mn.

Tableau 25 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 2 (Saint-Laurent, Kierkoski et Dalhousie).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoïn	Cultivé	Témoïn	Cultivé	Témoïn
pH	6,5	6,3	6,6	6,3	6,9	6,6
pH _{SMP}	6,7	6,6	6,8	6,6	6,9	6,7
P _{M3} (mg/kg)	63,4	40,5	43,2	25,0	17,9	12,6
Al _{M3} (mg/kg)	928,1	881,3	952,4	913,1	985,7	997,7
Fe _{M3} (mg/kg)	279,0	247,2	278,3	237,8	243,9	217,7
ISP (%)	6,9	4,7	4,6	2,8	1,9	1,3
Mn _{M3} (mg/kg)	23,6	18,7	21,5	16,9	22,8	21,6
B _{M3} (mg/kg)	0,48	0,41	0,43	0,32	0,27	0,21
Cu _{M3} (mg/kg)	3,15	2,84	3,02	2,69	2,76	2,46
Zn _{M3} (mg/kg)	3,52	2,89	2,65	2,27	1,78	1,64
K _{M3} (cmol/kg)	0,503	0,494	0,372	0,351	0,367	0,321
Na _{M3} (cmol/kg)	0,067	0,066	0,090	0,088	0,156	0,136
Ca _{M3} (cmol/kg)	11,6	10,5	11,7	10,4	12,5	11,3
Mg _{M3} (cmol/kg)	2,99	3,18	3,38	3,25	5,10	4,23
(K+Na)/(Ca+Mg)	0,042	0,043	0,032	0,033	0,029	0,031
CEC (cmol/kg)	22,5	22,6	22,6	22,1	23,9	23,3
Sat. bases (%)	68,4	64,8	69,4	65,7	76,3	71,1

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

ISP : indice de saturation en phosphore.

CEC : capacité d'échange cationique.

M3 : extrait Mehlich-3.

Niveau d'interprétation (sauf Fe, B, ISP et (K+Na)/(Ca+Mg))

Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
-------------	--------	-------	-------	------------

Synthèse de l'état de santé des sols du groupe 2 (Saint-Laurent, Kierkoski et Dalhousie).

Problèmes de dégradation observés dans les sols cultivés

- Les sols sont plus compacts dans l'horizon Ap1.
- L'aération et les conditions pour les échanges gazeux sont limitantes dans l'horizon Ap2.
- Les quantités d'eau en excès favorisent des processus anaérobies dans l'horizon Ap2.
- La circulation de l'eau est réduite à 15 et 40 cm de profondeur.
- La structure est légèrement dégradée dans l'horizon Ap1.
- La teneur en matière organique est plus faible et la teneur en C est inférieure à 2 % dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La respiration hétérotrophe est plus faible dans les trois horizons.
- La teneur en P est plus élevée dans l'horizon Ap2, mais l'indice de saturation en P demeure inférieur à 8 %.
- Les autres indicateurs de chimie-fertilité ne sont pas différents entre sols cultivés et témoins.
- Les bilans de masse indiquent un enrichissement en P dans le profil.

Groupe 3 : Séries Providence, Rideau, Chambly et Saint-Blaise

Les séries Providence, Rideau, Chambly et Saint-Blaise se sont développées sur un matériau argileux-fin (40 à 60 % d'argile) et sont situées dans la Plaine de Montréal (Figure 8). Les sols de ces séries ont une perméabilité plus lente que les sols du groupe 1 et 2.

Tableau 26 : Caractéristiques des sols du groupe 3 (Providence, Rideau, Chambly et Saint-Blaise).

Caractéristiques	Providence (PVD)	Rideau (RDU)	Chambly (CHY)	Saint-Blaise (SAB)
Granulométrie 1, réaction / Granulométrie 2, réaction	Argileux-très fin, neutre	Argileux-très fin, neutre	Argileux-fin, alcalin	Argileux-fin, neutre / Loameux, alcalin
Type de dépôt	Fluviatile	Fluviatile	Glacio-lacustre	Fluviatile
Perméabilité	Lente	Lente	Lente	Lente
Classe de drainage	Mauvais	Mauvais à imparfait	Mauvais	Mauvais
Groupe hydrologique	C	C	B	C
Taxonomie (sous-groupe)	Gleysol humique orthique	Gleysol orthique	Gleysol humique orthique	Gleysol humique orthique
Superficie cartographiée (ha)	45 251	70 079	9 278	16 387

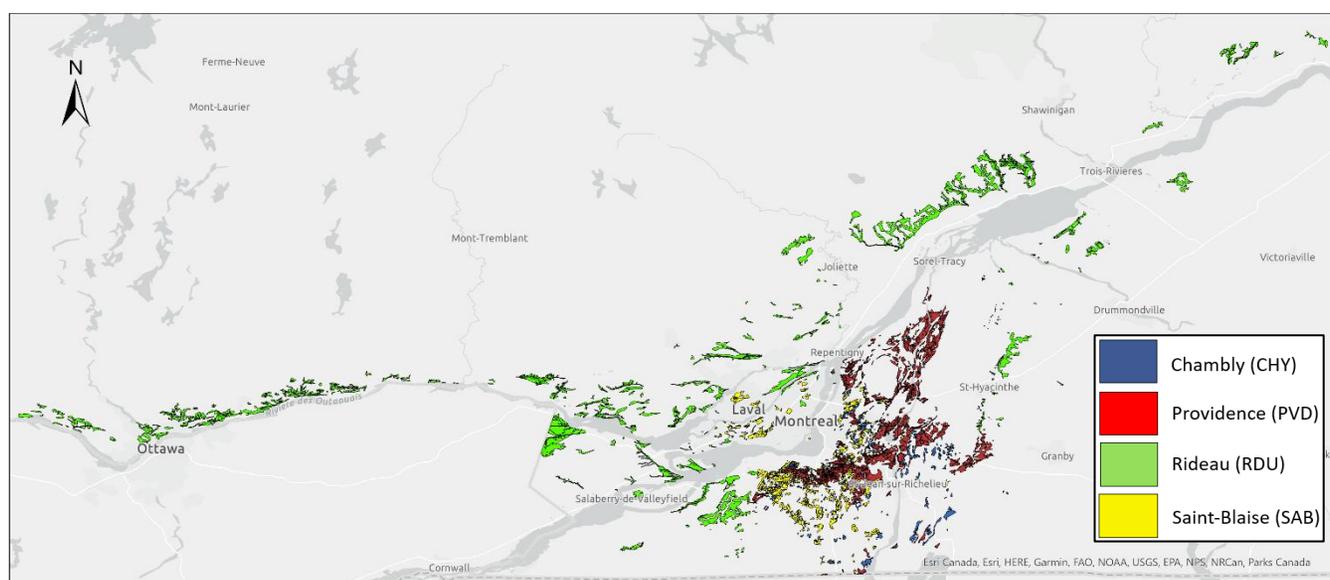


Figure 8 : Répartition géographique des sols du groupe 3 (Providence, Rideau, Chambly et Saint-Blaise).

L'augmentation significative de la masse volumique apparente dans les horizons Ap1 et Ap2 ainsi que la diminution significative de la porosité totale des sols cultivés par rapport aux témoins dans l'Ap1 révèlent de la compaction des sols (Tableau 27). Les sols cultivés sont aussi moins bien aérés par rapport aux témoins : il y a une diminution significative de leur macroporosité et de leur teneur en air au champ sous le seuil de $0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ dans les trois horizons par rapport aux témoins. La tortuosité des pores est plus élevée dans les horizons Ap1 et Ap2 des sols cultivés, la diffusivité relative des gaz est significativement plus faible dans les trois horizons des sols cultivés et inférieure au seuil de 0,005 défavorisant les échanges gazeux des racines. La capacité au champ relative est plus élevée et supérieure au critère de 0,7 favorisant les processus anoxiques. Au contraire, les sols témoins atteignent

ces critères dans les horizons Ap1 et Ap2, mais pas dans le B. La conductivité hydraulique saturée est significativement plus faible à 15 et 40 cm de profondeur dans les sols cultivés par rapport aux témoins et sous le seuil de 10 cm/jour indiquant une circulation de l'eau réduite dans tout le profil. La structure des sols cultivés est légèrement dégradée par rapport à celle des témoins : les proportions des agrégats supérieurs à 0,5 mm ainsi que le DMP ont tendance à être inférieurs dans les sols cultivés par rapport aux témoins et cette différence est significative pour les agrégats compris entre 2 et 4 mm.

Tableau 27 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 3 (Providence, Rideau, Chambly et Saint-Blaise).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
Nombre d'observations	64	32	62	29	64	32
Sable (%)	21	22	20	21	17	16
Limon (%)	31	32	30	32	30	32
Argile (%)	48	46	50	47	53	52
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,37	1,20	1,48	1,39	1,51	1,45
Porosité totale (cm ³ /cm ³)	0,482	0,569	0,457	0,490	0,447	0,469
Macroporosité (cm ³ /cm ³)	0,098	0,170	0,064	0,130	0,052	0,077
Teneur en air au champ (cm ³ /cm ³)	0,126	0,227	0,081	0,185	0,072	0,122
Tortuosité des pores τ (—)	1,505	1,370	1,559	1,488	1,589	1,540
Diffusivité relative des gaz D/D0 (—)	0,003	0,013	0,001	0,005	0,000	0,001
Capacité au champ relative (—)	0,800	0,697	0,858	0,736	0,881	0,833
K _{sat} (cm/jour)			5,6	136,7	1,3	6,2
Diamètre moyen pondéré des agrégats (mm)	3,44	3,75				
Agrégats 4-8mm (%)	46,1	48,5				
Agrégats 2-4mm (%)	15,0	21,3				
Agrégats 1-2mm (%)	8,8	11,5				
Agrégats 0,5-1mm (%)	5,0	5,4				
Agrégats 0,25-0,5mm (%)	2,3	2,2				

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

K_{sat} : Conductivité hydraulique saturée mesurée à 15 cm (Ap2) et 40 cm de profondeur (B).

Les pertes de sol par érosion indiquées par le mouvement net de sol au Tableau 28 sont significativement plus importantes dans les sols témoins. Elles dépassent aussi dans les sols cultivés, le seuil d'érosion de 6 t/ha/an tolérable pour la plupart des sols au Canada.

Tableau 28 : Bilans de masse des sols du groupe 3 (Providence, Rideau, Chambly et Saint-Blaise).

Descripteurs	Cultivé	Témoin
Profondeur (cm)	47	43
Mouvement net de sols (t/ha/an)	-7,8	-10,2
C _{total} (t/ha)	109	99
C _{M3} (kg/ha)	19	12
K _{M3} (kg/ha)	1 056	1 110
P _{M3} (kg/ha)	225	124
Zn _{M3} (kg/ha)	16,5	12,0

Les valeurs en gras indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10 entre sols cultivés et témoins.

Profondeur : correspond à la profondeur de l'horizon Ap plus 15 cm dans le B.

La teneur en matière organique est significativement plus faible dans l'Ap1 des sols cultivés par rapport aux témoins, avec la même tendance dans l'Ap2 (Tableau 29). Elle est d'un niveau élevé dans l'horizon Ap1 et modéré dans l'Ap2 des sols témoins. Dans les sols cultivés, le niveau est modéré dans l'Ap1 et plus faible dans l'Ap2. Cet appauvrissement en matière organique des sols cultivés par rapport aux témoins au niveau de l'horizon Ap1 s'accompagne d'une diminution significative de l'azote organique et de la teneur en carbone actif. Le ratio C actif/C total est plus élevé dans les horizons Ap1 et Ap2 des sols cultivés en raison de la plus faible quantité de C total dans les sols cultivés. Les quantités de CO₂ dégagées et de N minéralisé après une incubation de 14 jours sont significativement plus faibles dans les horizons Ap1 et Ap2 des sols cultivés indiquant une diminution des sources de C et de N disponibles, ainsi qu'un niveau d'activité biologique plus faible que dans les sols témoins.

Tableau 29 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 3 (Providence, Rideau, Chambly et Saint-Blaise).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
M.O. (%)	3,42	5,55	3,01	3,30	1,37	1,41
C total (%)	1,99	3,21	1,74	1,91	0,85	0,81
N organique (mg/kg)	1 809	2 846	1 585	1 791	806	881
Ratio C/N	11,6	11,2	11,6	10,8	10,4	9,4
C actif (mg/kg)	516	644	432	386	181	179
Ratio C actif/C total (mg/g)	25,0	21,1	24,3	20,1	22,2	23,3
CO ₂ dégagé 14 jours (mg/kg)	423	907	348	463	202	202
N minéralisé 14 jours (mg/kg)	41,4	88,6	31,1	42,5	11,4	8,7
Ratio N minéralisé/N org. (mg/g)	23,5	32,3	19,9	23,3	11,4	9,3

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

M.O. : matière organique du sol estimée avec C total Leco et un facteur de 1,724.

N organique : N total Leco moins N minéral.

Ratio C/N : C total Leco divisé par N total Leco.

Le pH des sols cultivés est généralement plus élevé que celui des témoins dans les trois horizons avec une différence significative dans les horizons Ap1 et Ap2 (Tableau 30). Toutefois, les sols cultivés demeurent neutres sur toute leur profondeur. Quant aux témoins, leurs niveaux de pH varient de faiblement acides dans les horizons Ap1 et Ap2 à neutres dans l'horizon B. La saturation des sols cultivés en bases échangeables est significativement plus élevée par rapport aux témoins, avec des niveaux allant de modérés à élevés pour le K, élevés à très élevés pour le Mg, modérés pour le Ca et de faibles à moyens pour le Na. Toutefois, il y a une diminution du rapport monovalents sur bivalents dans les sols cultivés par rapport aux témoins dans les trois horizons, lié à des teneurs plus élevées en Ca dans les sols cultivés. La teneur en P a augmenté dans les trois horizons des sols cultivés avec une augmentation significative dans l'horizon Ap2, se traduisant par des bilans de masse dans le profil qui sont significativement plus élevés que dans les témoins (Tableaux 2 et 4). Le niveau de P dans les sols cultivés demeure toutefois faible dans les horizons Ap et très faible dans le B. Quant à l'indice de saturation en P, il est en-dessous de la valeur critique agroenvironnementale de 8 % pour les sols argileux du groupe G1b (argile <60%) (Tableau 30). Il y a un enrichissement des sols cultivés en Cu sur toute la profondeur du profil avec des niveaux allant d'élevés dans les horizons Ap1 et Ap2, à moyens dans le B (Tableau 28 et Tableau 30). Les sols cultivés se sont aussi enrichis en Zn par rapport aux témoins (Tableau 30). Des teneurs statistiquement similaires de Zn ont été mesurés dans les sols cultivés et témoins dans l'Ap1 (élevées) et l'Ap2 (modérées), alors que dans l'horizon B, ces

teneurs sont significativement différentes : faibles dans les sols cultivés et très faibles dans les témoins. Quant au Mn, son niveau dans les sols cultivés varie de faible dans les horizons Ap à moyen dans l'horizon B.

Tableau 30 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 3 (Providence, Rideau, Chambly et Saint-Blaise).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
pH	6,7	6,2	6,8	6,4	7,1	6,8
pH _{SMP}	6,8	6,5	6,8	6,6	7,0	6,8
P _{M3} (mg/kg)	54,0	44,3	38,7	20,2	9,7	6,6
Al _{M3} (mg/kg)	890,0	882,4	890,4	921,8	900,5	980,1
Fe _{M3} (mg/kg)	265,2	257,1	264,8	218,1	196,6	174,2
ISP (%)	6,2	5,1	4,4	2,2	1,1	0,7
Mn _{M3} (mg/kg)	41,3	29,2	38,3	26,3	54,1	40,0
B _{M3} (mg/kg)	0,47	0,47	0,41	0,30	0,20	0,14
Cu _{M3} (mg/kg)	3,06	2,23	2,85	1,86	2,26	1,62
Zn _{M3} (mg/kg)	3,32	3,39	2,52	1,96	1,52	1,16
K _{M3} (cmol/kg)	0,471	0,590	0,376	0,384	0,321	0,374
Na _{M3} (cmol/kg)	0,081	0,083	0,095	0,090	0,148	0,186
Ca _{M3} (cmol/kg)	13,8	11,9	13,8	11,0	14,9	10,9
Mg _{M3} (cmol/kg)	3,24	3,63	3,42	3,16	4,84	5,14
(K+Na)/(Ca+Mg)	0,033	0,046	0,028	0,037	0,025	0,035
CEC (cmol/kg)	24,5	26,4	24,4	23,3	25,4	23,5
Sat. bases (%)	74,5	64,2	75,4	65	82	72,6

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

ISP : indice de saturation en phosphore.

CEC : capacité d'échange cationique.

M3 : extrait Mehlich-3.

Niveau d'interprétation (sauf Fe, B, ISP et (K+Na)/(Ca+Mg))

Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
-------------	--------	-------	-------	------------

Synthèse de l'état de santé des sols du groupe 3 (Providence, Rideau, Chambly et Saint-Blaise).

Problèmes de dégradation observés dans les sols cultivés

- Les sols sont plus compacts dans les horizons Ap1 et Ap2.
- L'aération et les conditions pour les échanges gazeux sont limitantes dans les trois horizons.
- Les quantités d'eau en excès favorisent des processus anaérobies dans les trois horizons.
- La circulation de l'eau est réduite à 15 et 40 cm de profondeur.
- La structure est légèrement dégradée dans l'horizon Ap1.
- La teneur en matière organique est plus faible et la teneur en C est inférieure à 2 % dans les horizons Ap1 et Ap2.
- L'érosion des sols dépassent le seuil de 6 t/ha/an.
- La respiration et la minéralisation de l'azote est plus faible dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La teneur en P est plus élevée dans l'horizon Ap2, mais l'indice de saturation en P demeure inférieur à 8 %.
- Les teneurs en Ca et en Cu sont plus élevées dans les trois horizons.
- Les bilans de masse indiquent un enrichissement en P, Cu et Zn dans le profil.

Groupe 10 : Séries de l'Anse, Kamouraska, La Pocatière et Saint-Pascal

Les séries de l'Anse, Kamouraska, La Pocatière et Saint-Pascal se sont développées sur un matériau argileux-fin (40 à 60 % d'argile) d'origine estuarienne ou issu d'une alluvion récente (DLS). On les retrouve à l'est de la région pédologique de la Plaine littorale et les îles du Saint-Laurent (Figure 9). Les sols de ces séries ont une perméabilité variant de modérée à lente.

Tableau 31 : Caractéristiques des sols du groupe 10 (De l'Anse, Kamouraska, La Pocatière, Saint-Pascal).

Caractéristiques	De l'Anse (DLS)	Kamouraska (KRK)	La Pocatière (LPC)	Saint-Pascal (SSC)
Granulométrie du matériau, réaction	Argileux-fin, neutre	Argileux-fin, alcalin	Argileux-fin, neutre	Argileux-fin, alcalin
Type de dépôt	Alluvion récente	Estuarien	Estuarien	Estuarien
Classe de drainage	Mauvais	Mauvais	Mauvais	Mauvais
Perméabilité	Modérée	Lente	Modérée	Modérée
Groupe hydrologique	C	B	B	B
Taxonomie (sous-groupe)	Gleysol régosolique	Gleysol humique orthique	Gleysol luviqum humique	Gleysol humique orthique
Superficie cartographiée (ha)	8 840	31 713	6 045	8 914

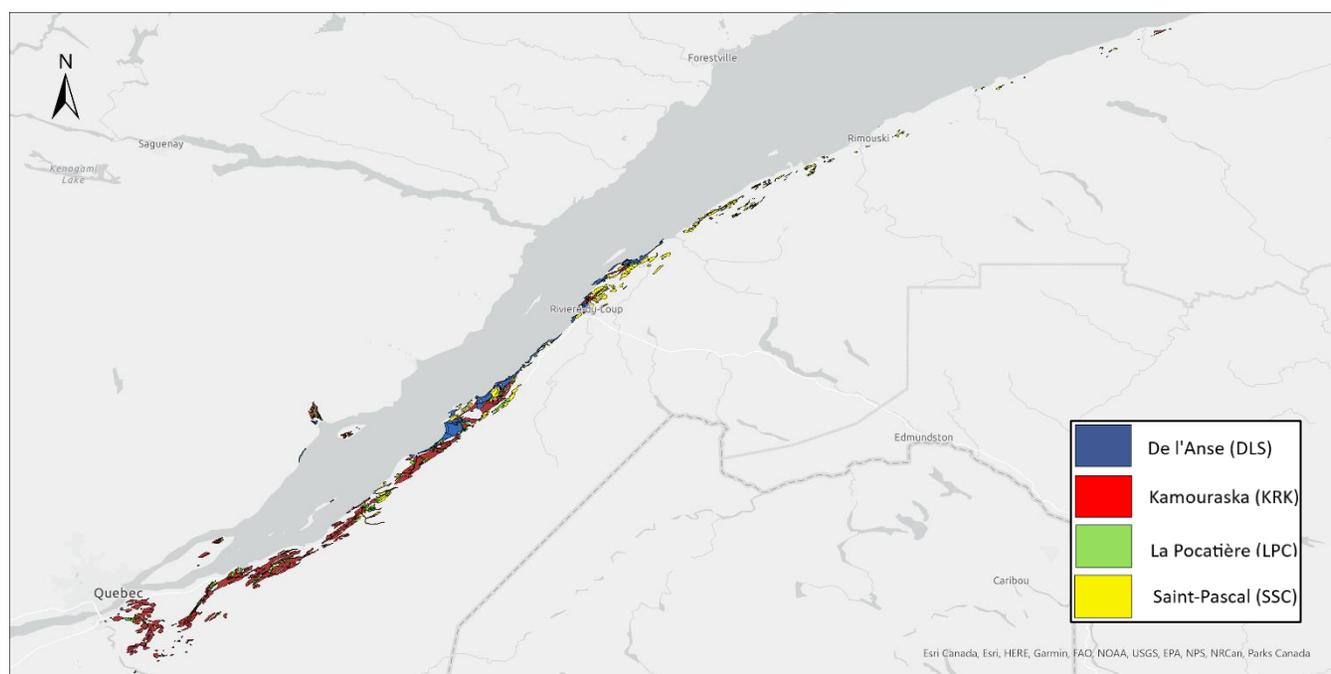


Figure 9 : Répartition géographique des sols du groupe 10 (De l'Anse, Kamouraska, La Pocatière et Saint-Pascal).

Une diminution significative de la porosité totale dans l'horizon Ap1 des sols cultivés par rapport aux témoins, ainsi qu'une tendance à l'augmentation de la masse volumique apparente révèlent de la compaction superficielle de ces sols (Tableau 32). La macroporosité n'est pas différente entre les sols cultivés et témoin. Elle a tendance à

être plus élevée dans les sols cultivés, mais demeure inférieure au seuil de $0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ en profondeur dans l'Ap2 et le B, indiquant un manque de volume d'air en profondeur possiblement d'ordre naturel, comme dans les autres sols argileux. La teneur en air au champ était significativement plus élevée dans les sols cultivés, suivant la même baisse que la macroporosité en profondeur. La diffusivité relative des gaz tend à être supérieure dans l'Ap1 des sols cultivés, au-delà du seuil critique de 0,005. De même la capacité au champ relative se rapproche davantage du seuil de 0,7 dans l'Ap1 des sols cultivés, mais ces propriétés se dégradent en profondeur autant dans les sols cultivés que témoins. La conductivité hydraulique saturée n'est pas différente entre sols cultivés et témoins, mais elle est inférieure au seuil de 10 cm/jour à 40 cm de profondeur indiquant une circulation de l'eau réduite.

Tableau 32 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 10 (De l'Anse, Kamouraska, La Pocatière et Saint-Pascal).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
Nombre d'observations	64	32	60	24	64	32
Sable (%)	10	12	8	13	9	10
Limon (%)	35	39	36	41	35	39
Argile (%)	55	49	56	46	56	51
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1,14	1,08	1,27	1,24	1,40	1,46
Porosité totale (cm^3/cm^3)	0,555	0,595	0,515	0,519	0,487	0,480
Macroporosité (cm^3/cm^3)	0,135	0,131	0,093	0,078	0,061	0,049
Teneur en air au champ (cm^3/cm^3)	0,171	0,131	0,112	0,079	0,084	0,058
Tortuosité des pores τ (—)	1,383	1,336	1,444	1,435	1,493	1,518
Diffusivité relative des gaz D/D_0 (—)	0,005	0,004	0,002	0,001	0,001	0,000
Capacité au champ relative (—)	0,759	0,783	0,822	0,849	0,873	0,898
K_{sat} (cm/jour)			44,6	40,3	2,5	1,1
Diamètre moyen pondéré des agrégats (mm)	3,61	3,53				
Agrégats 4-8mm (%)	48,2	46,1				
Agrégats 2-4mm (%)	16,7	17,3				
Agrégats 1-2mm (%)	10,4	9,8				
Agrégats 0,5-1mm (%)	5,7	4,2				
Agrégats 0,25-0,5mm (%)	2,3	1,5				

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

K_{sat} : Conductivité hydraulique saturée mesurée à 15 cm (Ap2) et 40 cm de profondeur (B).

Les pertes de sol par érosion indiquées par le mouvement net de sol au Tableau 33 ne sont pas significativement différentes entre sols cultivés et témoins, mais celles en sols cultivés dépassent légèrement le seuil d'érosion de 6 t/ha/an tolérable pour la plupart des sols au Canada.

Tableau 33 : Bilans de masse des sols du groupe 10 (L'Anse, Kamouraska, La Pocatière et Saint-Pascal).

Descripteurs	Cultivé	Témoin
Profondeur (cm)	41	40
Mouvement net de sols (t/ha/an)	-6,3	-4,3
C_{total} (t/ha)	137	144
C_{M3} (kg/ha)	18	12
K_{M3} (kg/ha)	1 058	914
P_{M3} (kg/ha)	107	71
Zn_{M3} (kg/ha)	11,1	8,8

Les valeurs en gras indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$ entre sols cultivés et témoins.

Profondeur : correspond à la profondeur de l'horizon Ap plus 15 cm dans le B.

La teneur en matière organique n'est pas significativement différente entre sols cultivés et témoins (Tableau 34). Elle est très élevée dans l'Ap1 et élevée dans l'Ap2 autant dans les sols cultivés que témoins. La teneur en carbone actif est plus élevée dans l'horizons Ap2 des sols cultivés. Le ratio C actif/C total est plus élevé dans les trois horizons des sols cultivés en raison de la teneur en carbone actif apparemment plus élevée et de la plus faible quantité de C total dans les sols cultivés. Au contraire, la quantité de CO₂ dégagée après une incubation de 14 jours est significativement plus faible dans l'horizon Ap1 des sols cultivés et tend à être plus faible dans les autres horizons indiquant des sources de C moins disponibles ainsi qu'un niveau d'activité biologique plus faible que dans les sols témoins.

Tableau 34 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 10 (De l'Anse, Kamouraska, La Pocatière et Saint-Pascal).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
M.O. (%)	6,27	6,85	5,54	5,54	2,90	2,31
C total (%)	3,64	3,97	3,21	3,21	1,69	1,34
N organique (mg/kg)	2 947	3 466	2 538	2 496	1 378	1 316
Ratio C/N	11,8	12,6	11,7	12,1	11,5	10,8
C actif (mg/kg)	645	617	539	404	322	261
Ratio C actif/C total (mg/g)	19,2	14,4	18,4	13,0	19,9	13,8
CO ₂ dégagé 14 jours (mg/kg)	644	1 142	499	553	239	260
N minéralisé 14 jours (mg/kg)	77,2	92,0	61,1	50,6	20,2	16,0
Ratio N minéralisé/N org. (mg/g)	27,6	28,6	25,4	21,8	14,2	11,2

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

M.O. : matière organique du sol estimée avec C total Leco et un facteur de 1,724.

N organique : N total Leco moins N minéral.

Ratio C/N : C total Leco divisé par N total Leco.

Le pH des sols cultivés est significativement plus élevé que celui des témoins dans les trois horizons (Tableau 35). Toutefois, les sols cultivés demeurent faiblement acides (Ap1) ou neutres (Ap2 et B) en fonction de l'horizon. Quant aux témoins, leurs niveaux de pH varient de faiblement acides dans les horizons Ap1 et Ap2 à neutre dans le B. En lien avec ces différences de pH, les sols cultivés ont de plus faibles teneurs en Al et en Fe dans les horizons Ap1 et Ap2 indiquant une plus faible capacité de fixation en P des sols cultivés. La saturation des sols cultivés en bases échangeables est significativement plus élevée par rapport aux témoins, avec des niveaux allant de modérés à très élevés pour le K, modérés à élevés pour le Mg, modérés pour le Ca et de faibles à moyens pour le Na. Il y a une diminution significative du rapport monovalents sur bivalents dans les sols cultivés par rapport aux témoins dans l'horizon Ap1 (Tableau 35). La teneur en P des sols cultivés dont le niveau varie de faible (Ap1 et Ap2) à très faible (B), n'est pas significativement différente de celle des témoins. L'indice de saturation en P des sols du groupe 10 se trouve nettement en-dessous de la valeur critique agroenvironnementale de 8 % au-delà de laquelle les recommandations en P ne devraient pas dépasser les exportations par les cultures (Tableau 35). Il y a un enrichissement des sols cultivés en Cu sur toute la profondeur du profil avec des niveaux allant d'élevés dans les horizons Ap1 et Ap2, à moyens dans le B (Tableau 33 et Tableau 35). Le niveau de Zn dans les sols cultivés varie d'élevé (Ap1) à faible (B). Quant au Mn, sa teneur est très faible dans les trois horizons des sols cultivés.

Tableau 35 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 10 (De l'Anse, Kamouraska, La Pocatière et Saint-Pascal).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoïn	Cultivé	Témoïn	Cultivé	Témoïn
pH	6,5	5,7	6,6	5,8	6,6	6,1
pH _{SMP}	6,6	6,1	6,6	6,1	6,6	6,3
P _{M3} (mg/kg)	32,1	27,7	21,7	14,3	8,8	6,2
Al _{M3} (mg/kg)	902,7	1 045,8	949,8	1 070,1	996,6	1 062,5
Fe _{M3} (mg/kg)	263,1	357,6	271	337,1	259,2	298,1
ISP (%)	3,7	2,6	2,3	1,3	0,9	0,6
Mn _{M3} (mg/kg)	22,3	20,9	20,3	14,3	21,2	15,3
B _{M3} (mg/kg)	0,71	0,42	0,62	0,32	0,38	0,22
Cu _{M3} (mg/kg)	3,62	2,59	3,31	2,52	2,71	2,37
Zn _{M3} (mg/kg)	2,99	3,10	2,12	1,83	1,48	1,39
K _{M3} (cmol/kg)	0,728	0,746	0,475	0,416	0,394	0,342
Na _{M3} (cmol/kg)	0,124	0,132	0,153	0,154	0,222	0,211
Ca _{M3} (cmol/kg)	15,4	11,7	15,0	10,4	12,3	8,8
Mg _{M3} (cmol/kg)	2,76	3,00	2,73	2,74	3,32	3,11
(K+Na)/(Ca+Mg)	0,047	0,062	0,037	0,045	0,039	0,05
CEC (cmol/kg)	27,0	29,0	26,5	27,0	24,8	24,0
Sat. bases (%)	72,2	55,2	72,1	51,9	69,7	56,3

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

ISP : indice de saturation en phosphore.

CEC : capacité d'échange cationique.

M3 : extrait Mehlich-3.

Niveau d'interprétation (sauf Fe, B, ISP et (K+Na)/(Ca+Mg))

Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
-------------	--------	-------	-------	------------

Synthèse de l'état de santé des sols du groupe 10 (De l'Anse, Kamouraska, La Pocatière et Saint-Pascal).

Problèmes de dégradation observés dans les sols cultivés

- Les sols sont plus compacts en surface dans l'horizon Ap1.
- L'aération et les conditions pour les échanges gazeux sont limitantes dans les horizons Ap2 et B.
- Les quantités d'eau en excès favorisent des processus anaérobies en profondeur dans les horizons Ap2 et B.
- La circulation de l'eau est réduite à 40 cm de profondeur.
- La structure n'est pas dégradée.
- L'érosion de sols dépassent légèrement le seuil limite de 6 t/ha/an.
- La teneur en matière organique est élevée et la teneur en C est supérieure à 2 % dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La respiration est plus faible dans l'horizon Ap1.
- L'indice de saturation en P est plus élevé dans les horizons Ap2 et B, mais demeure inférieur à 8 %.
- Les teneurs en B et en Ca sont plus élevées dans les trois horizons.
- Les teneurs en Cu sont plus élevées dans les horizons Ap1 et Ap2 et le bilan de masse de Cu est plus élevé dans le profil.

Groupe 12 : Séries Hébertville et Normandin

Les séries Hébertville et Normandin se sont développées sur un matériau argileux-fin (40 à 60 % d'argile) d'origine marine dans la région pédologique de la Plaine du Lac-Saint-Jean (Figure 10). Les sols de ces séries ont une perméabilité variant de modérée à lente.

Tableau 36 : Caractéristiques des sols du groupe 12 (Hébertville et Normandin).

Caractéristiques	Hébertville (HBV)	Normandin (NMD)
Granulométrie du matériau, réaction	Argileux-fin, alcalin	Argileux-fin, neutre
Type de dépôt	Marin	Marin
Classe de drainage	Mauvais	Mauvais
Perméabilité	Modérée	Lente
Groupe hydrologique	B	C
Taxonomie (sous-groupe)	Gleysol humique orthique	Gleysol orthique
Superficie cartographiée (ha)	7 717	7 764

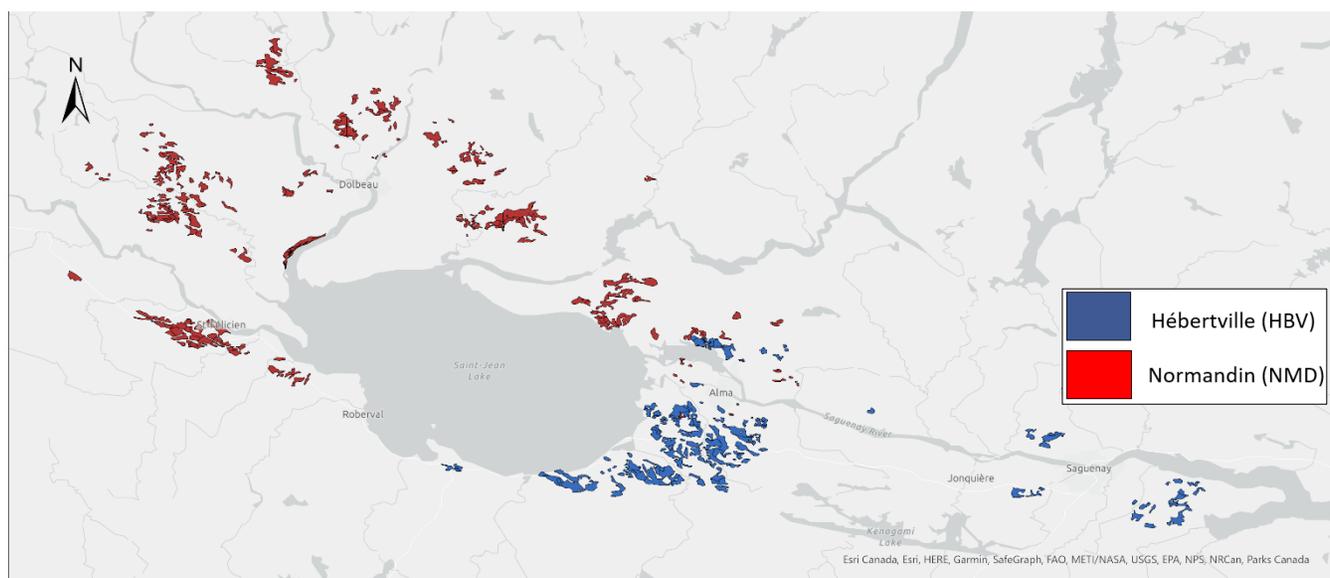


Figure 10 : Répartition géographique des sols du groupe 12 (Hébertville et Normandin).

La masse volumique apparente de l'horizon Ap1 des sols cultivés est significativement plus élevée que celles des témoins, mais demeure relativement faible à moins de 1,2 g/cm³. De même la porosité totale des sols cultivés tend à diminuer par rapport aux témoins indiquant une faible tendance à la compaction superficielle de ces sols (Tableau 37). Cependant, ce phénomène de dégradation superficielle ne semble pas avoir d'impact sur les volumes d'air (macroporosité et teneur en air au champ) présents en surface dans l'Ap1 et l'Ap2. On note toutefois, une teneur en air plus faibles et près du seuil limite de 0,10 cm³/cm³, ainsi qu'une diffusivité relative des gaz plus faible dans l'horizon B des sols cultivés. La capacité au champ relative est plus faible dans l'Ap1 des sols cultivés, mais

demeure à l'intérieur de l'intervalle idéal de 0,6 à 0,7. La conductivité hydraulique saturée n'est pas différente entre sols cultivés et témoins, mais elle est inférieure au seuil de 10 cm/jour à 40 cm de profondeur indiquant une circulation de l'eau réduite. La proportion des agrégats dont le diamètre est compris entre 2 et 4 mm est plus faible dans les sols cultivés par rapport aux témoins.

Tableau 37 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 12 (Hébertville et Normandin).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
Nombre d'observations	32	16	30	15	32	16
Sable (%)	4	4	3	2	3	3
Limon (%)	48	46	49	47	47	46
Argile (%)	48	50	48	51	50	51
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,13	1,02	1,25	1,15	1,55	1,53
Porosité totale (cm ³ /cm ³)	0,580	0,621	0,531	0,574	0,438	0,451
Macroporosité (cm ³ /cm ³)	0,228	0,203	0,144	0,180	0,073	0,098
Teneur en air au champ (cm ³ /cm ³)	0,315	0,287	0,194	0,265	0,104	0,156
Tortuosité des pores τ (—)	1,347	1,300	1,415	1,358	1,596	1,560
Diffusivité relative des gaz D/D0 (—)	0,027	0,013	0,007	0,011	0,001	0,003
Capacité au champ relative (—)	0,610	0,683	0,731	0,690	0,831	0,780
K _{sat} (cm/jour)			62,2	14,4	2,6	3,8
Diamètre moyen pondéré des agrégats (mm)	2,77	3,10				
Agrégats 4-8mm (%)	32,5	32,9				
Agrégats 2-4mm (%)	17,7	26,4				
Agrégats 1-2mm (%)	14,5	18,0				
Agrégats 0,5-1mm (%)	10,5	8,8				
Agrégats 0,25-0,5mm (%)	6,3	3,7				

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

K_{sat} : Conductivité hydraulique saturée mesurée à 15 cm (Ap2) et 40 cm de profondeur (B).

Les pertes de sol par érosion indiquées par le mouvement net de sol au Tableau 38 sont significativement plus élevées en sols cultivés, mais elles ne dépassent pas le seuil d'érosion de 6 t/ha/an tolérable pour la plupart des sols au Canada. À l'inverse, on note une accumulation nette de sol dans les sols témoins.

Tableau 38 : Bilans de masse des sols du groupe 12 (Hébertville et Normandin).

Descripteurs	Cultivé	Témoin
Profondeur (cm)	37	37
Mouvement net de sol (t/ha/an)	-3,0	3,0
C _{total} (t/ha)	115	139
C _{UM3} (kg/ha)	9	7
K _{M3} (kg/ha)	903	909
P _{M3} (kg/ha)	123	83
Zn _{M3} (kg/ha)	7,8	8,5

Les valeurs en gras indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10 entre sols cultivés et témoins.

Profondeur : correspond à la profondeur de l'horizon Ap plus 15 cm dans le B.

La teneur en matière organique n'est pas significativement différente entre sols cultivés et témoins, sauf dans l'horizon B (Tableau 39). Elle varie de niveau élevé à très élevé dans les horizons Ap1 et Ap2 des sols témoins et

cultivés. La teneur en azote organique et la teneur en carbone actif sont toutefois plus faibles dans les horizons B des sols cultivés et à l'inverse le ratio C actif/C total est plus élevé dans le même horizon en raison principalement de la plus faible quantité de C total dans les sols cultivés. Les quantités de CO₂ dégagées et de N minéralisé après une incubation de 14 jours sont significativement plus faibles dans les trois horizons des sols cultivés indiquant des sources de C et N moins disponibles, ainsi qu'un niveau d'activité biologique plus faible que dans les sols témoins.

Tableau 39 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 12 (Hébertville et Normandin).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
M.O. (%)	5,25	6,63	4,71	5,45	2,25	3,67
C total (%)	3,03	3,88	2,72	3,19	1,30	2,32
N organique (mg/kg)	1 913	2 724	1 635	2 178	847	1 295
Ratio C/N	15,4	14,0	16,0	14,7	15,4	15,3
C actif (mg/kg)	530	680	491	533	282	375
Ratio C actif/C total (mg/g)	17,6	17,7	19,1	17,3	22,0	18,4
CO ₂ dégagé 14 jours (mg/kg)	440	889	397	623	249	421
N minéralisé 14 jours (mg/kg)	49,0	89,2	40,1	62,5	18,8	34,2
Ratio N minéralisé/N org. (mg/g)	25,9	33,9	25,1	29,6	22,1	26,0

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

M.O. : matière organique du sol estimée avec C total Leco et un facteur de 1,724.

N organique : N total Leco moins N minéral.

Ratio C/N : C total Leco divisé par N total Leco.

Le pH des sols cultivés n'est pas différent de celui des sols témoins (Tableau 40). Les niveaux de pH mesurés (cultivés et témoins) varient de faiblement acides à neutres. La teneur en bases échangeables n'est pas significativement différente entre sols cultivés et témoins, avec des niveaux faibles pour le Na, modérés pour le Ca et le Mg, et variant de modérés à élevés pour le K. La teneur en P des sols cultivés n'est pas significativement différente de celle des témoins avec des niveaux variant de faibles (Ap1 et Ap2) à très faibles (B). Les bilans de masse de P dans les profils de sols cultivés et témoins sont aussi faibles (Tableau 38). L'indice de saturation en P de ces sols se trouve en-dessous de la valeur critique agroenvironnementale de 8 % au-delà de laquelle les recommandations en P ne devraient pas dépasser les exportations par les cultures (Tableau 40). La teneur en éléments mineurs varie de très faible pour le Mn à faible pour le Zn et le Cu.

Tableau 40 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 12 (Hébertville et Normandin).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
pH	6,2	6,6	6,2	6,4	6,6	6,7
pH _{SMP}	6,6	6,7	6,6	6,5	6,8	6,7
P _{M3} (mg/kg)	30,4	25,9	26,0	17,4	15,9	13,0
Al _{M3} (mg/kg)	1 055,3	979,3	1 045,8	1 052,2	1 003,2	1 061,9
Fe _{M3} (mg/kg)	232,8	220,5	230,8	235,2	227,4	244,1
ISP (%)	2,9	2,7	2,5	1,6	1,6	1,2
Mn _{M3} (mg/kg)	11,1	19,9	11,4	15,1	13,5	13,5
B _{M3} (mg/kg)	0,46	0,4	0,44	0,25	0,27	0,16
Cu _{M3} (mg/kg)	1,63	1,67	1,60	1,55	1,66	1,49
Zn _{M3} (mg/kg)	1,66	2,76	1,53	1,74	1,42	1,43
K _{M3} (cmol/kg)	0,500	0,670	0,453	0,417	0,394	0,376
Na _{M3} (cmol/kg)	0,082	0,085	0,093	0,108	0,128	0,131
Ca _{M3} (cmol/kg)	11,6	14,4	11,4	13,6	10,9	12,3
Mg _{M3} (cmol/kg)	2,16	2,13	2,25	2,19	2,74	2,45
(K+Na)/(Ca+Mg)	0,043	0,049	0,041	0,037	0,039	0,034
CEC (cmol/kg)	22,8	26,1	22,4	25,1	20,5	22,7
Sat. bases (%)	63,2	72,0	64,3	67,4	70,8	70,1

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

ISP : indice de saturation en phosphore.

CEC : capacité d'échange cationique.

M3 : extrait Mehlich-3.

Niveau d'interprétation (sauf Fe, B, ISP et (K+Na)/(Ca+Mg))

Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
-------------	--------	-------	-------	------------

Synthèse de l'état de santé des sols du groupe 12 (Hébertville et Normandin).

Problèmes de dégradation observés dans les sols cultivés

- Les sols sont plus compacts en surface dans l'horizon Ap1.
- L'aération et les conditions pour les échanges gazeux sont limitantes en profondeur dans l'horizon B.
- Les quantités d'eau en excès favorisent des processus anaérobies en profondeur dans l'horizon B.
- La circulation de l'eau est réduite à 40 cm de profondeur.
- La structure est légèrement dégradée dans l'horizon Ap1.
- La teneur en matière organique est élevée et la teneur en C est supérieure à 2 % dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La respiration et la quantité d'azote minéralisable sont plus faibles dans les trois horizons Ap1, Ap2 et B.
- La teneur en P et l'indice de saturation en P ne sont pas différents entre sols cultivés et témoins.
- La teneur en Zn est plus faible dans l'horizon Ap1.

Groupe 24 : Séries Guérin, Palmarolle et Roquemaure

Les séries Guérin, Palmarolle et Roquemaure se sont développées sur un matériau argileux-très fin (> 60 % d'argile) d'origine glacio-lacustre dans la région pédologique de la Plaine de l'Abitibi (Figure 11 et Figure 12). Les sols de ces séries ont une perméabilité modérée.

Tableau 41 : Caractéristiques des sols du groupe 24 (Guérin, Palmarolle et Roquemaure).

Caractéristiques	Guérin (GUR)	Palmarolle (PML)	Roquemaure (ROQ)
Granulométrie du matériau, réaction	Argileux-très fin, alcalin	Argileux-très fin, alcalin	Argileux-très fin, alcalin
Type de dépôt	Glacio-lacustre	Glacio-lacustre	Glacio-lacustre
Classe de drainage	Mauvais	Mauvais	Mauvais
Perméabilité	Modérée	Modérée	Modérée
Groupe hydrologique	D	C ou D	C ou D
Taxonomie (sous-groupe)	Gleysol humique orthique	Gleysol luvique humique	Gleysol humique orthique
Superficie cartographiée (ha)	4 566	40 686	29 861

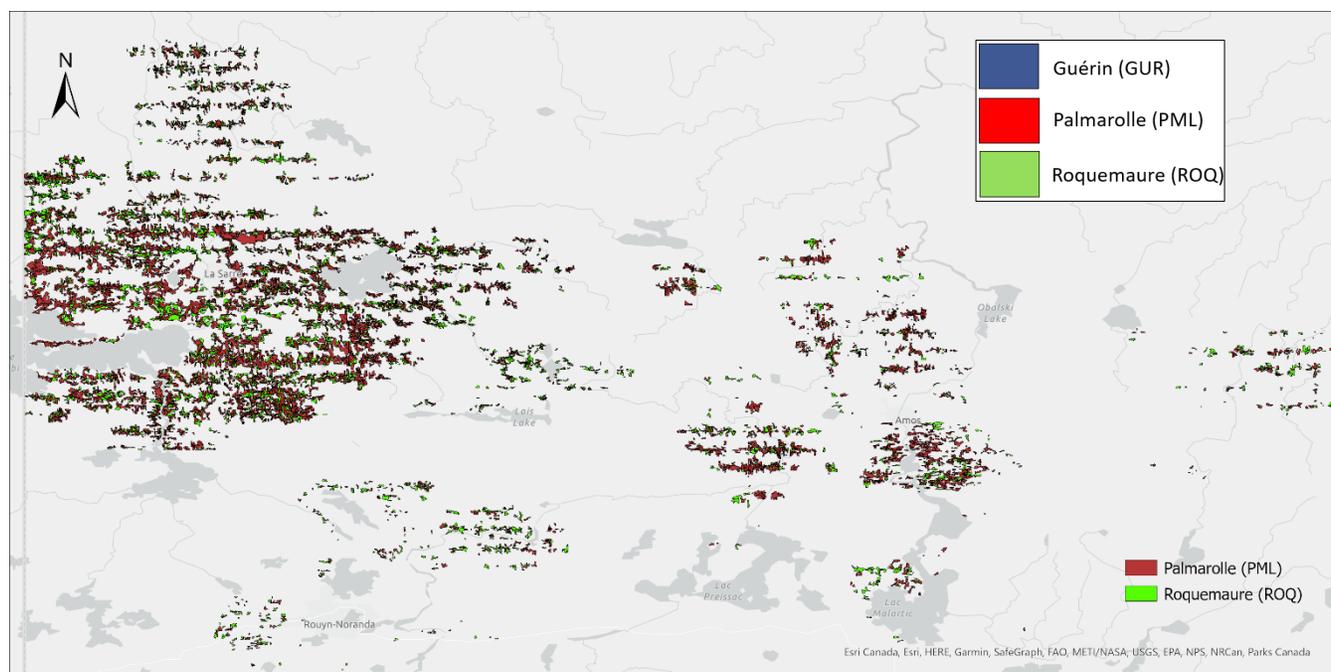


Figure 11 : Répartition géographique des sols du groupe 24 (Guérin, Palmarolle et Roquemaure) – secteur Nord.

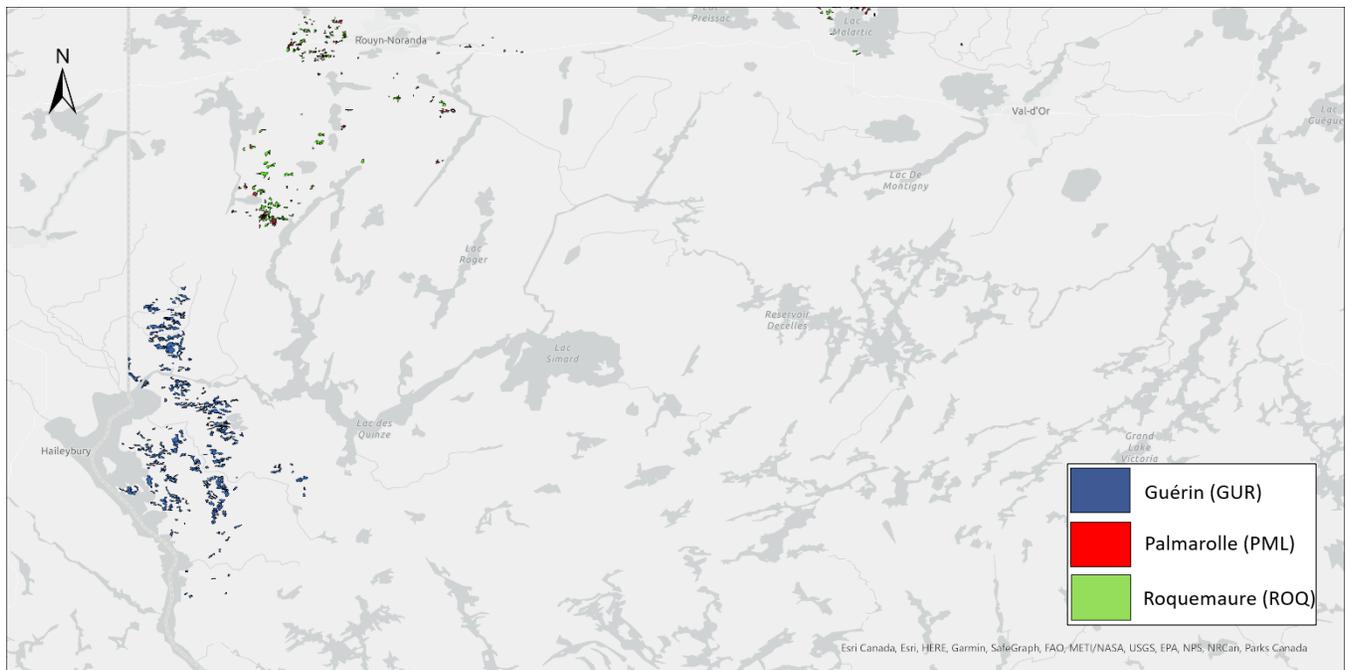


Figure 12 : Répartition géographique des sols du groupe 24 (Guérin, Palmarolle et Roquemaure) – secteur Sud.

Les sols cultivés ne présentent pas de signes apparents de dégradation de leurs propriétés physiques par rapport aux témoins (Tableau 42).

Tableau 42 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 24 (Guérin, Palmarolle et Roquemaure).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
Nombre d'observations	48	24	41	16	48	24
Sable (%)	5	1	6	0	2	0
Limon (%)	19	18	19	18	21	16
Argile (%)	76	81	75	82	77	84
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,10	1,04	1,12	1,10	1,34	1,32
Porosité totale (cm ³ /cm ³)	0,596	0,618	0,596	0,600	0,540	0,537
Macroporosité (cm ³ /cm ³)	0,149	0,139	0,140	0,125	0,086	0,066
Teneur en air au champ (cm ³ /cm ³)	0,201	0,168	0,182	0,148	0,118	0,094
Tortuosité des pores τ (—)	1,332	1,305	1,334	1,324	1,402	1,404
Diffusivité relative des gaz D/D0 (—)	0,006	0,004	0,006	0,003	0,001	0,000
Capacité au champ relative (—)	0,747	0,777	0,762	0,789	0,838	0,873
K _{sat} (cm/jour)			57,1	43,4	1,0	0,7
Diamètre moyen pondéré des agrégats (mm)	4,12	4,14				
Agrégats 4-8mm (%)	58,6	60,8				
Agrégats 2-4mm (%)	14,3	12,0				
Agrégats 1-2mm (%)	7,4	6,2				
Agrégats 0,5-1mm (%)	3,6	2,9				
Agrégats 0,25-0,5mm (%)	1,6	1,1				

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

K_{sat} : Conductivité hydraulique saturée mesurée à 15 cm (Ap2) et 40 cm de profondeur (B).

La masse volumique apparente demeure relativement faible autant dans les horizons Ap1 et Ap2 ($< 1,15 \text{ g/cm}^3$) que dans le B ($< 1,35 \text{ g/cm}^3$). Toutefois, la macroporosité est inférieure au seuil critique de $0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, la diffusivité relative des gaz est inférieure à $0,005$ et la capacité au champ relative est très élevée et supérieure à $0,7$ autant dans les horizons B des sols cultivés et que des témoins. La conductivité hydraulique saturée n'est pas différente entre sols cultivés et témoins, mais elle est inférieure au seuil de 10 cm/jour à 40 cm de profondeur indiquant une circulation de l'eau réduite.

Les pertes de sol par érosion indiquées par le mouvement net de sol au Tableau 43 ne sont pas significativement différentes entre en sols cultivés et témoins et elles ne dépassent pas le seuil d'érosion de 6 t/ha/an tolérable pour la plupart des sols au Canada.

Tableau 43 : Bilans de masse des sols du groupe 24 (Guérin, Palmarolle et Roquemaure).

Descripteurs	Cultivé	Témoin
Profondeur (cm)	37	35
Mouvement de sol (t/ha/an)	-5,5	-1,9
C_{total} (t/ha)	142	119
C_{M3} (kg/ha)	14	11
K_{M3} (kg/ha)	951	915
P_{M3} (kg/ha)	58	22
Zn_{M3} (kg/ha)	6,7	7,0

Les valeurs en gras indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$ entre sols cultivés et témoins.
Profondeur : correspond à la profondeur de l'horizon Ap plus 15 cm dans le B.

La teneur en matière organique n'est pas significativement différente entre sols cultivés et témoins (Tableau 44). Elle est très élevée dans les horizons Ap1 et Ap2. La teneur en carbone actif est significativement plus élevée dans l'horizon Ap2 des sols cultivés, toutefois les quantités de CO_2 dégagées et de N minéralisé après une incubation de 14 jours sont significativement plus faibles dans l'horizon Ap1 des sols cultivés indiquant des niveaux plus faibles de sources disponibles de C et N, ainsi qu'une activité microbologique plus faible que dans les sols témoins.

Tableau 44 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 24 (Guérin, Palmarolle et Roquemaure).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
M.O. (%)	6,93	8,49	6,72	5,04	2,37	2,82
C total (%)	4,01	4,92	3,89	2,92	1,38	1,63
N organique (mg/kg)	3 146	3 600	2 820	2 438	1 066	1 170
Ratio C/N	13,7	13,5	13,2	12,8	13,2	13,0
C actif (mg/kg)	743	796	692	505	284	272
Ratio C actif/C total (mg/g)	18,7	16,4	19,1	17,5	20,2	17,3
CO_2 dégagé 14 jours (mg/kg)	892	1 285	729	729	406	434
N minéralisé 14 jours (mg/kg)	75,2	108,4	60,7	57,0	16,4	18,3
Ratio N minéralisé/N org. (mg/g)	24,0	31,0	22,4	24,1	13,9	14,1

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

M.O. : matière organique du sol estimée avec C total Leco et un facteur de 1,724.

N organique : N total Leco moins N minéral.

Ratio C/N : C total Leco divisé par N total Leco.

Le pH des sols cultivés est significativement plus élevé que celui des témoins dans les trois horizons (Tableau 45). Toutefois, les sols cultivés demeurent faiblement acides (Ap1 et Ap2) ou neutres (B) en fonction de l'horizon. Quant aux sols témoins, leurs niveaux de pH varient de moyennement acides (Ap1) à neutres (B). La saturation des sols cultivés en bases échangeables est significativement plus élevée par rapport aux témoins dans les horizons Ap1 et Ap2, avec des niveaux allant d'élevés à très élevés pour le Ca, le Mg et le K et de faibles à moyens pour le Na. Le rapport monovalents sur bivalents ((K+Na)/(Ca+Mg)) dans l'horizon Ap1 est plus faible dans les sols cultivés que dans les témoins et s'explique en partie par un enrichissement en Ca dans les sols cultivés, significatif dans l'horizon B et d'une réduction des teneurs en K (Tableau 45).

Tableau 45 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 24 (Guérin, Palmarolle et Roquemaure).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
pH	6,4	5,8	6,4	6,0	7,1	7,0
pH _{SMP}	6,4	6,0	6,5	6,1	6,9	6,8
P _{M3} (mg/kg)	20,8	9,2	16,7	6,3	4,7	2,2
Al _{M3} (mg/kg)	946,2	1 072,5	956,5	1 115,3	905,3	943,6
Fe _{M3} (mg/kg)	258,4	303,7	266,7	297,7	200,9	217,2
ISP (%)	2,2	0,9	1,8	0,6	0,5	0,2
Mn _{M3} (mg/kg)	20,8	19,9	21,4	17,2	26,6	19,4
B _{M3} (mg/kg)	0,48	0,21	0,44	0,17	0,26	0,14
Cu _{M3} (mg/kg)	3,19	2,58	3,36	2,52	2,81	2,60
Zn _{M3} (mg/kg)	1,99	2,70	1,79	1,74	1,00	1,09
K _{M3} (cmol/kg)	0,567	0,671	0,531	0,534	0,526	0,525
Na _{M3} (cmol/kg)	0,127	0,154	0,148	0,211	0,200	0,238
Ca _{M3} (cmol/kg)	21,5	17,9	21,9	16,8	30,5	28,8
Mg _{M3} (cmol/kg)	5,35	4,93	5,42	5,18	6,04	5,76
(K+Na)/(Ca+Mg)	0,027	0,037	0,026	0,034	0,021	0,024
CEC (cmol/kg)	37,9	37,9	38,0	35,0	43,3	44,4
Sat. bases (%)	73,8	63,2	74,9	66,2	87,3	83,6

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

ISP : indice de saturation en phosphore.

CEC : capacité d'échange cationique.

M3 : extrait Mehlich-3.

Niveau d'interprétation (sauf Fe, B, ISP et (K+Na)/(Ca+Mg))

Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
-------------	--------	-------	-------	------------

Les sols cultivés ont une teneur en P significativement plus élevée que les témoins sur toute leur profondeur (Tableau 43 et Tableau 45). Toutefois, leur niveau de P demeure faible dans l'Ap1 et très faible dans les horizons Ap2 et B. La capacité de fixation des sols cultivés est plus faible que celle des témoins dans les horizons Ap1 et Ap2 tel qu'indiquée par leur teneur en Al. L'indice de saturation en P est plus élevé dans les sols cultivés que dans les témoins tout en demeurant très en-dessous de la valeur critique agroenvironnementale de 6 % au-delà de laquelle les recommandations en P ne devraient pas dépasser les exportations par les cultures (Tableau 45). Il y a un enrichissement des sols cultivés en B sur toute la profondeur du profil. Les niveaux des autres éléments mineurs varient de très faibles (Ap1) à faibles (horizon B) pour le Mn, de très faibles (horizon B) à modérés (Ap1) pour le Zn et élevés pour le Cu.

Synthèse de l'état de santé des sols du groupe 24 (Guérin, Palmarolle et Roquemaure).

Problèmes de dégradation observés dans les sols cultivés

- Les sols ne sont pas compacts en surface dans les horizons Ap1 et Ap2.
- L'aération et les conditions pour les échanges gazeux sont limitantes en profondeur dans l'horizon B.
- Les quantités d'eau en excès favorisent des processus anaérobies en profondeur dans l'horizon B.
- La circulation de l'eau est réduite à 40 cm de profondeur.
- La structure n'est pas dégradée.
- La teneur en matière organique est élevée et la teneur en C est supérieure à 2 % dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La respiration et la quantité d'azote minéralisable sont plus faibles dans l'horizon Ap1.
- La teneur en P et l'indice de saturation en P sont plus élevés dans les trois horizons, mais l'ISP demeure inférieur à 6 %.
- La teneur en B est plus élevée dans les trois horizons.
- La teneur en Cu est plus élevée dans l'horizon Ap2 et la teneur en Zn est plus faible dans l'horizon Ap1.
- Le bilan de masse de P est plus élevé dans le profil.

Sols loameux

Les sols loameux ont une plus grande proportion de limon que les sols argileux ou sableux, les rendant ainsi vulnérables à certaines formes de dégradation en lien avec la structure du sol. Comme pour les sols argileux, la granulométrie du matériau parental et la région pédologique dominante sont les critères qui ont permis de définir les groupes de séries de sols loameux. Les groupes sont situés dans les régions pédologiques de la Plaine de Montréal (A1), de la Plaine du Lac-Saint-Jean (A3), de la Plaine de l'Abitibi (D1) et des Hautes-terres du Saint-Laurent (A4) (Figure 13).

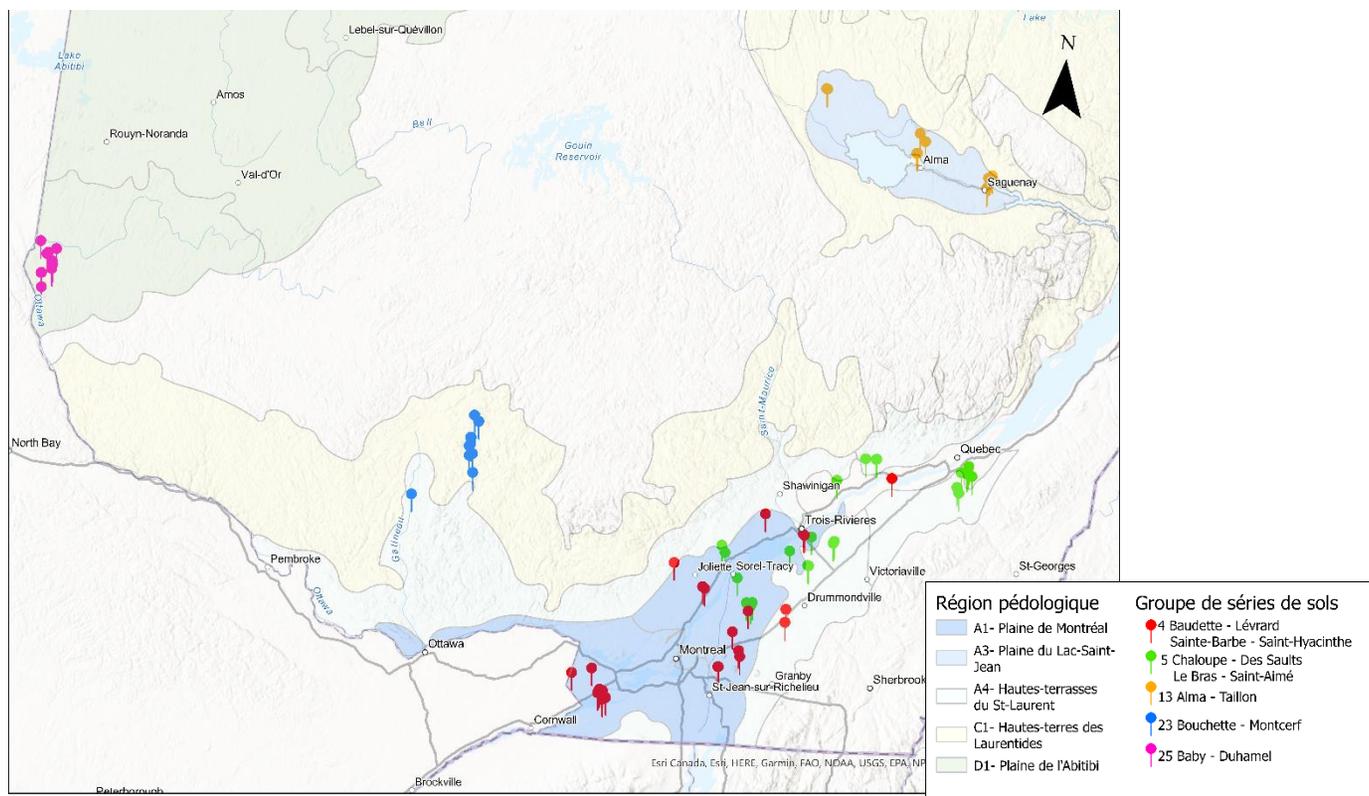


Figure 13 : Situation géographique des sites échantillonnés dans les sols issus de matériaux loameux et leurs régions pédologiques.

Les sols loameux sont représentés par 14 séries de sols. Elles ont été regroupées en cinq groupes de séries de sols. (Tableau 46). Les groupes 4 et 5 sont situés dans les mêmes régions pédologiques. La granulométrie du matériau parental est le critère utilisé pour séparer ces deux groupes. Les sols du groupe 4 ont un contenu en limon plus élevé que les sols du groupe 5. Les sols indiqués loameux dans le groupe 5 ont une granulométrie variant de « loameux-fin » à « loameux grossier ». Les sols des groupes 13, 23 et 25 sont tous limoneux-fins, mais ils sont situés à l'intérieur de régions pédologiques distinctes.

Tableau 46 : Caractéristiques définissant les groupes de séries de sols loameux.

Groupe	Série de sols	Granulométrie du matériau parental	Type de dépôt	Région pédologique dominante
4	Beaudette*	Limoneux-fin à loameux-fin	Alluvion récente	Plaine de Montréal
	Sainte-Barbe*	Limoneux-fin	Lacustre	Plaine de Montréal
	Saint-Hyacinthe*	Limoneux-fin (stratifié)	Lacustre	Plaine de Montréal
	Lévrard*	Limoneux-fin à loameux-fin	Lacustre	Hautes-terrasses du Saint-Laurent
5	Chaloupe*	Loameux-fin	Alluvion récente	Plaine de Montréal
	Saint-Aimé*	Loameux (stratifié)	Fluvio-lacustre	Plaine de Montréal
	Des Saults*	Loameux	Fluvio-lacustre	Hautes-terrasses du Saint-Laurent
	Le Bras	Loameux sur limoneux-fin à loameux-fin	Fluvio-lacustre sur lacustre	Hautes-terrasses du Saint-Laurent
13	Alma*	Limoneux-fin sur argileux	Lacustre sur marin	Plaine du lac Saint-Jean
	Taillon*	Limoneux-fin sur argileux	Lacustre sur marin	Plaine du lac Saint-Jean
23	Bouchette*	Limoneux-fin	Lacustre	Hautes-terres des Laurentides
	Montcerf	Limoneux-fin	Lacustre	Hautes-terres des Laurentides
25	Baby*	Limoneux-fin	Glacio-lacustre	Plaine de l'Abitibi
	Duhamel*	Limoneux-fin	Glacio-lacustre	Plaine de l'Abitibi

*Série de sols évaluée dans le cadre de l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec (Tabi et al., 1990).

Groupe 4 : Séries Beaudette, Sainte-Barbe, Saint-Hyacinthe et Lévrard

Les séries Beaudette, Sainte-Barbe, Saint-Hyacinthe et Lévrard se sont développées sur un matériau essentiellement limoneux-fin d'origine lacustre ou issu d'une alluvion récente (BET). Elles sont situées dans les régions pédologiques de la Plaine de Montréal et les Hautes-terrasse du Saint-Laurent, comme pour le groupe 5 (Figure 14). Les sols du groupe 5 sont légèrement plus grossiers que les sols du groupe 4.

Tableau 47 : Caractéristiques des sols du groupe 4 (Beaudette, Sainte-Barbe, Saint-Hyacinthe et Lévrard).

Caractéristiques	Beaudette (BET)	Sainte-Barbe (SBR)	Saint-Hyacinthe (SYT)	Lévrard (LVD)
Granulométrie du matériau, réaction	Limoneux-fin à loameux fin, neutre	Limoneux-fin, alcalin	Limoneux-fin stratifié, neutre	Limoneux-fin à loameux-fin, neutre
Type de dépôt	Alluvion récente	Lacustre	Lacustre	Lacustre
Classe de drainage	Mauvais	Mauvais	Mauvais	Mauvais
Groupe hydrologique	C	C	C	C
Taxonomie (sous-groupe)	Gleysol humique orthique	Gleysol humique orthique	Gleysol orthique	Gleysol humique orthique
Superficie cartographiée (ha)	13 760	8 482	15 962	20 415

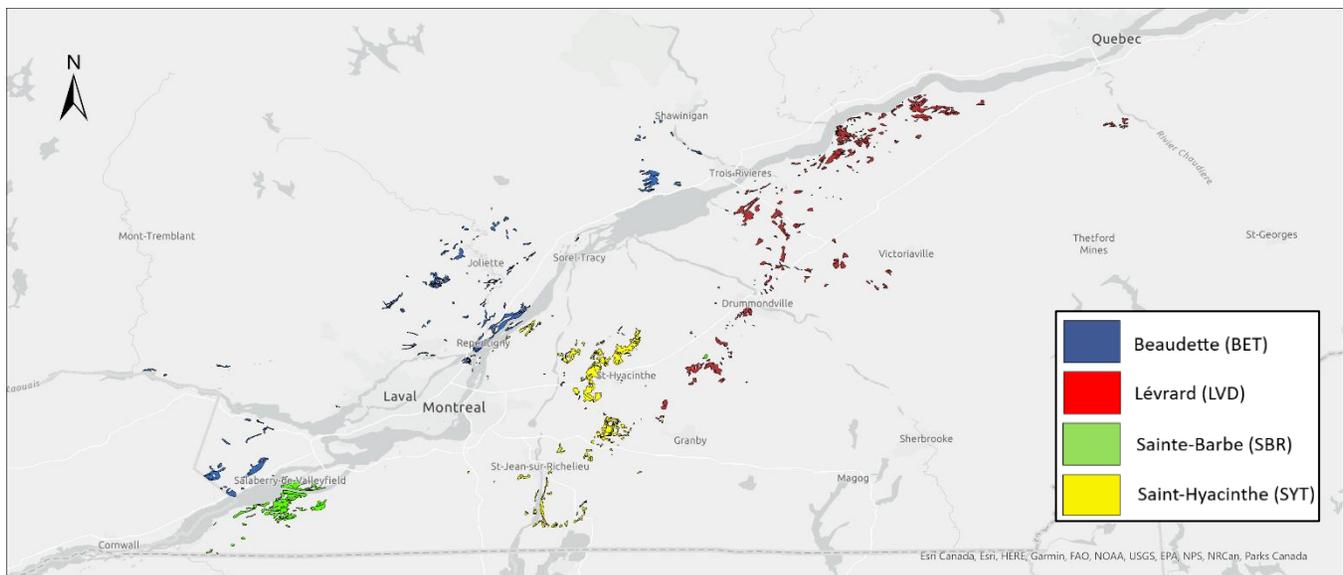


Figure 14 : Répartition géographique des sols du groupe 4 (Beaudette, Sainte-Barbe, Saint-Hyacinthe et Lévrard).

La masse volumique apparente et la porosité totale des sols cultivés ne sont pas différentes des sols témoins et donc n'apparaissent pas compactes (Tableau 48). Toutefois, une baisse de la macroporosité et de la teneur en air au champ dans les horizons Ap2 et B des sols cultivés par rapport aux témoins et sous le seuil critique de 0,10 cm³/cm³ indiquent une diminution de l'aération. La diffusivité relative des gaz est aussi plus faible et la capacité

au champ relative est plus élevée et supérieure au seuil de 0,7 dans ces mêmes horizons par rapport aux témoins. La conductivité hydraulique saturée n'est pas différente entre sols cultivés et témoins, mais elle est inférieure au seuil de 10 cm/jour à 40 cm de profondeur indiquant une circulation de l'eau réduite. La faible proportion des agrégats supérieurs à 2 mm (agrégats 2-4mm, agrégats 4-8mm) associée à un plus petit diamètre moyen pondéré (DMP) des sols cultivés indiquent une dégradation de la structure de ces sols.

Tableau 48 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 4 (Beaudette, Sainte-Barbe, Saint-Hyacinthe et Lévrard).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
Nombre d'observations	64	30	64	29	64	30
Sable (%)	18	22	19	22	20	30
Limon (%)	53	53	53	52	52	46
Argile (%)	29	25	28	26	28	24
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,25	1,25	1,44	1,43	1,60	1,57
Porosité totale (cm ³ /cm ³)	0,511	0,526	0,451	0,473	0,408	0,421
Macroporosité (cm ³ /cm ³)	0,171	0,164	0,082	0,120	0,055	0,089
Teneur en air au champ (cm ³ /cm ³)	0,228	0,248	0,109	0,198	0,070	0,139
Tortuosité des pores τ (—)	1,450	1,425	1,568	1,517	1,673	1,633
Diffusivité relative des gaz D/D0 (—)	0,014	0,011	0,002	0,004	0,000	0,002
Capacité au champ relative (—)	0,667	0,690	0,817	0,747	0,867	0,794
K _{sat} (cm/jour)			15,4	24,5	4,0	9,5
Diamètre moyen pondéré des agrégats (mm)	2,07	2,77				
Agrégats 4-8mm (%)	21,9	30,2				
Agrégats 2-4mm (%)	13,9	20,8				
Agrégats 1-2mm (%)	12,1	14,7				
Agrégats 0,5-1mm (%)	10,0	9,9				
Agrégats 0,25-0,5mm (%)	5,2	4,9				

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

K_{sat} : Conductivité hydraulique saturée mesurée à 15 cm (Ap2) et 40 cm de profondeur (B).

Les pertes de sol par érosion indiquées par le mouvement net de sol (Tableau 49) ne sont pas significativement différentes entre sols cultivés et témoins et elles ne dépassent pas le seuil d'érosion de 6 t/ha/an tolérable pour la plupart des sols au Canada.

Tableau 49 : Bilans de masse des sols du groupe 4 (Beaudette, Sainte-Barbe, Saint-Hyacinthe et Lévrard).

Descripteurs	Cultivé	Témoin
Profondeur (cm)	45	45
Mouvement de sol (t/ha/an)	-4,1	-2,3
C _{total} (t/ha)	97	113
C _{UM3} (kg/ha)	19	14
K _{M3} (kg/ha)	768	511
P _{M3} (kg/ha)	328	184
Zn _{M3} (kg/ha)	24,8	18,3

Les valeurs en gras indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10 entre sols cultivés et témoins.

Profondeur : correspond à la profondeur de l'horizon Ap plus 15 cm dans le B.

La teneur en matière organique des sols cultivés n'est pas statistiquement différente de celle des témoins (Tableau 50). Elle est de niveau modéré dans les horizons Ap1 et Ap2. Dans les témoins, le niveau de la matière organique est élevé dans l'Ap1 et modéré dans l'Ap2. Le ratio C actif/C total plus élevé dans les horizons Ap2 et B des sols cultivés est lié à la plus faible quantité de C total dans les sols cultivés. La quantité de CO₂ dégagée après une incubation de 14 jours est significativement plus faible dans les horizons Ap des sols cultivés indiquant un plus faible niveau d'activité microbologique. De plus, la teneur en azote organique, les quantités d'azote minéralisées après 14 jours et le ratio de N minéralisé sur l'azote organique sont plus faibles dans l'horizon Ap1 des sols cultivés.

Tableau 50 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 4 (Beaudette, Sainte-Barbe, Saint-Hyacinthe et Lévrard).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
M.O. (%)	3,48	4,31	3,29	3,51	1,40	1,70
C total (%)	2,02	2,50	1,91	2,03	0,81	0,99
N organique (mg/kg)	1 393	2 111	1 358	1 573	540	719
Ratio C/N	12,9	12,1	13,0	12,5	13,3	15,1
C actif (mg/kg)	510	584	483	427	223	225
Ratio C actif/C total (mg/g)	26,2	23,3	26,5	21,6	25,9	21,2
CO ₂ dégagé 14 jours (mg/kg)	348	685	321	422	190	244
N minéralisé 14 jours (mg/kg)	35,3	65,7	31,4	36,8	14,5	17,8
Ratio N minéralisé/N org. (mg/g)	22,5	30,5	22,9	23,8	15,6	18,2

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

M.O. : matière organique du sol estimée avec C total Leco et un facteur de 1,724.

N organique : N total Leco moins N minéral.

Ratio C/N : C total Leco divisé par N total Leco.

Le pH des sols cultivés est significativement plus élevé que celui des sols témoins dans les horizons Ap1 et Ap2 (Tableau 51). Toutefois, le pH des sols cultivés demeure neutre à toutes les profondeurs. Quant aux sols témoins, leurs niveaux d'acidité varient de légèrement acide dans l'horizon Ap1 à neutre dans l'horizon B.

La teneur en bases échangeables des sols cultivés n'est pas statistiquement différente de celle des sols témoins, exception faite de la teneur en K qui est significativement plus élevée dans l'horizon Ap2 des sols cultivés. Le niveau de K dans les sols cultivés varie de moyen (Ap1 et Ap2) à faible (horizon B). Quant aux autres bases échangeables, leur niveau dans les sols cultivés varie de très faible à faible pour le Na, moyen pour le Ca et de moyen à élevé pour le Mg.

La teneur en P dans les sols cultivés a significativement augmenté par rapport aux témoins dans les horizons Ap1 et Ap2. Toutefois, le niveau de P dans ces sols demeure modéré dans l'Ap1, faible dans l'Ap2 et très faible dans l'horizon B. Même si l'indice de saturation en P (ISP) est plus élevé dans les horizons Ap1 et Ap2 par rapport aux témoins, les sols cultivés ont un indice de saturation en P en-dessous de la valeur critique agroenvironnementale de 11 % pour ces sols de texture moyenne. La teneur en éléments mineurs n'est pas significativement différente entre les sols cultivés et témoins, à l'exception de la teneur en Zn dans l'horizon Ap2. Les niveaux des éléments mineurs dans les sols cultivés varient de moyens à élevés pour le Zn et le Cu, et faibles pour le Mn.

Tableau 51 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 4 (Beaudette, Sainte-Barbe, Saint-Hyacinthe et Lévrard).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
pH	6,6	6,0	6,6	6,2	7,0	6,6
pH _{SMP}	6,9	6,6	6,9	6,7	7,1	6,9
P _{M3} (mg/kg)	60,4	33,8	52,1	26,3	18,8	15,2
Al _{M3} (mg/kg)	800,6	889,3	818,3	920,9	812,6	815,5
Fe _{M3} (mg/kg)	274,8	313,5	285,9	313,2	227,3	286,6
ISP (%)	7,7	3,7	6,9	3,1	2,4	2,2
Mn _{M3} (mg/kg)	29,9	23,6	29,9	21,8	33,5	25,0
B _{M3} (mg/kg)	0,57	0,43	0,54	0,34	0,27	0,15
Cu _{M3} (mg/kg)	3,15	2,24	2,99	2,10	2,29	1,73
Zn _{M3} (mg/kg)	4,32	3,77	3,89	2,57	2,16	1,74
K _{M3} (cmol/kg)	0,305	0,245	0,272	0,189	0,218	0,172
Na _{M3} (cmol/kg)	0,059	0,048	0,066	0,056	0,091	0,073
Ca _{M3} (cmol/kg)	11,5	9,2	11,1	8,6	9,6	7,4
Mg _{M3} (cmol/kg)	2,46	1,80	2,56	1,79	2,95	2,25
(K+Na)/(Ca+Mg)	0,028	0,028	0,027	0,025	0,026	0,026
CEC (cmol/kg)	19,9	20,8	19,7	19,6	16,9	16,6
Sat. Bases (%)	75,8	62,7	75,0	63,3	80,6	72,4

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

ISP : indice de saturation en phosphore.

CEC : capacité d'échange cationique.

M3 : extrait Mehlich-3.

Niveau d'interprétation (sauf Fe, B, ISP et (K+Na)/(Ca+Mg))

Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
-------------	--------	-------	-------	------------

Synthèse de l'état de santé des sols du groupe 4 (Beaudette, Sainte-Barbe, Saint-Hyacinthe et Lévrard).

Problèmes de dégradation observés dans les sols cultivés

- Les sols ne sont pas compacts.
- L'aération et les conditions pour les échanges gazeux sont limitantes en profondeur dans les horizons Ap2 et B.
- Les quantités d'eau en excès favorisent des processus anaérobies en profondeur dans les horizons Ap2 et B.
- La circulation de l'eau est réduite à 40 cm de profondeur.
- La structure est dégradée dans l'horizon Ap1.
- La teneur en matière organique est modérée, mais la teneur en C est proche du seuil critique de 2 % dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La respiration et la quantité d'azote minéralisable sont plus faibles dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La teneur en P et l'indice de saturation en P sont plus élevés dans les horizons Ap1 et Ap2, mais l'ISP demeure inférieur à 11 %.
- La teneur en B est plus élevée dans l'horizon B.
- Les teneurs en K et en Zn sont plus élevées dans l'horizon Ap2.
- Les bilans de masse de P et de K sont plus élevés dans le profil.

Groupe 5 : Séries Chaloupe, Saint-Aimé, Des Saults et Le Bras

Les séries Chaloupe, Saint-Aimé, Des Saults et Le Bras se sont développées sur un matériau essentiellement loameux (plus grossier que les sols du groupe 4) d'origine fluvio-lacustre ou issu d'une alluvion récente (COP). Elles sont situées dans les régions pédologiques de la Plaine de Montréal et les Hautes-terrasse du Saint-Laurent.

Tableau 52 : Caractéristiques des sols du groupe 5 (Chaloupe, Saint-Aimé, Des Saults et Le Bras).

Caractéristiques	Chaloupe (COP)	Saint-Aimé (SIT)	Des Saults (DSU)	Le Bras (LBS)
Granulométrie 1, réaction / Granulométrie 2, réaction	Loameux-fin, neutre	Loameux (stratifié), alcalin	Loameux, neutre	Loameux, neutre / Limoneux-fin à loameux-fin, neutre
Type de dépôt 1 / Type de dépôt 2	Alluvion récente	Fluvio-Lacustre	Fluvio-Lacustre	Fluvio-lacustre / Lacustre
Classe de drainage	Mauvais	Mauvais	Mauvais	Mauvais
Groupe hydrologique	B	C	B	C
Taxonomie (sous-groupe)	Gleysol humique orthique	Gleysol humique orthique	Gleysol orthique	Gleysol humique orthique
Superficie cartographiée (ha)	17 119	15 379	13 495	3 827

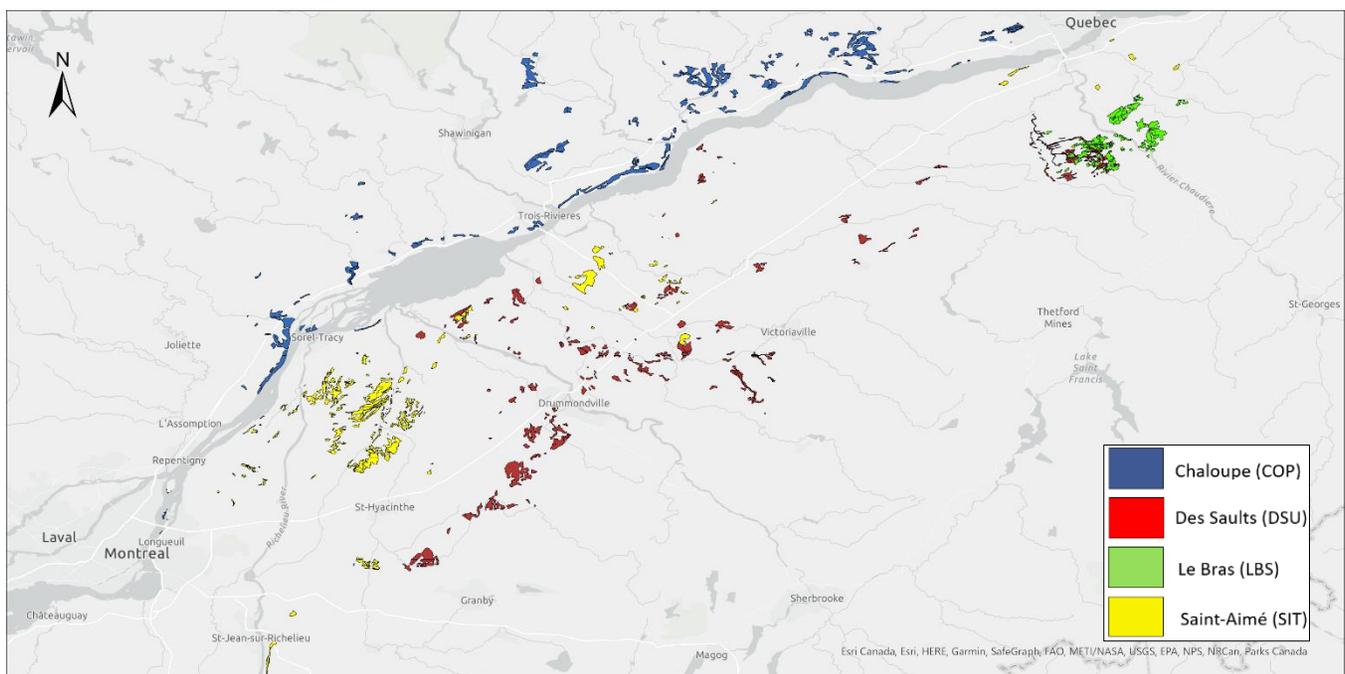


Figure 15 : Répartition géographique des sols du groupe 5 (Chaloupe, Saint-Aimé, Des Saults et Le Bras).

L'augmentation de la masse volumique apparente associée à une diminution significative de la porosité totale de l'horizon Ap1 des sols cultivés par rapport aux témoins indique une compaction superficielle de ces sols. La macroporosité est inférieure au seuil de $0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ en profondeur dans l'horizon B aussi bien dans les sites cultivés que témoins, indiquant des problèmes d'aération possiblement d'ordre naturel. La conductivité hydraulique saturée n'est pas différente entre sols cultivés et témoins, mais elle est inférieure au seuil de 10

cm/jour à 40 cm de profondeur indiquant une circulation de l'eau réduite. La structure des sols cultivés est aussi légèrement dégradée. Il y a une diminution significative de la proportion des agrégats dont le diamètre est compris entre 1 et 4 mm (agrégats 1-2 mm, agrégats 2-4 mm). La proportion d'agrégats supérieurs à 4 mm et le DMP tendent aussi à diminuer dans les sols cultivés.

Tableau 53 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 5 (Chaloupe, Saint-Aimé, Des Saults et Le Bras).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
Nombre d'observations	64	28	63	28	64	28
Sable (%)	42	35	40	36	32	29
Limon (%)	39	45	41	45	46	49
Argile (%)	19	20	19	19	22	22
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,24	1,14	1,37	1,36	1,58	1,57
Porosité totale (cm ³ /cm ³)	0,522	0,568	0,473	0,480	0,406	0,417
Macroporosité (cm ³ /cm ³)	0,171	0,172	0,117	0,111	0,072	0,083
Teneur en air au champ (cm ³ /cm ³)	0,224	0,240	0,145	0,165	0,090	0,098
Tortuosité des pores τ (—)	1,439	1,365	1,527	1,507	1,694	1,661
Diffusivité relative des gaz D/D0 (—)	0,014	0,010	0,004	0,003	0,001	0,002
Capacité au champ relative (—)	0,670	0,700	0,751	0,769	0,821	0,798
K _{sat} (cm/jour)			17,8	10,8	7,1	5,0
Diamètre moyen pondéré des agrégats (mm)	2,22	2,70				
Agrégats 4-8mm (%)	23,7	28,7				
Agrégats 2-4mm (%)	12,9	21,3				
Agrégats 1-2mm (%)	10,3	16,3				
Agrégats 0,5-1mm (%)	8,0	9,9				
Agrégats 0,25-0,5mm (%)	4,7	4,9				

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

K_{sat} : Conductivité hydraulique saturée mesurée à 15 cm (Ap2) et 40 cm de profondeur (B).

Les pertes de sol par érosion indiquées par le mouvement net de sol au Tableau 54 ne sont pas significativement différentes entre sols cultivés et témoins, et elles ne dépassent pas le seuil d'érosion de 6 t/ha/an tolérable pour la plupart des sols au Canada.

Tableau 54 : Bilans de masse des sols du groupe 5 (Chaloupe, Saint-Aimé, Des Saults et Le Bras).

Descripteurs	Cultivé	Témoin
Profondeur (cm)	46	44
Mouvement net de sols (t/ha/an)	-4,1	0,2
C _{total} (t/ha)	115	109
C _{M3} (kg/ha)	14	14
K _{M3} (kg/ha)	513	305
P _{M3} (kg/ha)	550	390
Zn _{M3} (kg/ha)	20,7	18,4

Les valeurs en gras indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$ entre sols cultivés et témoins.

Profondeur : correspond à la profondeur de l'horizon Ap plus 15 cm dans le B.

La teneur en matière organique des sols cultivés n'est pas statistiquement différente de celle des témoins (Tableau 55). Elle est modérée dans les horizons Ap1 et Ap2. Dans les témoins, le niveau de la matière organique est élevé dans l'Ap1 et modéré dans l'Ap2. La quantité de CO₂ dégagée après une incubation de 14 jours est significativement plus faible dans les trois horizons des sols cultivés indiquant un plus faible niveau d'activité microbologique. De plus, la teneur en azote organique et les quantités d'azote minéralisées après 14 jours sont plus faibles dans l'horizon Ap1 des sols cultivés.

Tableau 55 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 5 (Chaloupe, Saint-Aimé, Des Saults et Le Bras).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
M.O. (%)	3,84	4,87	3,46	3,45	1,88	1,72
C total (%)	2,23	2,82	2,00	2,00	1,09	0,99
N organique (mg/kg)	1 506	2 209	1 356	1 501	704	793
Ratio C/N	14,0	13,0	14,4	13,5	13,9	13,0
C actif (mg/kg)	478	569	393	390	215	206
Ratio C actif/C total (mg/g)	22,6	20,8	20,9	20,1	19,6	20,3
CO ₂ dégagé 14 jours (mg/kg)	349	718	274	411	154	247
N minéralisé 14 jours (mg/kg)	43,7	65,7	34,0	37,3	15,2	16,0
Ratio N minéralisé/N org. (mg/g)	26,7	28,6	23,7	24,5	13,5	14,3

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

M.O. : matière organique du sol estimée avec C total Leco et un facteur de 1,724.

N organique : N total Leco moins N minéral.

Ratio C/N : C total Leco divisé par N total Leco.

Les sols cultivés ont un pH significativement plus élevé que les témoins dans l'horizon Ap1 (Tableau 56). Ils demeurent toutefois faiblement acides sur toute leur profondeur. Quant aux témoins, leurs niveaux d'acidité varient de moyennement à faiblement acides. La teneur en K et en Ca est significativement plus élevée dans les trois horizons des sols cultivés par rapport aux témoins. Le niveau de Ca demeure toutefois faible dans les sols cultivés et témoins, alors que celui de K varie de moyen à faible dans les sols cultivés et de faible à très faible dans les témoins. Quant aux niveaux de Mg et Na, ils sont respectivement faibles et très faibles dans les sols cultivés et témoins.

Les teneurs en P sont significativement plus élevées dans les sols cultivés sur toute leur profondeur par rapport aux témoins avec des niveaux élevés dans les horizons Ap1 et Ap2, et faibles dans l'horizon B (Tableau 56). Le bilan de masse de P sur le profil de sol est aussi supérieur à 500 kg/ha dans les sols cultivés (Tableau 54). Le niveau de P dans les témoins varie de faible (horizon B) à moyen (Ap1 et Ap2). De plus, les teneurs en Al sont significativement plus faibles dans les trois horizons des sols cultivés par rapport aux témoins indiquant qu'ils sont moins fixateurs de P. L'indice de saturation en P est constamment plus élevé dans les sols cultivés. Il est à la limite de la valeur critique agroenvironnementale de 11 % dans l'horizon Ap2 et la dépasse dans l'Ap1.

Les teneurs en B dans les horizons Ap1 et Ap2, et en Zn dans l'Ap2 sont significativement plus élevées dans les sols cultivés que dans les témoins. Les niveaux de Zn dans les sols cultivés sont élevés dans les horizons Ap1 et Ap2 mais faibles dans l'horizon B. La teneur en Cu dans les sols cultivés varie de moyenne (Ap1 et Ap2) à faible (horizon B) alors que celle en Mn est très faible dans les trois horizons.

Tableau 56 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 5 (Chaloupe, Saint-Aimé, Des Saults et Le Bras).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
pH	6,3	5,6	6,3	5,9	6,5	6,3
pH _{SMP}	6,8	6,3	6,8	6,5	6,9	6,7
P _{M3} (mg/kg)	117,8	71,2	95,3	56,4	41,3	29,8
Al _{M3} (mg/kg)	886,5	1 048,7	902,2	1 069,4	868,2	1 036,6
Fe _{M3} (mg/kg)	295,6	325,7	292,5	300,5	239,8	237,0
ISP (%)	13,9	8,3	11,0	6,4	4,0	1,3
Mn _{M3} (mg/kg)	21,1	14,9	17,4	11,8	19,7	16,6
B _{M3} (mg/kg)	0,42	0,26	0,33	0,20	0,21	0,12
Cu _{M3} (mg/kg)	2,25	2,41	1,95	1,75	1,44	1,21
Zn _{M3} (mg/kg)	4,56	3,62	3,01	2,04	1,89	1,29
K _{M3} (cmol/kg)	0,261	0,189	0,202	0,109	0,164	0,099
Na _{M3} (cmol/kg)	0,043	0,060	0,047	0,063	0,064	0,072
Ca _{M3} (cmol/kg)	7,8	4,7	7,2	4,5	6,8	4,3
Mg _{M3} (cmol/kg)	0,96	0,94	0,89	0,73	1,15	0,92
(K+Na)/(Ca+Mg)	0,037	0,048	0,033	0,038	0,030	0,030
CEC (cmol/kg)	15,9	18,7	15,0	16,4	13,6	14,5
Sat. bases (%)	59,2	36,0	58,0	39,1	62,5	46,8

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

ISP : indice de saturation en phosphore.

CEC : capacité d'échange cationique.

M3 : extrait Mehlich-3.

Niveau d'interprétation (sauf Fe, B, ISP et (K+Na)/(Ca+Mg))

Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
-------------	--------	-------	-------	------------

Synthèse de l'état de santé des sols du groupe 5 (Chaloupe, Saint-Aimé, Des Saults et Le Bras).

Problèmes de dégradation observés dans les sols cultivés

- Les sols sont plus compacts en surface dans l'horizon Ap1.
- La structure est légèrement dégradée dans l'horizon Ap1.
- L'aération et les conditions pour les échanges gazeux sont limitantes en profondeur dans l'horizon B.
- Les quantités d'eau en excès favorisent des processus anaérobies en profondeur dans l'horizon B.
- La circulation de l'eau est réduite à 40 cm de profondeur.
- La teneur en matière organique est modérée, mais la teneur en C est proche du seuil critique de 2 %.
- La respiration et la quantité d'azote minéralisable sont plus faibles dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La teneur en P et l'indice de saturation en P sont plus élevés dans les horizons Ap1 et Ap2 et l'ISP est supérieur à 11 %.
- Les teneurs en B et en Zn sont plus élevées dans l'horizon Ap2.
- Les teneurs en K et en Ca sont plus élevées dans les trois horizons.
- Le bilan de masse de K est plus élevé dans le profil.

Groupe 13 : Séries Alma et Taillon

Les séries Alma et Taillon se sont développées sur un matériau limoneux-fin d'origine lacustre déposé sur un matériau argileux d'origine marine dans la région pédologique de la Plaine du Lac-Saint-Jean.

Tableau 57 : Caractéristiques des sols du groupe 13 (Alma et Taillon).

Caractéristiques	Alma (ALM)	Taillon (TLL)
Granulométrie du matériau 1, réaction / Granulométrie du matériau 2, réaction	Limoneux-fin, neutre / Argileux, neutre	Limoneux-fin, neutre / Argileux, neutre
Type de dépôt 1 / Type de dépôt 2	Lacustre / Marin	Lacustre / Marin
Classe de drainage	Mauvais	Imparfait
Groupe hydrologique	C	C
Taxonomie (sous-groupe)	Gleysol orthique	Brunisol dystrique orthique
Superficie cartographiée (ha)	25 290	19 135

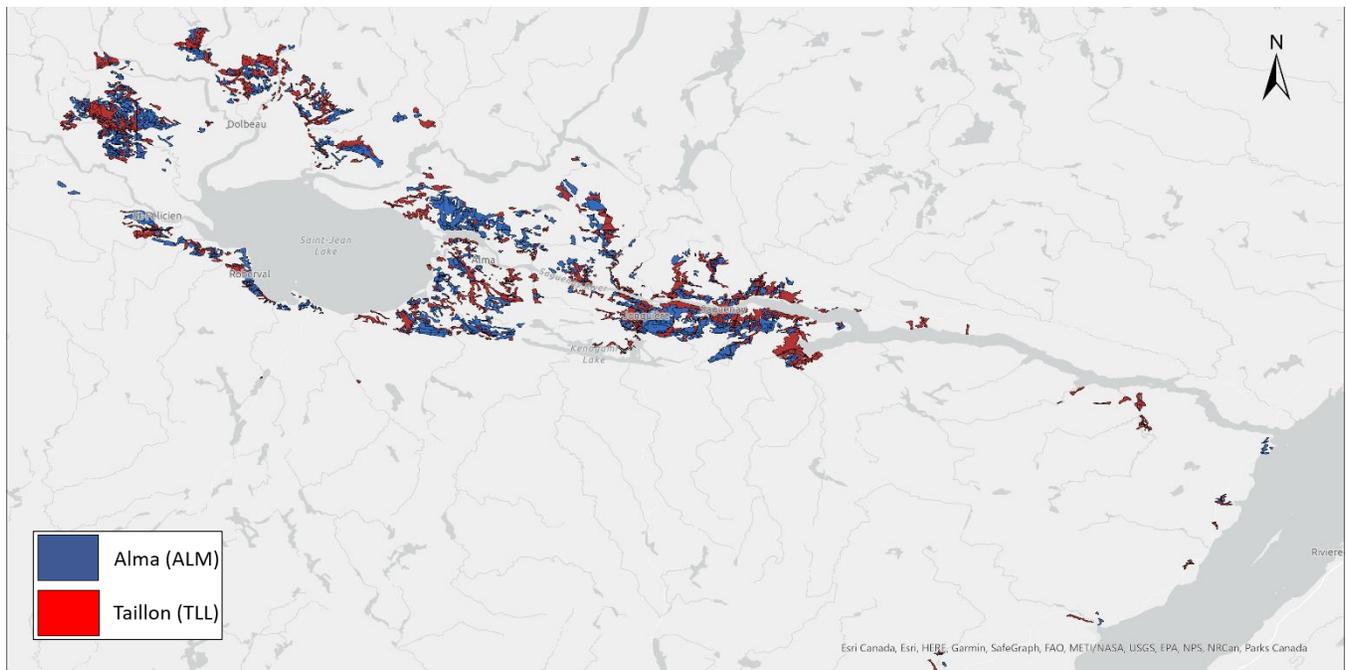


Figure 16 : Répartition géographique des sols du groupe 13 (Alma et Taillon).

L'augmentation de la masse volumique apparente dans l'horizon Ap1 des sols cultivés par rapport aux témoins, mais à des niveaux inférieurs à $1,10 \text{ g/cm}^3$ indique une très légère compaction superficielle de ces sols. La macroporosité est inférieure au seuil de $0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ en profondeur dans l'horizon B, aussi bien dans les sites cultivés que témoins, indiquant des problèmes d'aération possiblement d'ordre naturel. La diffusivité relative des gaz inférieure à 0,005 et la capacité au champ relative supérieure à 0,7 dans l'horizon B de ces sols indiquent des conditions favorisant des processus anaérobies. La conductivité hydraulique saturée n'est pas différente entre sols cultivés et témoins, mais elle est inférieure au seuil de 10 cm/jour à 40 cm de profondeur indiquant une

circulation de l'eau réduite. Il y a une diminution significative de la proportion des agrégats dont le diamètre est compris entre 2 et 4 mm dans les sols cultivés par rapport aux témoins. À l'inverse, la proportion d'agrégats compris entre 0,25 et 0,50 mm est plus élevée dans les sols cultivés.

Tableau 58 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 13 (Alma et Taillon).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
Nombre d'observations	32	15	30	10	32	15
Sable (%)	22	22	22	23	19	17
Limon (%)	44	44	44	45	44	49
Argile (%)	34	34	34	32	37	34
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,03	0,90	1,14	1,11	1,54	1,46
Porosité totale (cm ³ /cm ³)	0,616	0,656	0,570	0,586	0,439	0,455
Macroporosité (cm ³ /cm ³)	0,205	0,238	0,142	0,163	0,080	0,096
Teneur en air au champ (cm ³ /cm ³)	0,255	0,315	0,192	0,225	0,114	0,112
Tortuosité des pores τ (—)	1,307	1,264	1,358	1,335	1,598	1,573
Diffusivité relative des gaz D/D0 (—)	0,017	0,021	0,005	0,008	0,001	0,002
Capacité au champ relative (—)	0,668	0,636	0,756	0,721	0,821	0,787
K _{sat} (cm/jour)			14,4	26,9	7,1	29,8
Diamètre moyen pondéré des agrégats (mm)	2,31	2,42				
Agrégats 4-8mm (%)	23,2	21,0				
Agrégats 2-4mm (%)	19,3	25,2				
Agrégats 1-2mm (%)	17,1	20,6				
Agrégats 0,5-1mm (%)	13,0	11,5				
Agrégats 0,25-0,5mm (%)	9,1	5,6				

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

K_{sat} : Conductivité hydraulique saturée mesurée à 15 cm (Ap2) et 40 cm de profondeur (B).

Les pertes de sol par érosion indiquées par le mouvement net de sol au Tableau 59 ne sont pas significativement différentes entre sols cultivés et témoins et elles ne dépassent pas le seuil d'érosion de 6 t/ha/an tolérable pour la plupart des sols au Canada.

Tableau 59 : Bilans de masse des sols du groupe 13 (Alma et Taillon).

Descripteurs	Cultivé	Témoin
Profondeur (cm)	41	36
Mouvement net de sol (t/ha/an)	-1,8	-2,0
C _{total} (t/ha)	119	99
C _{UM3} (kg/ha)	5	4
K _{M3} (kg/ha)	797	972
P _{M3} (kg/ha)	117	94
Zn _{M3} (kg/ha)	5,4	4,8

Les valeurs en gras indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10 entre sols cultivés et témoins.

Profondeur : correspond à la profondeur de l'horizon Ap plus 15 cm dans le B.

La teneur en matière organique n'est pas statistiquement différente entre les sols cultivés et témoins (Tableau 60). Elle est très élevée dans l'Ap1 et élevée dans l'Ap2 des sols cultivés et des témoins. La quantité de CO₂ dégagée et le ratio de N minéralisé sur l'azote organique après une incubation de 14 jours sont significativement plus faibles dans les horizons Ap1 et B des sols cultivés indiquant un plus faible niveau d'activité microbologique et de capacité du sol à minéraliser de l'azote. La quantité d'azote minéralisée après 14 jours est aussi plus faible dans l'horizon Ap1 des sols cultivés.

Tableau 60 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 13 (Alma et Taillon).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
M.O. (%)	6,30	7,09	5,45	5,01	1,76	2,10
C total (%)	3,65	4,11	3,16	2,90	1,02	1,22
N organique (mg/kg)	2 483	3 089	2 060	2 025	739	824
Ratio C/N	14,7	13,3	15,1	14,1	14,1	14,8
C actif (mg/kg)	588	741	489	565	191	257
Ratio C actif/C total (mg/g)	16,5	18,3	16,4	20,4	19,0	22,7
CO₂ dégagé 14 jours (mg/kg)	515	841	382	436	151	236
N minéralisé 14 jours (mg/kg)	53,2	89,4	38,5	46,1	8,7	14,7
Ratio N minéralisé/N org. (mg/g)	21,3	29,2	19,3	24,7	10,9	20,5

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

M.O. : matière organique du sol estimée avec C total Leco et un facteur de 1,724.

N organique : N total Leco moins N minéral.

Ratio C/N : C total Leco divisé N total Leco.

L'acidité active (pH eau) des sols cultivés n'est pas différente de celle des sols témoins. Les niveaux d'acidité mesurés (cultivés et témoins) sont faibles (Tableau 61). La teneur en Ca dans l'Ap2 est significativement plus élevée dans les sols cultivés par rapport aux témoins. À l'inverse, les sols cultivés ont moins de K dans l'horizon Ap1 par rapport aux témoins. En général, les niveaux des bases échangeables dans les sols cultivés varient de faibles à moyens.

La teneur en P dans les sols cultivés n'est pas différente de celle dans les témoins (Tableau 61). Le niveau de P dans les sols (cultivés et témoins) varie de faible dans les horizons Ap1 et Ap2 à très faible dans l'horizon B (Tableau 61). De plus, les sols du groupe 13 ont une bonne capacité de fixation en P comme l'indique leur teneur élevée en Al (> 1100 mg/kg). La faible teneur en P associée à la bonne capacité de fixation de ces sols résulte en un indice de saturation en P nettement inférieur à la valeur critique agroenvironnementale de 11 %. La teneur en éléments mineurs n'est pas significativement différente entre les sols cultivés et témoins. Les niveaux des éléments mineurs dans les sols cultivés varient de très faibles à moyens pour le Zn, et sont très faibles pour le Cu et le Mn.

Tableau 61 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 13 (Alma et Taillon).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
pH	6,1	5,9	6,1	6,1	6,3	6,2
pH _{SMP}	6,3	6,1	6,3	6,3	6,5	6,5
P _{M3} (mg/kg)	25,8	30,4	22,7	20,9	18,1	19,4
Al _{M3} (mg/kg)	1 575,1	1 511,3	1 592,7	1 578,6	1 395,5	1 389,9
Fe _{M3} (mg/kg)	148,4	184,2	164,0	161,6	208,5	188,4
ISP (%)	1,9	2,1	1,7	1,5	1,4	1,5
Mn _{M3} (mg/kg)	7,6	13	6,7	9,0	7,8	7,4
B _{M3} (mg/kg)	0,46	0,26	0,34	0,21	0,14	0,10
Cu _{M3} (mg/kg)	1,00	0,87	0,94	0,69	0,82	0,77
Zn _{M3} (mg/kg)	1,34	1,93	1,12	1,10	0,87	0,84
K _{M3} (cmol/kg)	0,433	0,846	0,372	0,441	0,283	0,40
Na _{M3} (cmol/kg)	0,076	0,064	0,090	0,082	0,132	0,093
Ca _{M3} (cmol/kg)	9,7	7,8	9,0	5,6	7,7	5,3
Mg _{M3} (cmol/kg)	0,92	1,29	0,90	0,99	1,47	1,36
(K+Na)/(Ca+Mg)	0,054	0,102	0,045	0,111	0,051	0,095
CEC (cmol/kg)	22,9	22,9	21,8	20,0	18,3	16,9
Sat. bases (%)	49,9	43,6	47,6	42,5	51,9	46,1

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

ISP : indice de saturation en phosphore.

CEC : capacité d'échange cationique.

M3 : extrait Mehlich-3.

Niveau d'interprétation (sauf Fe, B, ISP et (K+Na)/(Ca+Mg))

Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
-------------	--------	-------	-------	------------

Synthèse de l'état de santé des sols du groupe 13 (Alma et Taillon).

Problèmes de dégradation observés dans les sols cultivés

- Les sols ne sont pas compacts en surface.
- L'aération et les conditions pour les échanges gazeux sont limitantes en profondeur dans l'horizon B.
- Les quantités d'eau en excès favorisent des processus anaérobies en profondeur dans l'horizon B.
- La circulation de l'eau est réduite à 40 cm de profondeur.
- La structure est légèrement dégradée dans l'horizon Ap1.
- La teneur en matière organique est élevée à très élevée dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La respiration et la quantité d'azote minéralisable sont plus faibles dans l'horizon Ap1.

Groupe 23 : Séries Bouchette et Montcerf

Les séries Bouchette et Montcerf se sont développées sur un matériau limoneux-fin d'origine lacustre dans la région pédologique des Hautes-terrasse des Laurentides.

Tableau 62 : Caractéristiques des sols du groupe 23 (Bouchette et Montcerf).

Caractéristiques	Bouchette (BCT)	Montcerf (MTF)
Granulométrie du matériau, réaction	Limoneux-fin, neutre	Limoneux-fin, neutre
Type de dépôt	Lacustre	Lacustre
Classe de drainage	Imparfait	Mauvais
Groupe hydrologique	C	C
Taxonomie (sous-groupe)	Podzol humo-ferrique orthique	Gleysol orthique
Superficie cartographiée (ha)	16 621	11 063

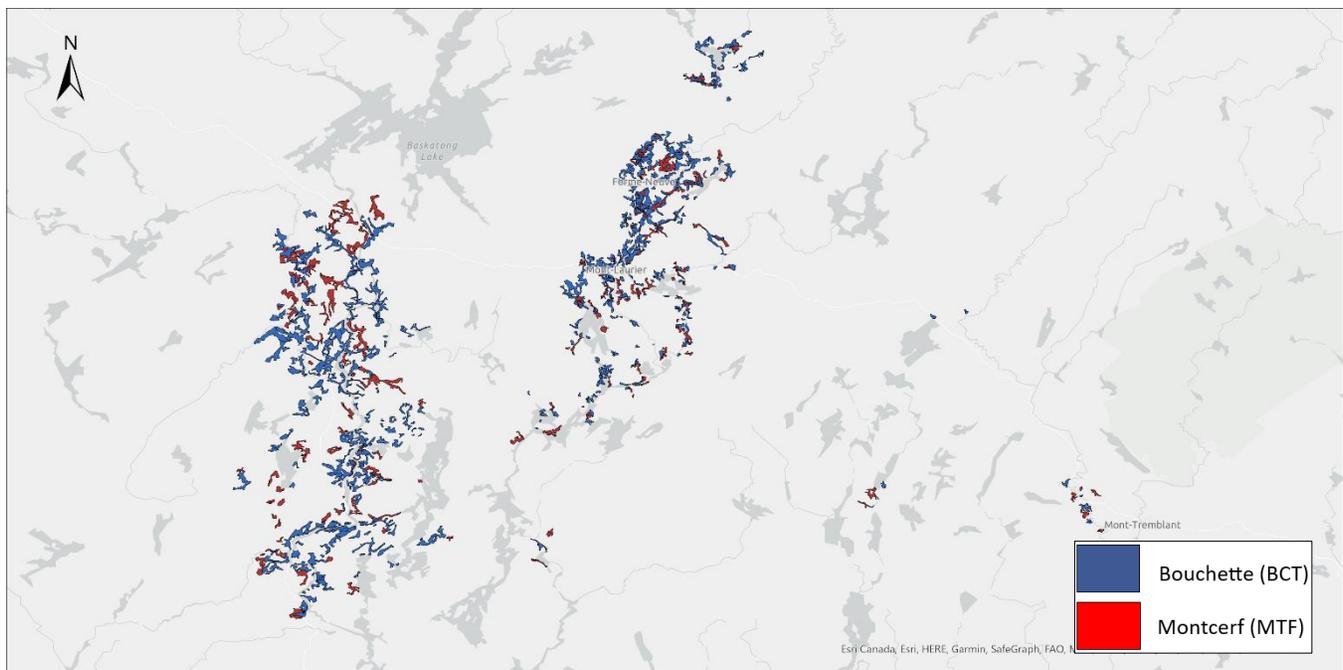


Figure 17 : Répartition géographique des sols du groupe 23 (Bouchette et Montcerf).

La masse volumique apparente des horizons Ap1 et Ap2 des sols cultivés est plus élevée que celles des sols témoins, mais demeure relativement faible ($< 1,10 \text{ g/cm}^3$). On note aussi une diminution significative de la porosité totale et de la macroporosité dans l'horizon Ap1. Cette dernière et la teneur en air au champ étant sous le seuil de $0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ dans les horizons Ap2 et B des sols cultivés, ces sols pourraient manquer d'aération. La diffusivité relative des gaz est significativement plus faible dans l'horizon Ap1 des sols cultivés, mais elle est faible ($< 0,005$) dans tous les horizons cultivés ou témoins. De la même manière, la capacité au champ relative est très élevée ($> 0,7$) dans tous les horizons. La conductivité hydraulique saturée n'est pas différente entre sols cultivés

et témoins, mais elle est inférieure au seuil de 10 cm/jour à 40 cm de profondeur indiquant une circulation de l'eau réduite.

Tableau 63 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 23 (Bouchette et Montcerf).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
Nombre d'observations	32	16	28	10	32	16
Sable (%)	8	11	8	8	5	6
Limon (%)	59	61	60	65	62	65
Argile (%)	33	28	32	27	33	29
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,02	0,86	1,10	0,98	1,35	1,28
Porosité totale (cm ³ /cm ³)	0,605	0,660	0,575	0,608	0,496	0,520
Macroporosité (cm ³ /cm ³)	0,104	0,142	0,082	0,101	0,063	0,072
Teneur en air au champ (cm ³ /cm ³)	0,093	0,113	0,078	0,083	0,063	0,064
Tortuosité des pores τ (—)	1,317	1,259	1,356	1,312	1,484	1,449
Diffusivité relative des gaz D/D0 (—)	0,002	0,004	0,001	0,001	0,000	0,001
Capacité au champ relative (—)	0,830	0,790	0,857	0,839	0,874	0,865
K _{sat} (cm/jour)			16,8	9,2	2,1	0,9
Diamètre moyen pondéré des agrégats (mm)	3,12	2,71				
Agrégats 4-8mm (%)	40,3	30,2				
Agrégats 2-4mm (%)	16,9	19,1				
Agrégats 1-2mm (%)	10,4	12,7				
Agrégats 0,5-1mm (%)	6,9	7,0				
Agrégats 0,25-0,5mm (%)	3,7	3,5				

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

K_{sat} : Conductivité hydraulique saturée mesurée à 15 cm (Ap2) et 40 cm de profondeur (B).

Les pertes de sol par érosion indiquées par le mouvement net de sol au Tableau 64 ne sont pas significativement différentes entre sols cultivés et témoins et elles ne dépassent pas le seuil d'érosion de 6 t/ha/an tolérable pour la plupart des sols au Canada.

Tableau 64 : Bilans de masse des sols du groupe 23 (Bouchette et Montcerf).

Descripteurs	Cultivé	Témoin
Profondeur (cm)	38	33
Mouvement de sol (t/ha/an)	-4,5	-3,7
C _{total} (t/ha)	115	102
C _{M3} (kg/ha)	6	6
K _{M3} (kg/ha)	279	232
P _{M3} (kg/ha)	91	75
Zn _{M3} (kg/ha)	6,8	5,6

Les valeurs en gras indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10 entre sols cultivés et témoins.

Profondeur : correspond à la profondeur de l'horizon Ap plus 15 cm dans le B.

La teneur en matière organique n'est pas statistiquement différente entre les sols cultivés et témoins (Tableau 65). Elle est très élevée dans l'Ap1 de tous les sols, élevée dans l'Ap2 des sols cultivés et très élevée dans l'Ap2 des témoins.

Tableau 65 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 23 (Bouchette et Montcerf).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
M.O. (%)	6,47	8,22	5,50	6,22	2,77	2,81
C total (%)	3,75	4,76	3,19	3,61	1,61	1,63
N organique (mg/kg)	3 049	3 784	2 531	2 597	1 294	1 151
Ratio C/N	12,3	12,9	12,5	13,6	13,3	14,1
C actif (mg/kg)	641	718	489	536	258	304
Ratio C actif/C total (mg/g)	17,4	15,6	16,0	15,3	16,9	18,7
CO₂ dégagé 14 jours (mg/kg)	681	867	471	447	208	188
N minéralisé 14 jours (mg/kg)	84,8	98,3	58,8	49,6	17,6	12,9
Ratio N minéralisé/N org. (mg/g)	28,4	26,3	24,2	18,3	13,2	10,8

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

M.O. : matière organique du sol estimée avec C total Leco et un facteur de 1,724.

N organique : N total Leco moins N minéral.

Ratio C/N : C total Leco divisé par N total Leco.

Les pH dans l'horizon Ap1 de sols cultivés est significativement plus élevé que dans les témoins (Tableau 66). Les sols demeurent toutefois faiblement acides sur toute leur profondeur. Quant aux témoins, ils sont moyennement acides dans les trois horizons.

La teneur en bases échangeables dans les sols cultivés n'est pas statistiquement différente de celle des témoins, à l'exception de celle en Ca qui est plus élevée dans les horizons Ap1 et Ap2 (Tableau 66). Les niveaux des bases échangeables demeurent toutefois faibles sur toute la profondeur des sols du groupe 23. La teneur en P dans les sols (cultivés et témoins) varie de faible dans l'horizon Ap1 à très faible dans les horizons Ap2 et B. De plus, les sols du groupe 23 ont une bonne capacité de fixation en P comme l'indique leur teneur élevée en Al (> 1100 mg/kg). La faible teneur en P associée à la bonne capacité de fixation de ces sols résulte en un indice de saturation en P nettement inférieur à la valeur critique agroenvironnementale de 11 %. Les sols cultivés ont une teneur en B plus élevée sur toute leur profondeur par rapport aux témoins. Le niveau des autres éléments mineurs varie de faible à très faible pour le Cu et le Mn et de moyen à très faible pour le Zn.

Tableau 66 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 23 (Bouchette et Montcerf).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoïn	Cultivé	Témoïn	Cultivé	Témoïn
pH	6,2	5,6	6,2	5,7	6,3	5,9
pH _{SMP}	6,3	5,8	6,3	6,0	6,4	6,2
P _{M3} (mg/kg)	23,6	22,2	18,5	19,7	18,6	18,8
Al _{M3} (mg/kg)	1 393,7	1 636,3	1 418,1	1 662,9	1 451,9	1 577,8
Fe _{M3} (mg/kg)	191,9	176,0	182,4	169,7	194,9	159,8
ISP (%)	1,9	1,6	1,5	1,4	1,4	1,3
Mn _{M3} (mg/kg)	20,7	18,7	14,4	15,7	12,3	11,4
B _{M3} (mg/kg)	0,28	0,10	0,18	0,05	0,08	0,03
Cu _{M3} (mg/kg)	1,61	1,32	1,25	1,43	0,99	0,98
Zn _{M3} (mg/kg)	2,58	2,34	1,41	1,62	1,06	1,06
K _{M3} (cmol/kg)	0,204	0,245	0,138	0,135	0,139	0,125
Na _{M3} (cmol/kg)	0,099	0,066	0,102	0,079	0,122	0,101
Ca _{M3} (cmol/kg)	8,9	5,1	7,1	4,4	5,2	3,5
Mg _{M3} (cmol/kg)	1,11	0,83	0,96	0,67	1,11	0,76
(K+Na)/(Ca+Mg)	0,033	0,063	0,032	0,054	0,041	0,058
CEC (cmol/kg)	22,0	22,8	20,7	20,5	16,9	17,1
Sat. bases (%)	49,3	28,1	42,6	27,2	41,6	29,1

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

ISP : indice de saturation en phosphore.

CEC : capacité d'échange cationique.

M3 : extrait Mehlich-3.

Niveau d'interprétation (sauf Fe, B, ISP et (K+Na)/(Ca+Mg))

Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
-------------	--------	-------	-------	------------

Synthèse de l'état de santé des sols du groupe 23 (Bouchette et Montcerf).

Problèmes de dégradation observés dans les sols cultivés

- Les sols sont légèrement plus compacts dans les horizons Ap1 et Ap2.
- L'aération et les conditions pour les échanges gazeux sont limitantes dans les trois horizons.
- Les quantités d'eau en excès favorisent des processus anaérobies dans les trois horizons.
- La circulation de l'eau est réduite à 40 cm de profondeur.
- La structure n'est pas dégradée.
- La teneur en matière organique est élevée à modérément élevée dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La respiration et la quantité d'azote minéralisable ne sont pas affectées.
- Les teneurs en B et en Ca sont plus élevées dans les trois horizons.

Groupe 25 : Séries Baby et Duhamel

Les séries Baby et Duhamel se sont développées sur un matériau limoneux-fin d'origine glacio-lacustre dans la région pédologique de la Plaine de l'Abitibi.

Tableau 67 : Caractéristiques des sols du groupe 25 (Baby et Duhamel).

Caractéristiques	Baby (BAB)	Duhamel (DUA)
Granulométrie du matériau, réaction	Limoneux-fin, alcalin	Limoneux-fin, alcalin
Type de dépôt	Glacio-lacustre	Glacio-lacustre
Classe de drainage	Mauvais à imparfait	Mauvais
Groupe hydrologique	C ou D	C ou D
Taxonomie (sous-groupe)	Gleysol orthique	Gleysol humique orthique
Superficie cartographiée (ha)	4 997	4 741

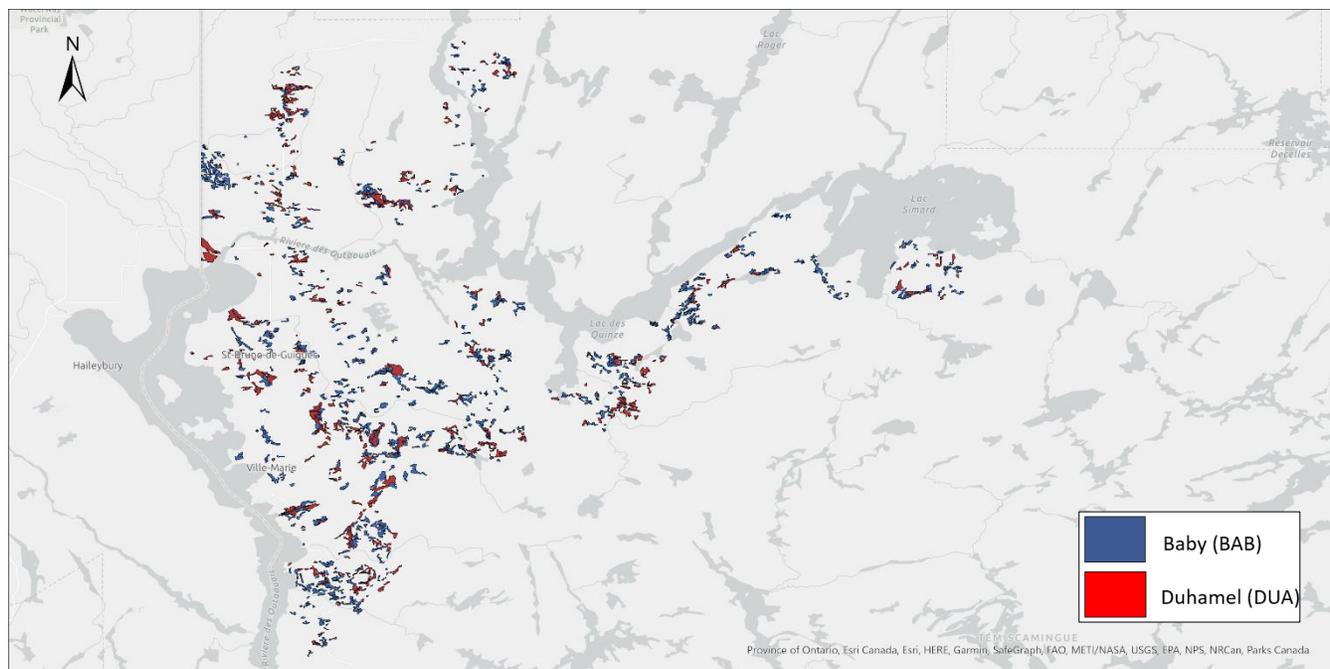


Figure 18 : Répartition géographique des sols du groupe 25 (Baby et Duhamel).

Comme pour les sols argileux de la même région, la condition physiques des sols loameux cultivés n'est pas significativement différente de celle des sols témoins. Toutefois, la masse volumique apparente des horizons cultivés est supérieure à $1,3 \text{ g/cm}^3$ révélant une tendance à la compaction des sols loameux par rapport aux sols argileux. Autant dans les horizons B des sols cultivés que des témoins, la macroporosité est inférieure au seuil critique de $0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, la diffusivité relative des gaz est inférieure à 0,005 et la capacité au champ relative est très élevée et supérieure à 0,7. La conductivité hydraulique saturée n'est pas différente entre sols cultivés et

témoins, mais elle est inférieure au seuil de 10 cm/jour à 40 cm de profondeur indiquant une circulation de l'eau réduite.

Tableau 68 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 25 (Baby et Duhamel).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoïn	Cultivé	Témoïn	Cultivé	Témoïn
Nombre d'observations	32	16	31	15	32	16
Sable (%)	14	13	13	13	13	11
Limon (%)	60	57	61	59	60	61
Argile (%)	26	30	26	28	27	28
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,32	1,22	1,34	1,28	1,62	1,67
Porosité totale (cm ³ /cm ³)	0,503	0,539	0,496	0,517	0,415	0,391
Macroporosité (cm ³ /cm ³)	0,132	0,118	0,124	0,115	0,079	0,067
Teneur en air au champ (cm ³ /cm ³)	0,189	0,154	0,186	0,144	0,138	0,090
Tortuosité des pores τ (—)	1,462	1,399	1,481	1,435	1,653	1,715
Diffusivité relative des gaz D/D0 (—)	0,006	0,003	0,005	0,003	0,002	0,001
Capacité au champ relative (—)	0,740	0,779	0,755	0,781	0,809	0,838
K _{sat} (cm/jour)			26,6	11,1	6,5	1,4
Diamètre moyen pondéré des agrégats (mm)	3,38	3,93				
Agrégats 4-8mm (%)	44,4	52,5				
Agrégats 2-4mm (%)	17,5	20,3				
Agrégats 1-2mm (%)	10,8	10,1				
Agrégats 0,5-1mm (%)	6,8	4,6				
Agrégats 0,25-0,5mm (%)	3,0	1,5				

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

K_{sat} : Conductivité hydraulique saturée mesurée à 15 cm (Ap2) et 40 cm de profondeur (B).

Les pertes de sol par érosion indiquées par le mouvement net de sol au Tableau 69 ne sont pas significativement différentes entre sols cultivés et témoins et elles ne dépassent pas le seuil d'érosion de 6 t/ha/an tolérable pour la plupart des sols au Canada.

Tableau 69 : Bilans de masse des sols du groupe 25 (Baby et Duhamel).

Descripteurs	Cultivé	Témoïn
Profondeur (cm)	39	38
Mouvement de sol (t/ha/an)	-4,4	-0,8
C _{total} (t/ha)	87	93
C _{M3} (kg/ha)	11	9
K _{M3} (kg/ha)	314	264
P _{M3} (kg/ha)	110	77
Zn _{M3} (kg/ha)	5,9	6,5

Les valeurs en gras indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10 entre sols cultivés et témoins.

Profondeur : correspond à la profondeur de l'horizon Ap plus 15 cm dans le B.

La teneur en matière organique des sols cultivés n'est pas statistiquement différente de celle des témoins (Tableau 70). Elle est modérée dans les horizons Ap1 et Ap2 des sols cultivées et élevée dans les mêmes horizons des sols témoins. La quantité de CO₂ dégagée, de N minéralisé et le ratio de N minéralisé sur N organique après une incubation de 14 jours sont significativement plus faibles dans les horizons Ap des sols cultivés indiquant un plus

faible niveau d'activité microbiologique et de capacité du sol à minéraliser de l'azote. De plus, la teneur en azote organique est plus faible dans l'horizon Ap1 de sols cultivés.

Tableau 70 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 25 (Baby et Duhamel).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
M.O. (%)	3,70	5,15	3,50	4,12	1,33	1,21
C total (%)	2,15	2,99	2,03	2,39	0,77	0,70
N organique (mg/kg)	1 665	2 555	1 588	2 062	566	625
Ratio C/N	12,7	11,7	12,7	11,6	13,3	10,5
C actif (mg/kg)	527	579	476	422	186	153
Ratio C actif/C total (mg/g)	24,7	19,9	23,4	17,8	26,6	22,0
CO ₂ dégagé 14 jours (mg/kg)	468	947	422	587	173	184
N minéralisé 14 jours (mg/kg)	45,0	113,1	43,4	86,0	9,1	13,7
Ratio N minéralisé/N org. (mg/g)	28,5	44,6	26,7	39,5	15,2	19,8

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

M.O. : matière organique du sol estimée avec C total Leco et un facteur de 1,724.

N organique : N total Leco moins N minéral.

Ratio C/N : C total Leco divisé par N total Leco.

Le pH eau des sols cultivés n'est pas différent de celui des sols témoins. Les niveaux d'acidité mesurés (cultivés et témoins) varient de moyennement acide à faiblement acide (Tableau 71).

Les teneurs en bases échangeables dans les sols du groupe 25 sont faibles pour le Ca et le Na, moyennes pour le Mg, et faibles ou très faibles pour le K. Les sols du groupe 25 sont très peu saturés en P avec un indice de saturation nettement en-dessous de la valeur critique agroenvironnementale de 11% et des niveaux de P variant de faibles à très faibles (Tableau 71). Les sols cultivés ont une teneur en B plus élevée sur toute leur profondeur par rapport aux témoins. Le niveau des autres éléments mineurs est moyen pour le Cu, faible ou très faible pour le Zn et très faible pour le Mn.

Tableau 71 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 25 (Baby et Duhamel).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoïn	Cultivé	Témoïn	Cultivé	Témoïn
pH	6,1	5,6	6,0	5,6	6,4	6,1
pH _{SMP}	6,6	6,1	6,6	6,2	6,9	6,7
P _{M3} (mg/kg)	28,0	20,9	24,8	17,4	9,6	9,3
Al _{M3} (mg/kg)	952,5	1 098,8	968,7	1 128,4	872,0	984,6
Fe _{M3} (mg/kg)	246,5	275,2	250,4	276,9	217,7	255,6
ISP (%)	3,2	2,0	2,7	1,7	1,3	1,1
Mn _{M3} (mg/kg)	21,1	29,7	19,6	25,5	19,7	22,3
B _{M3} (mg/kg)	0,29	0,14	0,26	0,10	0,10	0,03
Cu _{M3} (mg/kg)	1,95	1,74	1,99	1,75	1,78	1,49
Zn _{M3} (mg/kg)	1,23	1,62	1,24	1,40	0,78	0,85
K _{M3} (cmol/kg)	0,154	0,161	0,144	0,120	0,123	0,101
Na _{M3} (cmol/kg)	0,071	0,088	0,071	0,092	0,089	0,112
Ca _{M3} (cmol/kg)	8,9	7,2	8,2	6,7	7,2	5,7
Mg _{M3} (cmol/kg)	1,90	1,88	2,03	1,75	2,64	2,32
(K+Na)/(Ca+Mg)	0,022	0,028	0,021	0,026	0,022	0,027
CEC (cmol/kg)	19,2	21,8	19,0	20,9	15,4	15,8
Sat. bases (%)	57,9	43,2	55,6	41,6	65,0	51,9

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

ISP : indice de saturation en phosphore.

CEC : capacité d'échange cationique.

M3 : extrait Mehlich-3.

Niveau d'interprétation (sauf Fe, B, ISP et (K+Na)/(Ca+Mg))

Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
-------------	--------	-------	-------	------------

Synthèse de l'état de santé des sols du groupe 25 (Baby et Duhamel).

Problèmes de dégradation observés dans les sols cultivés

- Les sols cultivés ne sont pas plus compacts que les sols témoins.
- L'aération et les conditions pour les échanges gazeux sont limitantes dans l'horizon B.
- Les quantités d'eau en excès favorisent des processus anaérobies dans l'horizon B.
- La circulation de l'eau est réduite à 40 cm de profondeur.
- La structure n'est pas dégradée.
- La teneur en matière organique est modérée, mais la teneur en C est proche du seuil critique de 2 % dans l'horizon Ap2.
- La respiration et la quantité d'azote minéralisable sont plus faibles dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La teneur en B est plus élevée dans les trois horizons.

Sols sableux à squelettiques

Les sols sableux sont considérés comme étant les moins fertiles. On pense souvent à tort que le drainage naturel est très rapide, mais il est en réalité très variable allant de mauvais à très rapide. La position topographique et la granulométrie du matériau parental influencent les conditions hydrologiques du sol. Pour la sélection des séries de certains groupes, la finesse des sables a été considérée, le sable très fin étant 40 fois plus petit que le sable grossier. La majorité des groupes sont situés dans les provinces pédologiques : Les basses-terres du Saint-Laurent (A) et Les Appalaches (B) (Figure 19).

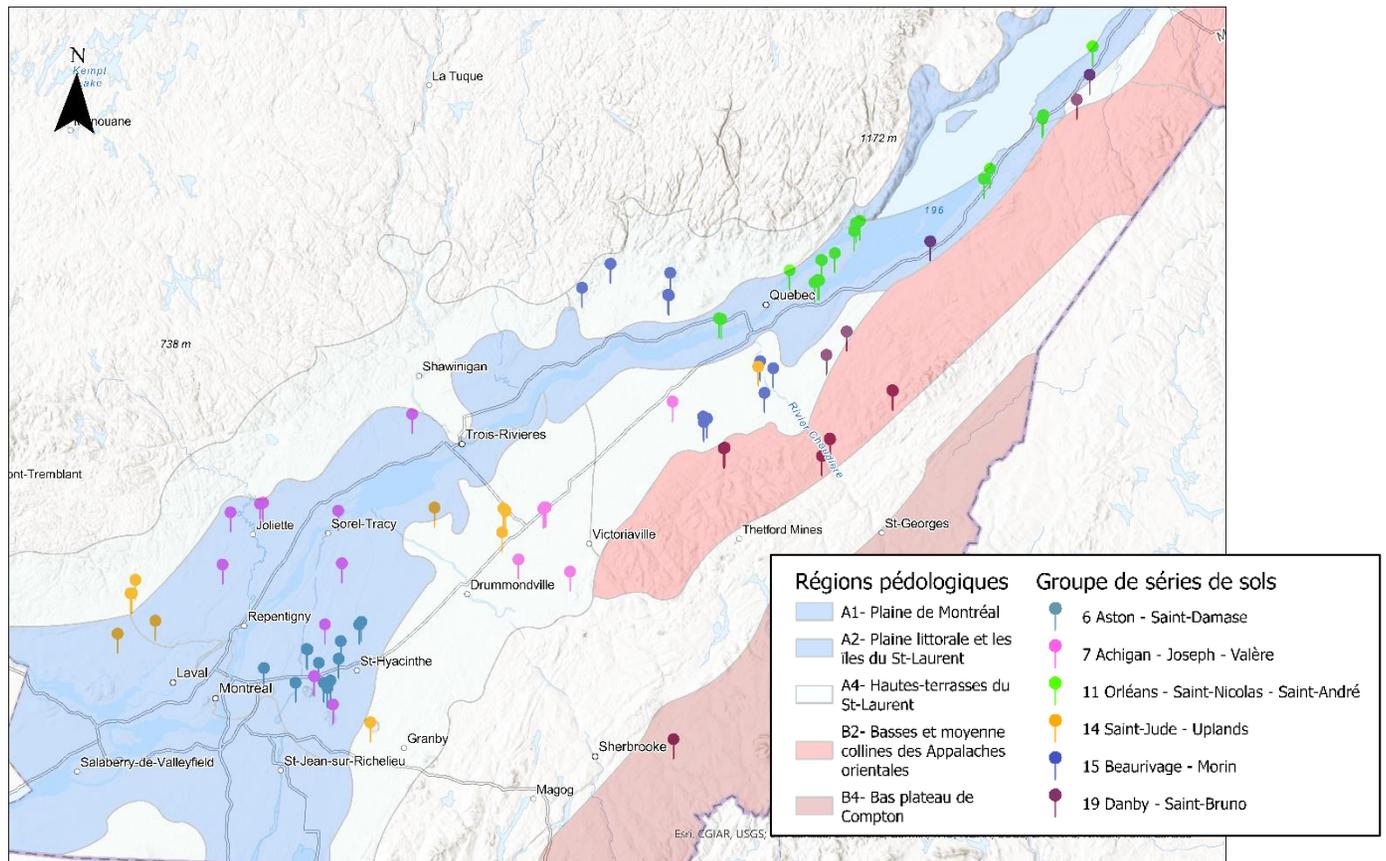


Figure 19 : Situation géographique des sites échantillonnés dans les sols issus de matériaux sableux à squelettiques et leurs régions pédologiques.

Les sols sableux à squelettiques sont représentés par 14 séries de sols. Elles ont été regroupées en six groupes de séries de sols, en fonction principalement de la granulométrie du matériau parental et de la région pédologique dominante (Tableau 72). Le groupe 6 est défini par un dépôt de matériau sableux sur un matériau argileux (à moins de 75 cm). Les groupes 7, 14 et 15 sont des sols sableux profonds (de plus de 75 cm) qui se différencient essentiellement par la grosseur des sables, soit en sables fins, moyens et grossiers. Enfin, les groupes 11 et 19 sont formés de séries de sols dont le matériau est qualifié de « squelettique », signifiant un contenu en fragments grossiers (particules > 2 mm) de 35 % et plus en volume. Ces deux derniers groupes se différencient par leur situation dans des régions pédologiques différentes.

Tableau 72 : Caractéristiques définissant les groupes de séries de sols sableux à squelettiques.

Groupe	Série de sols	Granulométrie du matériau parental	Région pédologique dominante
6	Aston*	Sableux à loameux-grossier sur argileux	Plaine de Montréal
	Saint-Damase	Sableux à loameux-grossier sur argileux	Plaine de Montréal
7	Achigan*	Sableux (fin) à loameux-grossier	Plaine de Montréal
	Joseph*	Sableux (fin) à loameux-grossier	Plaine de Montréal
	Valère*	Sableux (fin) à loameux-grossier	Hautes-terrasses du Saint-Laurent (Appalaches)
11	Saint-Nicolas*	Squelettique-loameux à squelettique-sableux	Plaine littorale et les îles du Saint-Laurent
	Saint-André*	Squelettique-loameux à squelettique-sableux	Plaine littorale et les îles du Saint-Laurent
	Orléans*	Squelettique-loameux	Hautes-terrasses du Saint-Laurent (Appalaches)
14	Saint-Jude*	Sableux à loameux-grossier	Plaine de Montréal
	Uplands*	Sableux	Plaine de Montréal
15	Beurivage*	Sableux (grossier) à loameux-grossier	Hautes-terrasses du Saint-Laurent (Appalaches)
	Morin*	Sableux (grossier)	Hautes-terrasses du Saint-Laurent (Laurentides)
19	Saint-Bruno	Squelettique-loameux à squelettique-sableux	Basses et moyennes collines des Appalaches
	Danby*	Squelettique-loameux à squelettique-sableux	Bas-plateau de Compton

*Série de sols évaluée dans le cadre de l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec (Tabi et al., 1990).

Groupe 6 : Séries Aston et Saint-Damase

Les séries Aston et Saint-Damase se sont développées sur un matériau mince, sableux à loameux grossier d'origine fluviatile, sur un matériau argileux leur conférant un mauvais drainage naturel. Elles sont situées dans la région pédologique de la Plaine de Montréal.

Tableau 73 : Caractéristiques des sols du groupe 6 (Aston et Saint-Damase).

Caractéristiques	Aston (AST)	Saint-Damase (SDM)
Granulométrie du matériau 1, réaction / Granulométrie du matériau 2, réaction	Sableux à loameux grossier, neutre / Argileux, neutre	Sableux à loameux grossier, neutre / Argileux, neutre
Type de dépôt 1 / Type de dépôt 2	Fluviatile / Marin	Fluviatile / Marin
Classe de drainage	Mauvais	Imparfait
Groupe hydrologique	C	C
Taxonomie (sous-groupe)	Gleysol humique orthique	Gleysol humique orthique
Superficie cartographiée (ha)	29 961	19 768

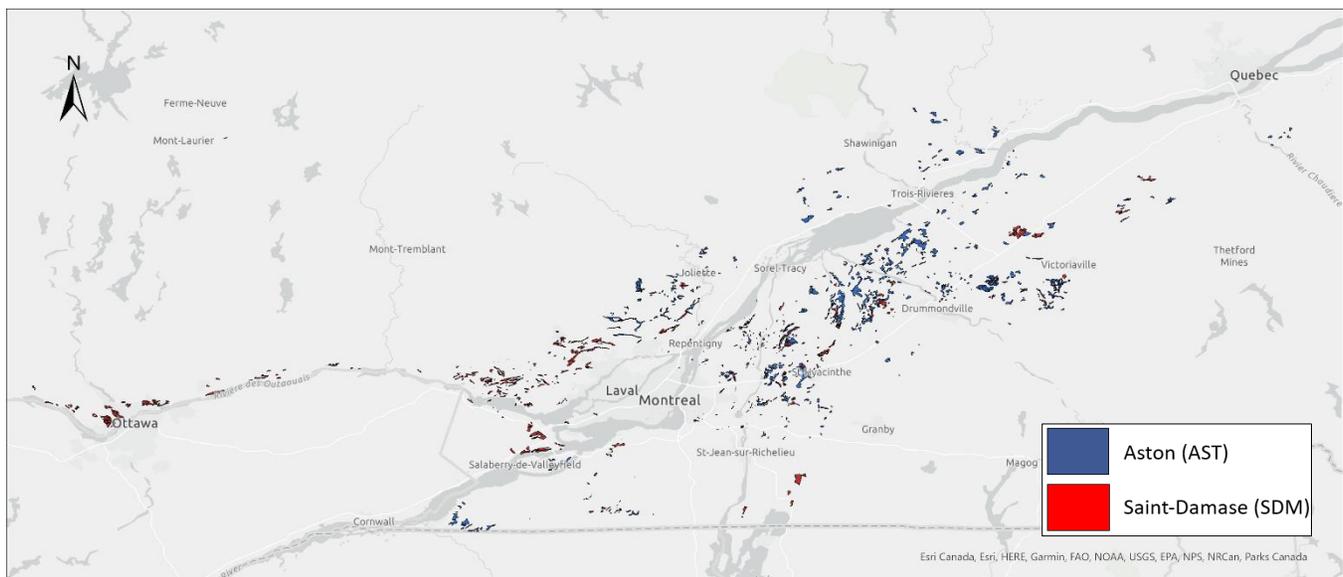


Figure 20 : Répartition géographique des sols du groupe 6 (Aston et Saint-Damase).

Les sols cultivés sont plus compacts que les témoins tant en surface qu'en profondeur comme l'indique leur masse volumique apparente plus élevée ainsi que leur porosité totale plus faible dans les trois horizons (Tableau 74). De plus, la macroporosité et la teneur en air au champ dans l'horizon Ap2 des sols cultivés sont significativement plus faibles que celles des témoins indiquant un manque d'aération. La tortuosité des pores significativement plus élevée dans les trois horizons des sols cultivés indique aussi une dégradation des conditions d'échanges des gaz, mais la diffusivité relative des gaz relativement élevée et supérieure à 0,005 dans les trois mêmes horizons indiquent des conditions d'échanges des gaz au contraire plutôt acceptable. La plus faible capacité au champ relative dans l'Ap1 des sols cultivés, inférieure à 0,6 indique une moins bonne capacité de rétention en eau dans

cet horizon. La conductivité hydraulique mesurée à 15 cm et à 40 cm de profondeur n'est pas significativement différente entre sols cultivés et témoins, cependant ces signes de dégradation des sols cultivés par rapport aux témoins ne semblent pas avoir d'impact sur la capacité de circulation de l'eau. La proportion d'agrégats inférieurs à 4 mm est inférieure dans les sols cultivés. La faible proportion des agrégats supérieurs à 1 mm associée à un plus faible diamètre moyen pondéré des agrégats dans les sols cultivés indiquent une dégradation de l'état structural de ces sols.

Tableau 74 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 6 (Aston et Saint-Damase).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
Nombre d'observations	32	12	31	10	32	12
Sable (%)	73	72	73	75	84	82
Limon (%)	11	12	12	10	5	7
Argile (%)	16	16	15	15	11	11
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,41	1,14	1,61	1,30	1,72	1,55
Porosité totale (cm ³ /cm ³)	0,471	0,556	0,381	0,515	0,338	0,388
Macroporosité (cm ³ /cm ³)	0,236	0,223	0,135	0,192	0,156	0,189
Teneur en air au champ (cm ³ /cm ³)	0,271	0,297	0,137	0,226	0,142	0,190
Tortuosité des pores τ (—)	1,523	1,385	1,757	1,448	1,912	1,732
Diffusivité relative des gaz D/D0 (—)	0,043	0,023	0,011	0,017	0,022	0,030
Capacité au champ relative (—)	0,491	0,601	0,644	0,621	0,540	0,486
K _{sat} (cm/jour)			87,5	61,9	130,4	167,4
Diamètre moyen pondéré des agrégats (mm)	1,33	2,76				
Agrégats 4-8mm (%)	13,8	32,7				
Agrégats 2-4mm (%)	10,5	16,6				
Agrégats 1-2mm (%)	5,5	12,2				
Agrégats 0,5-1mm (%)	6,7	9,0				
Agrégats 0,25-0,5mm (%)	6,9	4,9				

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

K_{sat} : Conductivité hydraulique saturée mesurée à 15 cm (Ap2) et 40 cm de profondeur (B).

Les pertes de sol par érosion indiquées par le mouvement net de sol au Tableau 75 ne sont pas significativement différentes entre sols cultivés et témoins, et elles ne dépassent pas le seuil d'érosion de 6 t/ha/an tolérable pour la plupart des sols au Canada.

Tableau 75 : Bilans de masse des sols du groupe 6 (Aston et Saint-Damase).

Descripteurs	Cultivé	Témoin
Profondeur (cm)	41	36
Mouvement de sol (t/ha/an)	-3,6	-5,5
C _{total} (t/ha)	50	61
C _{UM3} (kg/ha)	9	5
K _{M3} (kg/ha)	503	336
P _{M3} (kg/ha)	628	276
Zn _{M3} (kg/ha)	14,9	16,4

Les valeurs en gras indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10 entre sols cultivés et témoins.

Profondeur : correspond à la profondeur de l'horizon Ap plus 15 cm dans le B.

La teneur en matière organique est significativement plus faible dans les horizons Ap1 et Ap2 des sols cultivés par rapport aux témoins (Tableau 76). Le niveau de matière organique dans les sols témoins est élevé dans l'horizon Ap1 et moyen dans l'Ap2. Dans les sols cultivés, il est faible dans l'Ap1, et très faible dans l'Ap2. Le stock de C est ainsi plus faible dans les sols cultivés par rapport aux témoins (Tableau 75). La teneur en azote organique est plus faible dans les horizons Ap1 et Ap2 des sols cultivés. La teneur en carbone actif est plus faible dans l'horizon Ap1 des sols cultivés. Le ratio C actif/C total est plus élevé dans les trois horizons des sols cultivés en raison principalement d'une quantité plus faible de C total dans les sols cultivés. La quantité de CO₂ dégagée après une incubation de 14 jours est plus faible dans les trois horizons des sols cultivés par rapport aux témoins indiquant un niveau d'activité microbiologique plus faible. L'azote potentiellement minéralisable (N minéralisé 14 jours) est aussi significativement plus faible les horizons Ap1 et Ap2 des sols cultivés.

Tableau 76 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 6 (Aston et Saint-Damase).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
M.O. (%)	1,95	4,08	1,75	3,00	0,41	0,56
C total (%)	1,13	2,36	1,02	1,74	0,24	0,33
N organique (mg/kg)	740	1 739	696	1 193	202	255
Ratio C/N	15,2	13,4	14,5	14,5	11,9	12,8
C actif (mg/kg)	311	499	278	311	48	76
Ratio C actif/C total (mg/g)	27,9	21,8	27,5	18,5	17,5	22,7
CO ₂ dégagé 14 jours (mg/kg)	206	608	161	327	54	100
N minéralisé 14 jours (mg/kg)	16,7	66,0	14,2	30,8	1,9	2,5
Ratio N minéralisé/N org. (mg/g)	24,5	38,9	21,0	26,1	11,3	11,3

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

M.O. : matière organique du sol estimée avec C total Leco et un facteur de 1,724.

N organique : N total Leco moins N minéral.

Ratio C/N : C total Leco divisé par N total Leco.

Le pH des sols cultivés est significativement plus élevé que celui des témoins dans les trois horizons (Tableau 77). Leur pH est près de l'optimum de 6,5 dans les trois horizons. Quant aux témoins, ils sont moyennement acides dans les trois horizons.

La saturation en bases échangeables est significativement plus élevée dans les sols cultivés par rapport aux témoins dans les trois horizons. Toutefois, le niveau des bases échangeables varie de très faible à moyen (Tableau 77). Les sols cultivés ont un niveau élevé de P dans les horizons Ap1 et Ap2 se traduisant par des quantités dans le profil qui sont plus de deux fois supérieures par rapport aux témoins (Tableau 75). Ils ont aussi une plus faible teneur en Al dans les trois horizons par rapport aux témoins indiquant une plus faible capacité de fixation en P (Tableau 77). L'enrichissement des sols cultivés en P associé à leur faible capacité de fixation a entraîné leur saturation en P dans les horizons Ap1 et Ap2 à un niveau plus élevé que la valeur critique agroenvironnementale de 15 % au-delà de laquelle les recommandations en P ne devraient pas dépasser les exportations par les cultures.

Il y a un enrichissement des sols cultivés en Cu sur toute la profondeur du profil (Tableau 75). Toutefois, la teneur en Cu de ces sols varie de modérée (horizon Ap1) à très faible (horizon B) (Tableau 77). Le niveau des autres éléments mineurs est très faible pour le Mn, faible (horizon B), moyen (Ap2) ou élevé (Ap1) pour le Zn.

Tableau 77 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 6 (Aston et Saint-Damase).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
pH	6,5	5,6	6,4	5,7	6,7	6,0
pH _{SMP}	7,0	6,2	7,0	6,3	7,3	6,9
P _{M3} (mg/kg)	122,7	79,1	106,0	55,3	19,9	24,5
Al _{M3} (mg/kg)	730,3	1 209,4	759,4	1 277,4	589,6	987,1
Fe _{M3} (mg/kg)	226,8	247,1	229,7	221,5	134,9	149,8
ISP (%)	18,9	7,4	16,2	5,2	4,1	2,8
Mn _{M3} (mg/kg)	20,2	18,9	15,5	12,6	8,6	9,1
B _{M3} (mg/kg)	0,29	0,28	0,25	0,19	0,10	0,05
Cu _{M3} (mg/kg)	2,04	1,48	1,79	1,11	0,56	0,36
Zn _{M3} (mg/kg)	3,50	4,35	2,72	2,10	0,71	0,52
K _{M3} (cmol/kg)	0,289	0,308	0,204	0,153	0,122	0,068
Na _{M3} (cmol/kg)	0,034	0,019	0,033	0,020	0,027	0,019
Ca _{M3} (cmol/kg)	5,8	4,7	5,0	3,2	3,1	1,3
Mg _{M3} (cmol/kg)	0,83	0,98	0,72	0,65	0,68	0,37
(K+Na)/(Ca+Mg)	0,055	0,067	0,043	0,046	0,040	0,063
CEC (cmol/kg)	11,3	16,7	10,7	14,7	6,0	8,3
Sat. bases (%)	63,8	34,1	56,8	27,5	66,0	25,6

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

ISP : indice de saturation en phosphore.

CEC : capacité d'échange cationique.

M3 : extrait Mehlich-3.

Niveau d'interprétation (sauf Fe, B, ISP et (K+Na)/(Ca+Mg))

Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
-------------	--------	-------	-------	------------

Synthèse de l'état de santé des sols du groupe 6 (Aston et Saint-Damase).

Problèmes de dégradation observés dans les sols cultivés

- Les sols sont plus compacts dans les trois horizons.
- L'aération et les conditions pour les échanges gazeux ne sont pas limitantes.
- La capacité de rétention en eau est limitée en surface dans l'horizon Ap1.
- La structure est dégradée dans l'horizon Ap1.
- La teneur en matière organique est faible et la teneur en C est nettement sous le seuil critique de 2 % dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La respiration et la quantité d'azote minéralisable sont plus faibles dans les trois horizons.
- L'indice de saturation en P est plus élevé dans les horizons Ap1 et Ap2 et l'ISP dépasse le seuil de 15 %.
- Les teneurs en K, Ca et Mg sont plus élevées dans l'horizon B.
- Les bilans de masse de P et de Cu sont plus élevés dans le profil.

Groupe 7 : Séries Achigan, Joseph et Valère

Les séries Achigan, Joseph et Valère sont d'origine fluviatile et développées sur un matériau sableux fin plus profond comparativement aux séries du groupe 6 dont le dépôt sableux est mince. Elles sont situées dans les régions pédologiques de la Plaine de Montréal et des Hautes-Terrasses du Saint-Laurent.

Tableau 78 : Caractéristiques des sols du groupe 7 (Achigan, Joseph et Valère).

Caractéristiques	Achigan (AHG)	Joseph (JSH)	Valère (VAR)
Granulométrie du matériau, réaction	Sableux (fin) à loameux-grossier, acide	Sableux (fin), neutre	Sableux (fin) à loameux-grossier, acide
Type de dépôt	Fluviatile	Fluviatile	Fluviatile
Classe de drainage	Imparfait	Mauvais	Imparfait à modérément bon
Groupe hydrologique	C	C	C
Taxonomie (sous-groupe)	Podzol humique orthique	Gleysol humique orthique	Podzol humo-ferrique gleyifié
Superficie cartographiée (ha)	56 019	12 878	3 619

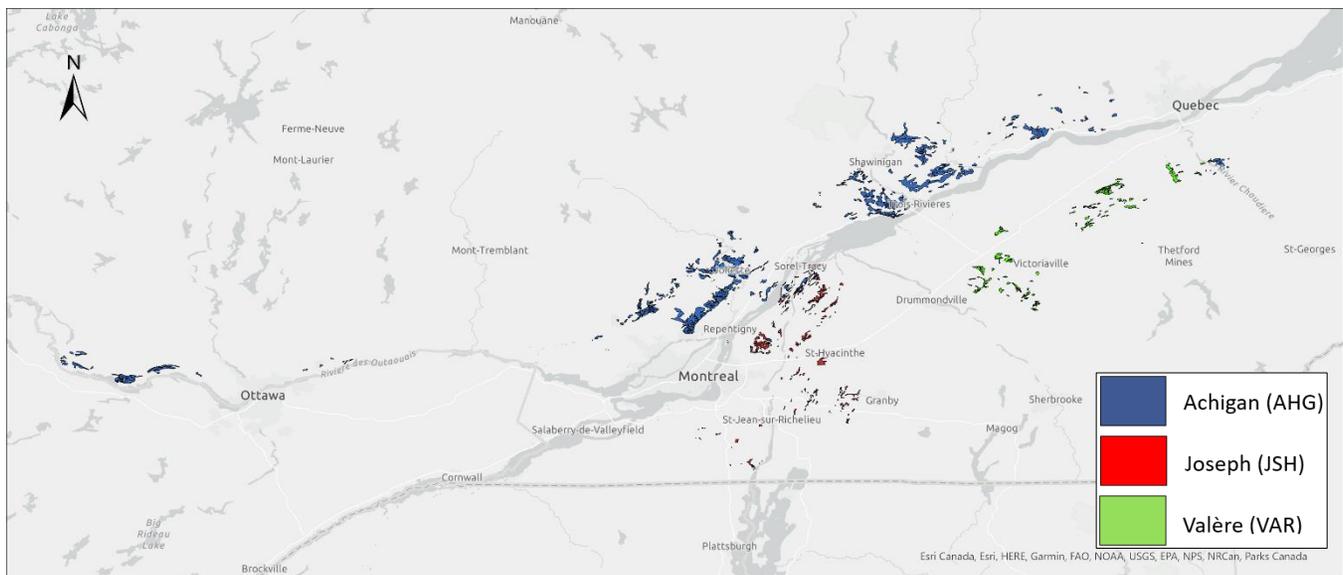


Figure 21 : Répartition géographique des sols du groupe 7 (Achigan, Joseph et Valère).

Les sols cultivés sont plus compacts en surface comme l'indique leur masse volumique apparente plus élevée ainsi que leur faible porosité totale par rapport à celles des témoins dans les horizons Ap1 et Ap2 (Tableau 79). Toutefois, la macroporosité et la diffusivité relative des gaz sont plus élevées dans l'horizon Ap1 des sols cultivés par rapport aux sols témoins. La tortuosité est plus élevée à l'inverse dans l'horizon Ap2 des sols cultivés, en lien avec la baisse de porosité totale. La conductivité hydraulique saturée n'est pas différente entre sols cultivés et témoins et la circulation de l'eau dans les sols cultivés ne semble pas affectée par leur dégradation physique en

surface. La capacité au champ relative est plus faible dans l'horizon Ap1 des sols cultivés, mais elle demeure à l'intérieur du seuil idéale de 0,6-0,7. La plus faible proportion d'agrégats de toute dimension associée à un plus petit diamètre moyen pondéré des agrégats dans les sols cultivés indiquent une dégradation de l'état structural de ces sols.

Tableau 79 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 7 (Achigan, Joseph et Valère).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
Nombre d'observations	48	19	47	17	48	19
Sable (%)	77	74	77	75	79	78
Limon (%)	15	16	14	17	14	16
Argile (%)	8	10	9	8	7	6
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,21	1,16	1,39	1,28	1,48	1,48
Porosité totale (cm ³ /cm ³)	0,522	0,557	0,453	0,496	0,426	0,425
Macroporosité (cm ³ /cm ³)	0,200	0,156	0,127	0,143	0,156	0,140
Teneur en air au champ (cm ³ /cm ³)	0,226	0,209	0,134	0,170	0,116	0,137
Tortuosité des pores τ (—)	1,428	1,382	1,566	1,473	1,635	1,631
Diffusivité relative des gaz D/D0 (—)	0,019	0,010	0,006	0,007	0,014	0,011
Capacité au champ relative (—)	0,609	0,725	0,718	0,712	0,609	0,666
K _{sat} (cm/jour)			44,3	37,8	92,4	95,0
Diamètre moyen pondéré des agrégats (mm)	1,51	2,30				
Agrégats 4-8mm (%)	16,3	24,6				
Agrégats 2-4mm (%)	10,9	17,5				
Agrégats 1-2mm (%)	5,7	13,6				
Agrégats 0,5-1mm (%)	4,2	7,9				
Agrégats 0,25-0,5mm (%)	3,5	4,9				

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

K_{sat} : Conductivité hydraulique saturée mesurée à 15 cm (Ap2) et 40 cm de profondeur (B).

Les pertes de sol par érosion indiquées par le mouvement net de sol au Tableau 80 sont significativement plus élevées dans les sols cultivés et elles dépassent le seuil d'érosion de 6 t/ha/an tolérable pour la plupart des sols au Canada.

Tableau 80 : Bilans de masse des sols du groupe 7 (Achigan, Joseph et Valère).

Descripteurs	Cultivé	Témoin
Profondeur (cm)	44	39
Mouvement de sol (t/ha/an)	-7,8	-1,3
C _{total} (t/ha)	85	76
C _{UM3} (kg/ha)	9	5
K _{M3} (kg/ha)	329	215
P _{M3} (kg/ha)	488	170
Zn _{M3} (kg/ha)	26,2	11,5

Les valeurs en gras indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$ entre sols cultivés et témoins.

Profondeur : correspond à la profondeur de l'horizon Ap plus 15 cm dans le B.

Les sols cultivés sont significativement plus pauvres en matière organique dans leur horizon Ap1 par rapport aux témoins (Tableau 81). Le niveau de matière organique est moyen dans l'horizon Ap1 et faible dans l'Ap2. Dans les témoins, il est élevé dans l'Ap1 et moyen dans l'Ap2. La teneur en azote organique est aussi plus faible dans l'horizon Ap1 des sols cultivés et ces derniers présentent des ratios C/N significativement plus élevés dans les horizons Ap1 et B. Les quantités de CO₂ dégagées et le ratio de N minéralisé sur N organique après une incubation de 14 jours sont significativement plus faibles dans l'horizon Ap1 des sols cultivés indiquant des sources de C et de N moins disponibles et un niveau d'activité microbiologique plus faible que dans les sols témoins.

Tableau 81 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 7 (Achigan, Joseph et Valère).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
M.O. (%)	3,08	4,14	2,93	3,11	1,26	1,14
C total (%)	1,78	2,40	1,70	1,81	0,73	0,66
N organique (mg/kg)	1 183	1 820	1 074	1 327	416	456
Ratio C/N	15,1	13,3	15,6	13,9	15,8	13,8
C actif (mg/kg)	466	534	396	335	136	140
Ratio C actif/C total (mg/g)	26,3	22,7	24,4	18,9	19,3	19,8
CO ₂ dégagé 14 jours (mg/kg)	320	527	246	303	110	124
N minéralisé 14 jours (mg/kg)	27,5	57,7	18,7	29,8	4,8	6,4
Ratio N minéralisé/N org. (mg/g)	24,9	33,8	19,3	25,1	12,7	13,8

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

M.O. : matière organique du sol estimée avec C total Leco et un facteur de 1,724.

N organique : N total Leco moins N minéral.

Ratio C/N : C total Leco divisé par N total Leco.

L'acidité active (pH) des sols cultivés n'est pas différente de celle des sols témoins. Les niveaux de pH mesuré (cultivés et témoins) varient de moyennement à faiblement acides (Tableau 82). La teneur en bases échangeables varie de faible à très faible en fonction de l'horizon et n'est pas significativement différente entre les sols cultivés et les témoins, à l'exception de la teneur en Mg qui est plus élevée dans l'horizon B des sols cultivés.

Les sols cultivés sont plus riches en P que les témoins avec un niveau élevé dans l'Ap1 et modéré dans l'Ap2 (Tableau 80 et Tableau 82). En dépit de cet enrichissement des sols cultivés en P, leur indice de saturation demeure en-dessous de la valeur critique agroenvironnementale de 15 % en raison de la bonne capacité de fixation en P des sols du groupe 7 ($Al \geq 1100$ mg/kg ; Tableau 82). La teneur en éléments mineurs des sols cultivés n'est pas significativement différente de celle des témoins avec des niveaux variant de faibles à très faibles pour le Cu et le Mn et de très faibles (horizon B) à élevés pour le Zn selon l'horizon.

Tableau 82 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 7 (Achigan, Joseph et Valère).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoïn	Cultivé	Témoïn	Cultivé	Témoïn
pH	5,9	5,6	5,9	5,7	6,1	6,0
pH _{SMP}	6,6	6,3	6,6	6,4	6,8	6,7
P _{M3} (mg/kg)	95,7	45,1	81,9	32,9	20,7	19
Al _{M3} (mg/kg)	1 191,0	1 288,5	1 249,0	1 308,8	1 224,3	1 304,1
Fe _{M3} (mg/kg)	252,6	220,4	256,3	192,8	181,3	128,3
ISP (%)	12,7	5,3	10,7	4,0	3,5	1,9
Mn _{M3} (mg/kg)	9,5	14,6	8,8	13,3	6,3	6,9
B _{M3} (mg/kg)	0,26	0,21	0,21	0,14	0,07	0,05
Cu _{M3} (mg/kg)	1,79	1,20	1,38	1,18	0,53	0,36
Zn _{M3} (mg/kg)	3,21	2,60	2,28	2,05	0,80	0,49
K _{M3} (cmol/kg)	0,200	0,182	0,138	0,093	0,062	0,043
Na _{M3} (cmol/kg)	0,023	0,024	0,024	0,021	0,023	0,018
Ca _{M3} (cmol/kg)	4,7	3,6	4,1	2,6	2,7	1,6
Mg _{M3} (cmol/kg)	0,52	0,73	0,44	0,39	0,40	0,20
(K+Na)/(Ca+Mg)	0,050	0,052	0,043	0,046	0,032	0,042
CEC (cmol/kg)	13,3	15,7	12,5	13,9	10,2	9,3
Sat. bases (%)	42,0	29,3	38,4	25,5	41,8	23,9

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

ISP : indice de saturation en phosphore.

CEC : capacité d'échange cationique.

M3 : extrait Mehlich-3.

Niveau d'interprétation (sauf Fe, B, ISP et (K+Na)/(Ca+Mg))

Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
-------------	--------	-------	-------	------------

Synthèse de l'état de santé des sols du groupe 7 (Achigan, Joseph et Valère).

Problèmes de dégradation observés dans les sols cultivés

- Les sols sont plus compacts en surface dans les horizons Ap1 et Ap2.
- L'aération et les conditions pour les échanges gazeux ne sont pas limitantes.
- La capacité de rétention en eau n'est pas limitée.
- La structure est dégradée dans l'horizon Ap1.
- L'érosion des sols dépassent légèrement le seuil de 6 t/ha/an.
- La teneur en matière organique est moyenne et la teneur en C est sous le seuil de 2 % dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La respiration et la quantité d'azote minéralisable sont plus faibles dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La teneur en P et l'indice de saturation en P sont plus élevées dans les horizons Ap1 et Ap2, mais l'ISP ne dépasse pas le seuil de 15 %.
- Les bilans de masse de P, Cu et Zn sont plus élevés dans le profil.

Groupe 11 : Séries Saint-Nicolas, Saint-André et Orléans

Les séries Saint-Nicolas, Saint-André et Orléans se sont développées sur un matériau squelettique-loameux à squelettique-sableux. La grande quantité de fragments contenus dans les sols de ces séries augmente leur perméabilité et leur confère un meilleur drainage naturel. Ces séries sont situées dans les Hautes-terrasses du Saint-Laurent (Appalaches) et la Plaine littorale et les îles du Saint-Laurent.

Tableau 83 : Caractéristiques des sols du groupe 11 (Saint-Nicolas, Saint-André et Orléans).

Caractéristiques	Saint-Nicolas (SCS)	Saint-André (SDR)	Orléans (ORS)
Granulométrie 1, réaction / Granulométrie 2, réaction	Squelettique-loameux, acide / Squelettique sableux, acide	Squelettique-loameux à squelettique sableux, acide	Squelettique- loameux, acide
Type de dépôt 1 / Type de dépôt 2	Marin / Résiduel	Marin	Fluviale
Classe de drainage	Bon	Rapide	Bon
Groupe hydrologique	B	A	A
Taxonomie (sous-groupe)	Podzol humo-ferrique orthique	Podzol humo-ferrique gleyifié	Brunisol dystrique éluvié
Superficie cartographiée (ha)	20 468	50 739	11 511

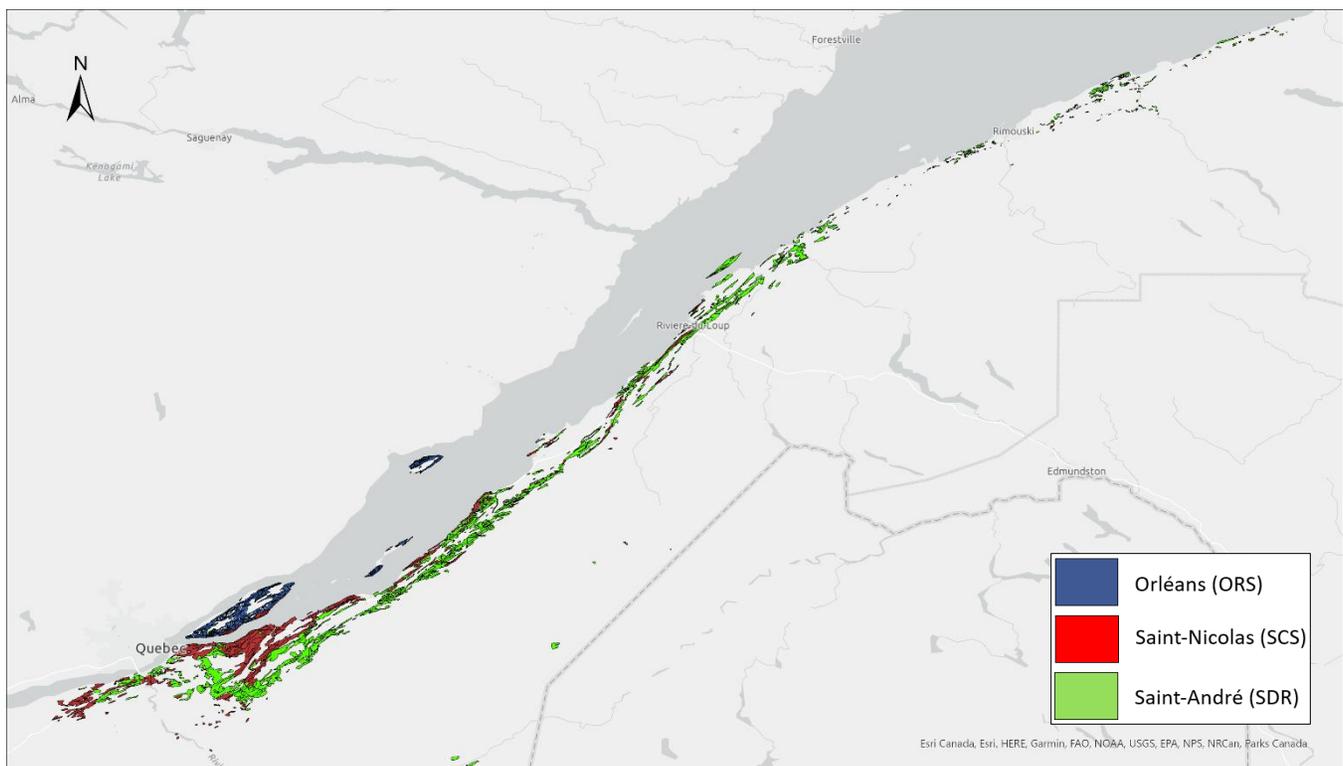


Figure 22 : Répartition géographique des sols du groupe 11 (Saint-Nicolas, Saint-André et Orléans).

L'augmentation de la masse volumique apparente, associée à une diminution de la porosité totale dans les horizons Ap1 et Ap2 des sols cultivés par rapport aux témoins révèle de la compaction superficielle de ces sols. La

tortuosité des pores est également affectée à la hausse. Cependant, ce phénomène de dégradation superficielle ne semble pas avoir d'impact sur la macroporosité, la diffusivité relative des gaz et la conductivité hydraulique saturée qui demeurent élevées et supérieures aux différents seuils prescrits autant dans les sols cultivés et témoins. La capacité au champ relative est toutefois légèrement inférieure à l'intervalle idéale de 0,6 à 0,7, signifiant une capacité de rétention en eau réduite. La proportion des agrégats dont le diamètre est compris entre 1 et 2 mm est plus faible dans les sols cultivés. La conductivité hydraulique saturée n'est pas différente entre sols cultivés et témoins; elle est élevée indiquant une circulation de l'eau adéquate. À l'inverse, la proportion d'agrégats de diamètre compris entre 0,25 et 0,5 mm est plus élevée dans les sols cultivés.

Tableau 84 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 11 (Saint-Nicolas, Saint-André et Orléans).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
Nombre d'observations	48	24	44	20	48	24
Sable (%)	51	46	52	48	55	54
Limon (%)	23	27	24	26	23	24
Argile (%)	26	27	24	26	22	22
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,31	1,09	1,40	1,30	1,48	1,42
Porosité totale (cm ³ /cm ³)	0,510	0,590	0,481	0,521	0,455	0,465
Macroporosité (cm ³ /cm ³)	0,247	0,253	0,205	0,224	0,223	0,224
Teneur en air au champ (cm ³ /cm ³)	0,299	0,334	0,247	0,282	0,241	0,243
Tortuosité des pores τ (—)	1,449	1,335	1,508	1,434	1,554	1,535
Diffusivité relative des gaz D/D0 (—)	0,042	0,034	0,025	0,026	0,038	0,041
Capacité au champ relative (—)	0,511	0,566	0,574	0,572	0,511	0,512
K _{sat} (cm/jour)			254,7	147,7	491,5	478,8
Diamètre moyen pondéré des agrégats (mm)	2,08	2,53				
Agrégats 4-8mm (%)	21,1	25,8				
Agrégats 2-4mm (%)	16,3	19,9				
Agrégats 1-2mm (%)	13,9	18,4				
Agrégats 0,5-1mm (%)	13,9	13,1				
Agrégats 0,25-0,5mm (%)	9,0	7,0				

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

K_{sat} : Conductivité hydraulique saturée mesurée à 15 cm (Ap2) et 40 cm de profondeur (B).

Les pertes de sol par érosion indiquées par le mouvement net de sol au Tableau 85 ne sont pas significativement différentes entre sols cultivés et témoins, mais elles dépassent dans les deux cas le seuil d'érosion de 6 t/ha/an tolérable pour la plupart des sols au Canada.

Tableau 85 : Bilans de masse des sols du groupe 11 (Saint-Nicolas, Saint-André et Orléans).

Descripteurs	Cultivé	Témoin
Profondeur (cm)	41	40
Mouvement de sol (t/ha/an)	-9,7	-15,6
C _{total} (t/ha)	82	104
C _{M3} (kg/ha)	8	10
K _{M3} (kg/ha)	842	881
P _{M3} (kg/ha)	1 111	249
Zn _{M3} (kg/ha)	9,6	17,5

Les valeurs en gras indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$ entre sols cultivés et témoins.

Profondeur : correspond à la profondeur de l'horizon Ap plus 15 cm dans le B.

Les sols cultivés sont significativement plus pauvres en matière organique dans les horizons Ap1 et B par rapport aux témoins (Tableau 86). La teneur en matière organique est faible dans les horizons Ap1 et Ap2 des sols cultivés. Elle est élevée dans l'horizon Ap1 et modérée dans l'Ap2 des sols témoins. Dans l'Ap1, cet appauvrissement en matière organique des sols cultivés par rapport aux témoins s'accompagne d'une plus faible teneur en carbone actif par rapport aux témoins. En résultante, le stock de C est plus faible dans les profils de sols cultivés que dans ceux des témoins (Tableau 85). La teneur en azote organique est aussi plus faible dans les horizons Ap1 et B des sols cultivés. Les quantités de CO₂ dégagées et de N minéralisé après une incubation de 14 jours plus faibles dans les horizons Ap1 et Ap2 des sols cultivés indiquent des sources de C et de N moins disponibles et un niveau d'activité microbiologique plus faible par rapport aux sols témoins.

Tableau 86 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 11 (Saint-Nicolas, Saint-André et Orléans).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
M.O. (%)	2,85	5,45	2,66	3,45	1,80	2,54
C total (%)	1,65	3,16	1,55	2,00	1,05	1,47
N organique (mg/kg)	1 438	2 811	1 356	1 788	935	1 314
Ratio C/N	11,1	11,3	11,1	11,3	11,6	11,1
C actif (mg/kg)	366	621	357	372	239	274
Ratio C actif/C total (mg/g)	23,1	19,7	24,0	19,2	22,3	19,2
CO ₂ dégagé 14 jours (mg/kg)	305	839	282	417	171	285
N minéralisé 14 jours (mg/kg)	26,2	86,1	23,0	38,4	13,0	19,0
Ratio N minéralisé/N org. (mg/g)	19,9	32,5	18,7	23,3	14,2	15,8

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

M.O. : matière organique du sol estimée avec C total Leco et un facteur de 1,724.

N organique : N total Leco moins N minéral.

Ratio C/N : C total Leco divisé par N total Leco.

L'acidité active (pH) des sols cultivés n'est pas différente de celle des sols témoins. Les niveaux de pH mesurés (cultivés et témoins) varient de fortement à moyennement acides (Tableau 87). La teneur en bases échangeables dans les sols cultivés varie de très faible à modérée en fonction de l'élément et de l'horizon, sauf pour K, dont la teneur dans l'horizon Ap1 des sols témoins est très élevée et significativement supérieure à que celle des sols cultivés.

Les teneurs en P sont significativement plus élevées dans les sols cultivés par rapport aux sols témoins avec des niveaux très élevés dans les horizons Ap1 et Ap2 et élevés dans l'horizon B (Tableau 87). Le bilan de masse en P est aussi plus de cinq fois plus élevé dans les sols cultivés par rapport aux témoins (Tableau 85). Dans les horizons Ap1 et Ap2, l'indice de saturation en P des sols cultivés dépasse la valeur critique agroenvironnementale de 15 % au-delà de laquelle les recommandations en P ne devraient pas dépasser les exportations par les cultures (Tableau 87).

La teneur en éléments mineurs des sols cultivés n'est pas significativement différente de celle des témoins, à l'exception de celle en Zn qui est significativement plus faible dans les trois horizons des sols cultivés (Tableau 85 et Tableau 87). Le niveau des éléments mineurs est faible dans les trois horizons de sols cultivés.

Tableau 87 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 11 (Saint-Nicolas, Saint-André et Orléans).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoïn	Cultivé	Témoïn	Cultivé	Témoïn
pH	5,7	5,7	5,8	5,5	5,8	5,6
pH _{SMP}	6,4	6,2	6,4	6,1	6,4	6,2
P _{M3} (mg/kg)	157,9	64,6	151,6	37,0	106,8	28,0
Al _{M3} (mg/kg)	1 167,5	1 130,2	1 169,7	1 235,3	1 220,8	1 292,6
Fe _{M3} (mg/kg)	279,4	229,5	278,6	224,3	274,5	219,6
ISP (%)	17,4	7,5	16,5	4,7	10,2	2,8
Mn _{M3} (mg/kg)	41,7	60,2	39,0	43,8	30,3	37,9
B _{M3} (mg/kg)	0,20	0,28	0,20	0,15	0,16	0,12
Cu _{M3} (mg/kg)	1,50	2,14	1,46	1,63	1,11	1,47
Zn _{M3} (mg/kg)	1,79	4,02	1,77	2,65	1,33	2,14
K _{M3} (cmol/kg)	0,421	0,698	0,351	0,370	0,276	0,321
Na _{M3} (cmol/kg)	0,030	0,029	0,033	0,031	0,032	0,033
Ca _{M3} (cmol/kg)	7,5	7,8	7,6	5,1	6,2	4,2
Mg _{M3} (cmol/kg)	0,98	1,11	0,95	0,68	0,79	0,71
(K+Na)/(Ca+Mg)	0,055	0,079	0,047	0,075	0,047	0,075
CEC (cmol/kg)	19,7	22,2	19,4	19,7	17,2	17,8
Sat. bases (%)	48,4	45,5	49,4	33,7	44,2	32,4

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

ISP : indice de saturation en phosphore.

CEC : capacité d'échange cationique.

M3 : extrait Mehlich-3.

Niveau d'interprétation (sauf Fe, B, ISP et (K+Na)/(Ca+Mg))

Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
-------------	--------	-------	-------	------------

Synthèse de l'état de santé des sols du groupe 11 (Saint-Nicolas, Saint-André et Orléans).

Problèmes de dégradation observés dans les sols cultivés

- Les sols sont plus compacts en surface dans les horizons Ap1 et Ap2.
- L'aération et les conditions pour les échanges gazeux ne sont pas limitantes.
- La capacité de rétention en eau n'est pas limitée.
- La structure est légèrement dégradée dans l'horizon Ap1.
- L'érosion des sols dépassent le seuil de 6 t/ha/an.
- La teneur en matière organique est faible et la teneur en C est sous le seuil de 2 % dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La respiration et la quantité d'azote minéralisable sont faibles dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La teneur en P et l'indice de saturation en P sont plus élevées dans les horizons Ap1 et Ap2 et l'ISP dépasse le seuil de 15 %. Le bilan de masse de P est plus élevé dans le profil.
- La teneur en Zn est plus faible dans les trois horizons et son bilan de masse est plus faible dans le profil.

Groupe 14 : Séries Saint-Jude et Uplands

Les séries Saint-Jude et Uplands se sont développées sur un matériau sableux profond d'origine fluviatile. Leur drainage naturel est meilleur que celui des séries du groupe 7 situées dans la même région pédologique de la Plaine de Montréal.

Tableau 88 : Caractéristiques des sols du groupe 14 (Saint-Jude et Uplands).

Caractéristiques	Saint-Jude (SJU)	Uplands (UPD)
Granulométrie du matériau, réaction	Sableux, acide	Sableux, acide
Type de dépôt	Fluviatile	Fluviatile
Classe de drainage	Imparfait	Rapide à bon
Groupe hydrologique	C	A
Taxonomie (sous-groupe)	Podzol humo-ferrique gleyifié	Podzol humo-ferrique orthique
Superficie cartographiée (ha)	111 312	32 635

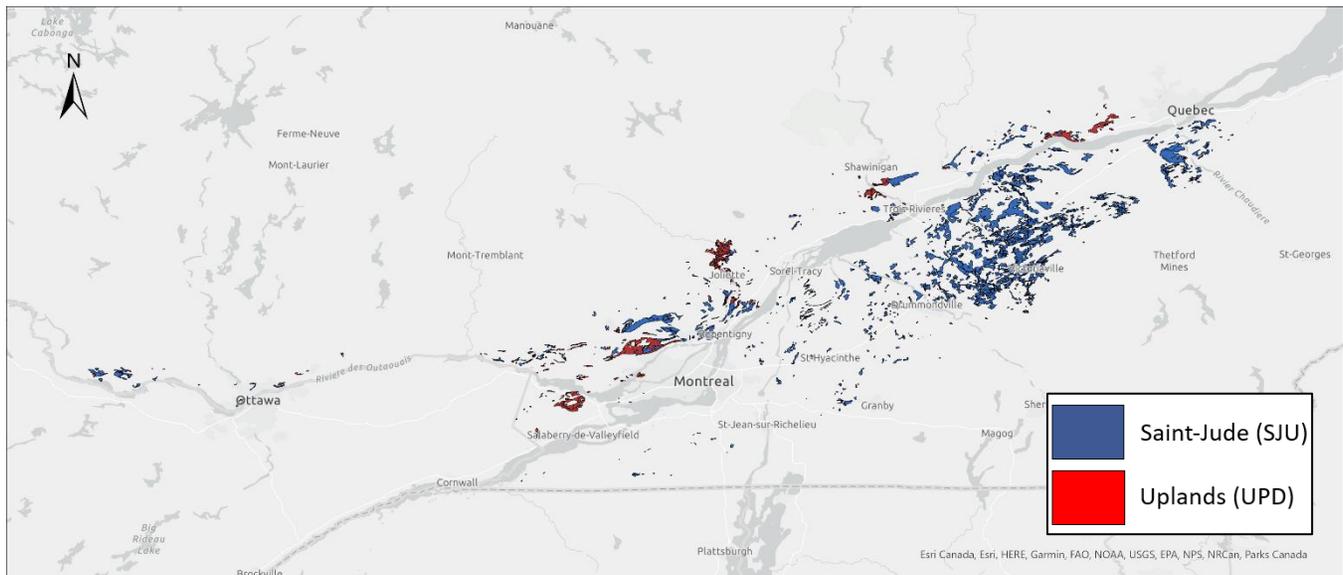


Figure 23 : Répartition géographique des sols du groupe 14 (Saint-Jude et Uplands).

L'augmentation significative de la masse volumique apparente dans les horizons Ap1 et Ap2 associée à une diminution significative de la porosité totale dans les trois horizons des sols cultivés par rapport aux témoins révèle de la compaction dans les sols cultivés (Tableau 89). La macroporosité et la teneur en air au champ sont aussi plus faibles dans les horizons Ap2 et B des sols cultivés par rapport aux témoins, mais demeure acceptable ($> 0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$). La tortuosité des pores suit la porosité totale et augmente dans tous les horizons des sols cultivés. La macroporosité et la diffusivité relative des gaz demeurent élevées et supérieures aux différents seuils prescrits autant dans les sols cultivés et témoins. La capacité au champ relative est légèrement inférieure à

l'intervalle idéale de 0,6 à 0,7 dans l'Ap1 des sols cultivés. La conductivité hydraulique mesurée à 15 cm de profondeur est significativement plus faible dans les sols cultivés par rapport aux témoins, mais elle demeure relativement élevée (> 100 cm/j). Le DMP des agrégats des sols cultivés est relativement faible (1 mm), mais n'est pas significativement différent de celui des sols témoins.

Tableau 89 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 14 (Saint-Jude et Uplands).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
Nombre d'observations	32	15	30	13	32	15
Sable (%)	85	86	84	84	89	87
Limon (%)	6	8	7	8	5	7
Argile (%)	9	6	9	8	6	6
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,23	1,09	1,42	1,17	1,51	1,42
Porosité totale (cm ³ /cm ³)	0,510	0,572	0,444	0,496	0,395	0,440
Macroporosité (cm ³ /cm ³)	0,240	0,217	0,161	0,178	0,189	0,242
Teneur en air au champ (cm ³ /cm ³)	0,252	0,240	0,163	0,236	0,140	0,246
Tortuosité des pores τ (—)	1,447	1,366	1,584	1,478	1,710	1,590
Diffusivité relative des gaz D/D0 (—)	0,037	0,022	0,014	0,014	0,031	0,058
Capacité au champ relative (—)	0,528	0,615	0,632	0,629	0,516	0,441
K _{sat} (cm/jour)			103,2	256,8	269,4	234,1
Diamètre moyen pondéré des agrégats (mm)	1,04	1,31				
Agrégats 4-8mm (%)	11,5	14,1				
Agrégats 2-4mm (%)	8,3	11,1				
Agrégats 1-2mm (%)	4,0	4,3				
Agrégats 0,5-1mm (%)	3,6	3,9				
Agrégats 0,25-0,5mm (%)	3,6	3,4				

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

K_{sat} : Conductivité hydraulique saturée mesurée à 15 cm (Ap2) et 40 cm de profondeur (B).

Les pertes de sol par érosion indiquées par le mouvement net de sol au Tableau 90 sont significativement plus élevées dans les sols cultivés et elles dépassent le seuil d'érosion de 6 t/ha/an tolérable pour la plupart des sols au Canada.

Tableau 90 : Bilans de masse des sols du groupe 14 (Saint-Jude et Uplands).

Descripteurs	Cultivé	Témoin
Profondeur (cm)	43	42
Mouvement de sols	-11,1	-0,2
C _{total} (t/ha)	76	107
C _{M3} (kg/ha)	11	7
K _{M3} (kg/ha)	417	245
P _{M3} (kg/ha)	1 179	465
Zn _{M3} (kg/ha)	25,3	21,1

Les valeurs en gras indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$ entre sols cultivés et témoins.

Profondeur : correspond à la profondeur de l'horizon Ap plus 15 cm dans le B.

La teneur en matière organique est significativement plus faible dans les horizons Ap1 et Ap2 de sols cultivés par rapport aux témoins (Tableau 91). Le niveau de la matière organique est faible dans l'Ap1 et l'Ap2 de sols cultivés.

Dans les témoins, il est élevé dans l'horizon Ap1 et modéré dans l'Ap2. Le bilan de masse de C tend à être plus faible dans les sols cultivés, mais il n'est pas significativement différent des sols témoins (Tableau 90). La teneur en azote organique est aussi plus faible dans les horizons Ap1 et B des sols cultivés. Les quantités de CO₂ dégagées et de N minéralisé après une incubation de 14 jours sont significativement plus faibles dans les horizons Ap1 et B des sols cultivés, indiquant des sources de C et de N moins disponibles et un niveau d'activité microbologique plus faible par rapport aux sols témoins.

Tableau 91 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 14 (Saint-Jude et Uplands).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
M.O. (%)	2,80	4,39	2,54	3,78	1,40	1,84
C total (%)	1,63	2,54	1,47	2,19	0,81	1,07
N organique (mg/kg)	1 131	1 873	998	1 316	414	648
Ratio C/N	14,4	14,6	14,6	15,6	18,0	15,1
C actif (mg/kg)	470	618	400	449	175	218
Ratio C actif/C total (mg/g)	28,6	22,8	27,3	22,0	24,3	20,6
CO ₂ dégagé 14 jours (mg/kg)	276	543	214	339	92	158
N minéralisé 14 jours (mg/kg)	24,4	50,1	18,8	27,9	3,7	8,0
Ratio N minéralisé/N org. (mg/g)	22,8	27,2	19,3	22,1	8,8	11,6

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

M.O. : matière organique du sol estimée avec C total Leco et un facteur de 1,724.

N organique : N total Leco moins N minéral.

Ratio C/N : C total Leco divisé par N total Leco.

Le pH des sols cultivés est significativement plus élevé que celui des témoins dans les horizons Ap2 et B (Tableau 92). Toutefois, les niveaux de pH de ces sols cultivés demeurent faiblement acides dans les trois horizons. Quant aux témoins, ils sont faiblement (Ap1) ou moyennement (Ap2 et B) acides selon l'horizon. Les teneurs en bases échangeables varient de très faibles à faibles et ne sont pas significativement différentes entre les sols cultivés et les témoins.

Les teneurs en P sont significativement plus élevées dans les sols cultivés par rapport aux sols témoins avec des niveaux très élevés dans les horizons Ap1 et Ap2 (Tableau 92). Le bilan de masse en P est aussi plus de deux fois plus élevé dans les sols cultivés par rapport aux témoins (Tableau 91). Dans l'horizon Ap1, l'indice de saturation en P des sols cultivés atteint un niveau plus élevé que la valeur critique agroenvironnementale de 15 % au-delà de laquelle les recommandations en P ne devraient pas dépasser les exportations par les cultures (Tableau 92). La teneur en B dans les horizons Ap2 et B est plus élevée dans les sols cultivés par rapport aux témoins. Le niveau des autres éléments mineurs est moyen (Ap1 et Ap2) ou très faible (horizon B) pour le Cu, élevé (Ap1, Ap2) ou très faible (horizon B) pour le Zn et très faible pour le Mn.

Tableau 92 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 14 (Saint-Jude et Uplands).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoïn	Cultivé	Témoïn	Cultivé	Témoïn
pH	6,2	6,1	6,3	5,8	6,5	6,0
pH _{SMP}	6,7	6,4	6,7	6,3	6,8	6,5
P _{M3} (mg/kg)	207,3	94,4	160,9	86,3	47,8	40,3
Al _{M3} (mg/kg)	1 491,0	1 354,4	1 513,3	1 468,5	1 526,8	1 651,5
Fe _{M3} (mg/kg)	182,9	202,8	177,9	198,4	129,5	110,4
ISP (%)	17,9	9,1	14,5	7,9	4,5	3,2
Mn _{M3} (mg/kg)	13,3	13,9	10,2	10,0	5,3	5,7
B _{M3} (mg/kg)	0,35	0,21	0,32	0,13	0,18	0,09
Cu _{M3} (mg/kg)	2,35	1,37	1,83	1,30	0,50	0,52
Zn _{M3} (mg/kg)	5,54	5,66	3,50	3,94	0,92	1,10
K _{M3} (cmol/kg)	0,253	0,165	0,168	0,105	0,092	0,081
Na _{M3} (cmol/kg)	0,015	0,013	0,017	0,013	0,014	0,009
Ca _{M3} (cmol/kg)	5,0	5,8	5,2	4,0	3,2	2,0
Mg _{M3} (cmol/kg)	0,64	0,79	0,55	0,51	0,34	0,27
(K+Na)/(Ca+Mg)	0,049	0,031	0,035	0,028	0,033	0,051
CEC (cmol/kg)	13,8	16,6	13,5	15,1	10,0	10,9
Sat. bases (%)	45,2	41,2	44,5	31,0	38,4	20,7

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

ISP : indice de saturation en phosphore.

CEC : capacité d'échange cationique.

M3 : extrait Mehlich-3.

Niveau d'interprétation (sauf Fe, B, ISP et (K+Na)/(Ca+Mg))

Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
-------------	--------	-------	-------	------------

Synthèse de l'état de santé des sols du groupe 14 (Saint-Jude et Uplands).

Problèmes de dégradation observés dans les sols cultivés

- Les sols sont plus compacts dans les trois horizons.
- L'aération et les conditions pour les échanges gazeux ne sont pas limitantes.
- La capacité de rétention en eau n'est pas limitée.
- La structure n'est pas dégradée.
- L'érosion des sols est élevée et dépassent le seuil de 6 t/ha/an.
- La teneur en matière organique est faible et la teneur en C est sous le seuil de 2 % dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La respiration et la quantité d'azote minéralisable sont plus faibles dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La teneur en P et l'indice de saturation en P sont plus élevées dans l'horizon Ap1 et l'ISP dépasse le seuil de 15 %. Le bilan de masse de P est plus élevé dans le profil.

Groupe 15 : Séries Beurivage et Morin

Les séries Beurivage et Morin se sont développées sur un matériau sableux grossier d'origine fluviatile leur conférant un drainage rapide à très rapide. Ces deux séries sont situées dans la région pédologique des Hautes-terrasse du Saint-Laurent des Appalaches (BRV) et des Laurentides (MOI).

Tableau 93 : Caractéristiques des sols du groupe 15 (Beurivage et Morin).

Caractéristiques	Beurivage (BVG)	Morin (MOI)
Granulométrie du matériau, réaction	Sableux grossier graveleux, acide	Sableux grossier, acide
Type de dépôt	Fluviatile	Fluviatile
Classe de drainage	Rapide	Très rapide
Groupe hydrologique	A	A
Taxonomie (sous-groupe)	Podzol humo-ferrique orthique	Podzol humo-ferrique orthique
Superficie cartographiée (ha)	45 036	104 149

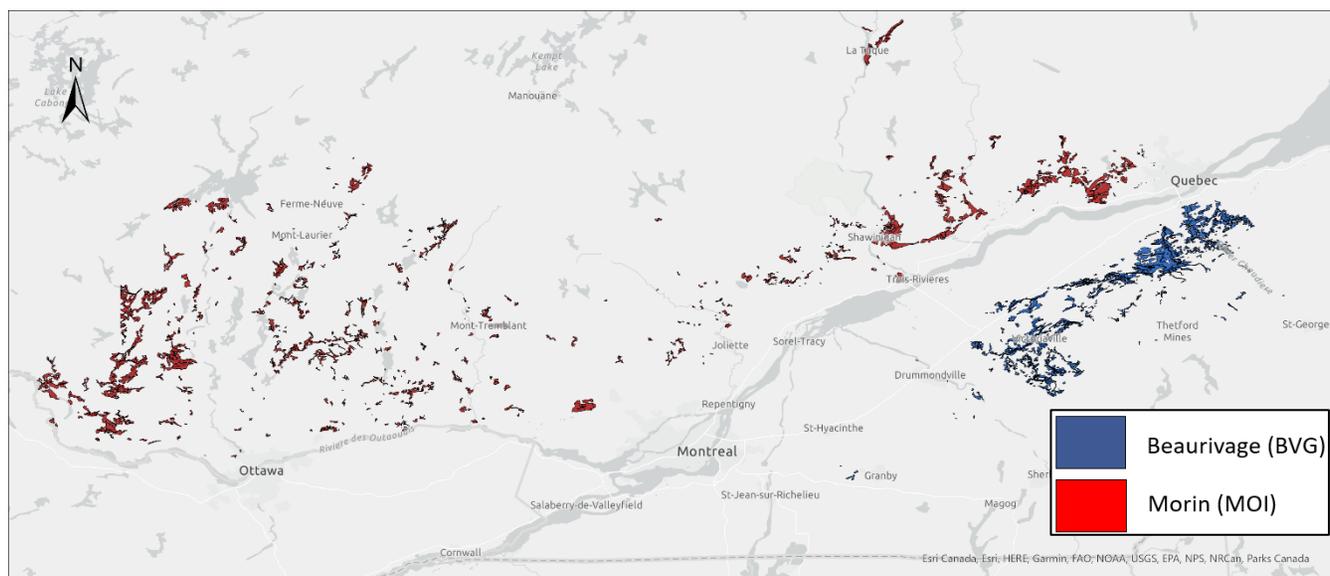


Figure 24 : Répartition géographique des sols du groupe 15 (Beurivage et Morin).

L'augmentation significative de la masse volumique apparente ainsi que la diminution de la porosité totale dans les trois horizons des sols cultivés par rapport aux témoins révèlent de la compaction superficielle et profonde de ces sols. La diminution de la macroporosité et de la teneur en air au champ dans les horizons Ap1 et Ap2 des sols cultivés indique une diminution de l'aération, mais leurs niveaux demeurent acceptables ($> 0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$). La tortuosité des pores augmente dans tous les horizons des sols cultivés, de même que le coefficient de diffusivité des gaz diminue dans l'horizon Ap2 des sols cultivés, mais demeure supérieur au seuil critique de 0,005. La conductivité hydraulique saturée n'est pas différente entre sols cultivés et témoins; elle est élevée indiquant une

circulation de l'eau adéquate. Cependant ces signes de dégradation physiques des sols cultivés par rapport aux témoins n'ont pas d'effet apparent sur la circulation de l'eau. La proportion d'agrégats inférieurs à 4 mm est inférieure dans les sols cultivés. À l'inverse, la proportion des agrégats de diamètre supérieur à 4 mm a tendance à être plus élevée que dans les sols témoins, entraînant un DMP égal entre sols cultivés et témoins.

Tableau 94 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 15 (Beaurivage et Morin).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
Nombre d'observations	32	16	31	16	32	16
Sable (%)	80	80	81	78	86	81
Limon (%)	11	12	10	13	7	11
Argile (%)	9	8	9	9	7	8
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,24	0,98	1,36	1,17	1,46	1,32
Porosité totale (cm ³ /cm ³)	0,514	0,610	0,472	0,557	0,439	0,492
Macroporosité (cm ³ /cm ³)	0,245	0,306	0,192	0,284	0,265	0,270
Teneur en air au champ (cm ³ /cm ³)	0,278	0,393	0,212	0,333	0,269	0,293
Tortuosité des pores τ (—)	1,444	1,312	1,518	1,376	1,594	1,488
Diffusivité relative des gaz D/D0 (—)	0,039	0,060	0,022	0,054	0,076	0,067
Capacité au champ relative (—)	0,524	0,495	0,593	0,498	0,380	0,428
K _{sat} (cm/jour)			106,7	137,2	393,3	567,5
Diamètre moyen pondéré des agrégats (mm)	1,92	1,92				
Agrégats 4-8mm (%)	21,7	16,7				
Agrégats 2-4mm (%)	12,1	16,0				
Agrégats 1-2mm (%)	7,7	16,0				
Agrégats 0,5-1mm (%)	8,6	14,7				
Agrégats 0,25-0,5mm (%)	6,7	9,5				

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

K_{sat} : Conductivité hydraulique saturée mesurée à 15 cm (Ap2) et 40 cm de profondeur (B).

Les pertes de sol par érosion indiquées par le mouvement net de sol au Tableau 95 ne sont pas significativement différentes entre sols cultivés et témoins, mais dans le cas des sols témoins, elles dépassent légèrement le seuil d'érosion de 6 t/ha/an tolérable pour la plupart des sols au Canada.

Tableau 95 : Bilans de masse des sols du groupe 15 (Beaurivage et Morin).

Descripteurs	Cultivé	Témoin
Profondeur (cm)	43	41
Mouvement de sol (t/ha/an)	-4,4	-6,1
C _{total} (t/ha)	115	121
C _{UM3} (kg/ha)	16	5
K _{M3} (kg/ha)	542	323
P _{M3} (kg/ha)	877	153
Zn _{M3} (kg/ha)	29,9	13,9

Les valeurs en gras indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$ entre sols cultivés et témoins.

Profondeur : correspond à la profondeur de l'horizon Ap plus 15 cm dans le B.

La teneur en matière organique n'est pas significativement différente entre sols cultivés et témoins du groupe 15 (Tableau 96). Elle est de niveau élevé dans l'Ap1 et modéré dans l'Ap2 des sols cultivés. Seules les quantités de CO₂ dégagées après une incubation de 14 jours sont significativement plus faibles dans l'horizons Ap1 des sols cultivés par rapport aux sols témoins.

Tableau 96 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 15 (Beaurivage et Morin).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
M.O. (%)	4,09	5,50	3,73	4,56	2,38	3,34
C total (%)	2,37	3,19	2,16	2,65	1,38	1,94
N organique (mg/kg)	1 568	2 116	1 402	1 606	841	1 029
Ratio C/N	14,9	15,0	15,5	16,3	15,9	17,7
C actif (mg/kg)	530	633	498	540	313	387
Ratio C actif/C total (mg/g)	23,2	19,3	24,0	20,2	21,8	20,2
CO ₂ dégagé 14 jours (mg/kg)	325	532	268	356	177	253
N minéralisé 14 jours (mg/kg)	25,5	37,6	21,1	23,0	12,2	12,2
Ratio N minéralisé/N org. (mg/g)	17,8	19,2	16,1	16,1	10,6	11,5

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

M.O. : matière organique du sol estimée avec C total Leco et un facteur de 1,724.

N organique : N total Leco moins N minéral.

Ratio C/N : C total Leco divisé par N total Leco.

Le pH des sols cultivés est généralement plus élevé que celui des témoins dans les trois horizons avec une différence significative dans l'horizon Ap1 (Tableau 97). Toutefois, les sols cultivés demeurent moyennement acides sur toute leur profondeur. Quant aux témoins, leurs niveaux de pH varient de fortement acides dans les horizons Ap1 et Ap2, à moyennement acides dans l'horizon B.

Les teneurs en P sont plus élevées dans les sols cultivés par rapport aux sols témoins avec une teneur en P qui varie de très élevée dans l'Ap1 à modérément élevée dans le B. À l'inverse, la teneur en P dans les témoins est faible dans tout le profil. Le bilan de masse en P est aussi près de cinq fois plus élevé dans les sols cultivés par rapport aux témoins (Tableau 95). En dépit de cet enrichissement des sols cultivés en P, leur indice de saturation demeure en-dessous de la valeur critique environnementale de 15 % en raison de leur forte capacité de fixation en P ($Al_{M-III} \geq 1600$ mg/kg). À l'exception de celle en K qui est moyennement élevée, la teneur en bases échangeables des sols cultivés est faible dans les horizons Ap et ce, même après un enrichissement significatif par rapport aux témoins. Il y a aussi un enrichissement significatif des sols cultivés en B et en Cu dans les trois horizons et en Zn dans l'Ap2. Les niveaux de Cu dans les sols cultivés varient de moyens à élevés dans l'horizon Ap comparativement à faibles et très faibles dans les témoins. Comme pour le P, les bilans de masse en Cu et Zn sont significativement plus élevés dans les sols cultivés par rapport aux témoins (Tableau 95).

Tableau 97 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 15 (Beaurivage et Morin).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
pH	5,9	5,4	5,9	5,5	5,9	5,7
pH _{SMP}	6,4	6,0	6,3	6,0	6,5	6,2
P _{M3} (mg/kg)	142,9	37,1	123,1	28,9	75,8	21,1
Al _{M3} (mg/kg)	1 690,9	1 748,3	1 720,4	1 775,4	1 813,9	1 894,3
Fe _{M3} (mg/kg)	152,1	170,2	148,1	148,9	114,0	124,3
ISP (%)	10,7	3,1	9,1	2,5	4,8	1,5
Mn _{M3} (mg/kg)	19,9	12,0	15,4	10,0	10,3	6,8
B _{M3} (mg/kg)	0,32	0,15	0,29	0,12	0,21	0,09
Cu _{M3} (mg/kg)	3,26	1,35	2,70	1,03	1,48	0,51
Zn _{M3} (mg/kg)	6,72	4,19	4,93	2,66	2,80	1,71
K _{M3} (cmol/kg)	0,352	0,202	0,235	0,142	0,136	0,094
Na _{M3} (cmol/kg)	0,023	0,023	0,020	0,017	0,017	0,015
Ca _{M3} (cmol/kg)	4,4	2,2	4,1	2,1	2,6	1,8
Mg _{M3} (cmol/kg)	0,53	0,24	0,45	0,16	0,35	0,13
(K+Na)/(Ca+Mg)	0,077	0,096	0,062	0,080	0,063	0,069
CEC (cmol/kg)	16,3	17,3	15,9	16,1	13,1	13,9
Sat. bases (%)	34,5	17,6	32,8	16,9	24,7	16,4

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

ISP : indice de saturation en phosphore.

CEC : capacité d'échange cationique.

M3 : extrait Mehlich-3.

Niveau d'interprétation (sauf Fe, B, ISP et (K+Na)/(Ca+Mg))

Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
-------------	--------	-------	-------	------------

Synthèse de l'état de santé des sols du groupe 15 (Beaurivage et Morin).

Problèmes de dégradation observés dans les sols cultivés

- Les sols sont plus compacts dans les trois horizons.
- L'aération et les conditions pour les échanges gazeux ne sont pas limitantes.
- La capacité de rétention en eau n'est pas limitée.
- La structure n'est pas dégradée.
- L'érosion des sols est élevée et dépassent le seuil de 6 t/ha/an.
- La teneur en matière organique est modérée et la teneur en C est supérieur au seuil de 2 % dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La respiration est plus faible dans l'horizon Ap1.
- La teneur en P et l'indice de saturation en P sont plus élevées dans les trois horizons, mais l'ISP ne dépasse pas le seuil de 15 %.
- Les teneurs en B, Ca, Cu et Mg sont plus élevées dans les trois horizons.
- Les bilans de masse de P, Cu et Zn sont plus élevés dans le profil.

Groupe 19 : Séries Saint-Bruno et Danby

Les séries Saint-Bruno et Danby se sont développées sur un matériau squelettique-loameux à squelettique-sableux d'origine fluvio-glaciaire leur conférant un drainage rapide à très rapide. Ces séries sont situées dans les régions pédologiques des Basses et moyennes collines des Appalaches et du Bas-plateau de Compton.

Tableau 98 : Caractéristiques des sols du groupe 19 (Saint-Bruno et Danby).

Caractéristiques	Saint-Bruno (SIB)	Danby (DBY)
Granulométrie du matériau, réaction	Squelettique-loameux à squelettique-sableux, acide	Squelettique-loameux à squelettique-sableux, acide
Type de dépôt	Fluvio-glaciaire	Fluvio-glaciaire
Classe de drainage	Rapide	Très rapide
Groupe hydrologique	A	A
Taxonomie (sous-groupe)	Podzol humo-ferrique orthique	Podzol humo-ferrique orthique
Superficie cartographiée (ha)	73 961	23 707

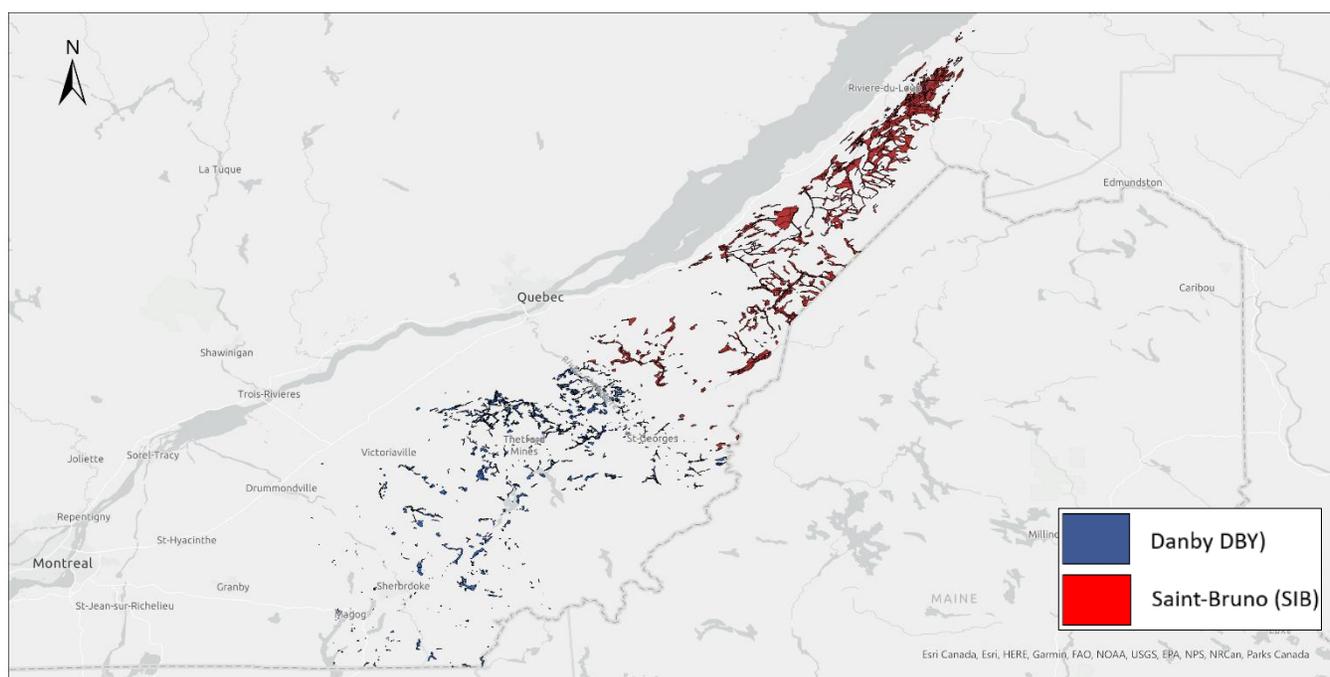


Figure 25 : Répartition géographique des sols du groupe 19 (Saint-Bruno et Danby).

Les sols cultivés ne présentent pas de modifications significatives de leurs propriétés physiques par rapport aux témoins (Tableau 99). Malgré la présence importante de fragments grossiers ($> 2 \text{ mm}$), la masse volumique apparente de ces sols est relativement faible ($< 1,1 \text{ g/cm}^3$ dans l'horizon Ap1). La macroporosité et la teneur en air au champ sont très élevée par rapport au seuil critique de $0,01 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. De même pour la diffusivité relative

des gaz. La conductivité hydraulique saturée est élevée ($> 100 \text{ cm/j}$) et le DMP des agrégats présente une valeur acceptable ($> 2\text{mm}$) pour des sols squelettiques loameux et sableux.

Tableau 99 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 19 (Saint-Bruno et Danby).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
Nombre d'observations	32	14	30	14	32	14
Sable (%)	60	55	62	58	67	65
Limon (%)	25	27	24	26	21	22
Argile (%)	15	18	14	16	12	13
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1,09	1,04	1,22	1,24	1,34	1,29
Porosité totale (cm^3/cm^3)	0,577	0,610	0,540	0,535	0,482	0,500
Macroporosité (cm^3/cm^3)	0,252	0,255	0,233	0,214	0,233	0,223
Teneur en air au champ (cm^3/cm^3)	0,315	0,349	0,295	0,286	0,287	0,269
Tortuosité des pores τ (—)	1,349	1,314	1,403	1,408	1,508	1,473
Diffusivité relative des gaz D/D_0 (—)	0,031	0,033	0,028	0,024	0,039	0,030
Capacité au champ relative (—)	0,569	0,594	0,573	0,594	0,525	0,552
K_{sat} (cm/jour)			162,0	96,6	278,7	156,3
Diamètre moyen pondéré des agrégats (mm)	2,09	2,30				
Agrégats 4-8mm (%)	19,7	23,3				
Agrégats 2-4mm (%)	18,2	18,3				
Agrégats 1-2mm (%)	15,9	15,9				
Agrégats 0,5-1mm (%)	11,3	12,2				
Agrégats 0,25-0,5mm (%)	7,0	7,7				

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

K_{sat} : Conductivité hydraulique saturée mesurée à 15 cm (Ap2) et 40 cm de profondeur (B).

Les pertes de sol par érosion indiquées par le mouvement net de sol au Tableau 100 ne sont pas significativement différentes entre sols cultivés et témoins, mais dans les deux cas, elles dépassent légèrement le seuil d'érosion de 6 t/ha/an tolérable pour la plupart des sols au Canada.

Tableau 100 : Bilans de masse des sols du groupe 19 (Saint-Bruno et Danby).

Descripteurs	Cultivé	Témoin
Profondeur (cm)	38	37
Mouvement de sol (t/ha/an)	-7,1	-7,2
C_{total} (t/ha)	117	116
C_{M3} (kg/ha)	10	6
K_{M3} (kg/ha)	402	583
P_{M3} (kg/ha)	259	374
Zn_{M3} (kg/ha)	24,5	18,3

Les valeurs en gras indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$ entre sols cultivés et témoins.

Profondeur : correspond à la profondeur de l'horizon Ap plus 15 cm dans le B.

La teneur en matière organique n'est pas significativement différente entre sols cultivés et témoins du groupe 19 (Tableau 101). Le niveau de la matière organique dans ces sols (cultivés et témoins) est très élevé dans l'horizon

Ap1 et élevé dans l'Ap2. Les quantités d'azote minéralisable après 14 jours d'incubation sont aussi élevées dans les sols cultivés que dans les sols témoins.

Tableau 101 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 19 (Saint-Bruno et Danby).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
M.O. (%)	6,02	6,92	4,65	4,58	2,98	2,75
C total (%)	3,49	4,00	2,70	2,66	1,73	1,59
N organique (mg/kg)	2 731	3 185	2 109	2 129	1 132	1 161
Ratio C/N	12,6	12,2	13,0	12,6	15,6	13,8
C actif (mg/kg)	735	749	590	583	366	353
Ratio C actif/C total (mg/g)	22,0	20,4	22,4	21,9	21,3	22,4
CO₂ dégagé 14 jours (mg/kg)	670	946	433	543	225	273
N minéralisé 14 jours (mg/kg)	67,5	95,6	43,7	52,8	16,0	18,2
Ratio N minéralisé/N org. (mg/g)	25,8	31,0	20,9	24,5	15,1	15,9

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

M.O. : matière organique du sol estimée avec C total Leco et un facteur de 1,724.

N organique : N total Leco moins N minéral.

Ratio C/N : C total Leco divisé N total Leco.

Le pH des sols cultivés est significativement plus élevé que celui des sols témoins dans l'horizon B. Toutefois, les sols cultivés demeurent moyennement (Ap1 et Ap2) ou faiblement acides (horizon B). Quant aux témoins, leurs niveaux de pH varient de moyennement acides dans l'horizon B à fortement acides dans les horizons Ap1 et Ap2 (Tableau 102).

La teneur en bases échangeables dans les sols cultivés varie de très faible à faible pour le Na, Ca et Mg. Dans le cas du Ca, la teneur des horizons Ap2 et B des sols cultivés est plus élevée que celle des témoins. Le niveau du K varie de très faible (horizon B) à moyen (Ap1). L'indice de saturation en P des sols du groupe 19 se trouve nettement en dessous de la valeur critique agroenvironnementale de 15 % en raison de la faible teneur en P de ces sols associés à leur bonne capacité de fixation ($Al > 1100$ mg/kg). Le niveau de P dans les sols cultivés est modéré dans l'horizon Ap1, faible dans l'Ap2 et très faible dans l'horizon B. La teneur en B dans l'horizon Ap2 est plus élevée dans les sols cultivés que dans les témoins. Le niveau des autres éléments mineurs est élevé (Ap1), moyen (Ap2) ou très faible (horizon B) pour le Cu, élevé (Ap1, Ap2) ou faible (horizon B) pour le Zn et faible (Ap1, Ap2) ou très faible (horizon B) pour le Mn.

Tableau 102 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 19 (Saint-Bruno et Danby).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoïn	Cultivé	Témoïn	Cultivé	Témoïn
pH	5,9	5,5	6,0	5,5	6,1	5,7
pH _{SMP}	6,3	6,0	6,3	6,1	6,4	6,3
P _{M3} (mg/kg)	80,8	77,0	52,8	49,5	28,6	29,4
Al _{M3} (mg/kg)	1 380	1 334	1 442	1 379	1 665	1 568
Fe _{M3} (mg/kg)	188,0	244,7	169,5	216,6	140,4	159,7
ISP (%)	8,0	6,5	5,6	4,4	2,5	2,1
Mn _{M3} (mg/kg)	34,2	41,5	27,0	33,5	11,8	18,6
B _{M3} (mg/kg)	0,36	0,21	0,27	0,15	0,17	0,10
Cu _{M3} (mg/kg)	3,04	1,89	1,99	1,28	0,96	0,72
Zn _{M3} (mg/kg)	8,91	7,13	4,67	3,12	1,87	1,68
K _{M3} (cmol/kg)	0,377	0,309	0,209	0,201	0,104	0,145
Na _{M3} (cmol/kg)	0,051	0,030	0,049	0,027	0,038	0,022
Ca _{M3} (cmol/kg)	6,7	5,1	5,5	3,0	4,1	1,9
Mg _{M3} (cmol/kg)	0,84	0,62	0,55	0,37	0,31	0,25
(K+Na)/(Ca+Mg)	0,060	0,072	0,048	0,079	0,040	0,093
CEC (cmol/kg)	19,6	20,3	17,8	18,2	14,8	14,5
Sat. bases (%)	41,8	31,9	37,9	26,3	32,2	20,2

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

ISP : indice de saturation en phosphore.

CEC : capacité d'échange cationique.

M3 : extrait Mehlich-3.

Niveau d'interprétation (sauf Fe, B, ISP et (K+Na)/(Ca+Mg))

Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
-------------	--------	-------	-------	------------

Synthèse de l'état de santé des sols du groupe 19 (Saint-Bruno et Danby).

Problèmes de dégradation observés dans les sols cultivés

- Les sols cultivés ne sont pas plus compacts que les sols témoins.
- L'aération et les conditions pour les échanges gazeux ne sont pas limitantes.
- La capacité de rétention en eau n'est pas limitée.
- La structure n'est pas dégradée.
- L'érosion des sols dépassent légèrement le seuil de 6 t/ha/an.
- La teneur en matière organique est élevée et la teneur en C est supérieure au seuil de 2 % dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La respiration et la quantité d'azote minéralisé ne sont pas limitées.
- Les teneurs en B et Ca sont plus élevées dans les horizons Ap2 et B.

Sols issus de dépôts glaciaires

Les sols issus de dépôts glaciaires (tills) occupent d'importantes superficies au Québec. Ils sont caractérisés par un drainage naturel variable selon leur position topographique dans le paysage (caténa), une présence de fragments grossiers (particules > 2 mm) et une granulométrie variant de loameux-grossier à loameux-fin. Certains de ces sols sont considérés squelettiques lorsqu'ils ont un contenu en fragments grossiers de 35 % et plus en volume. L'abondance de fragments grossiers associée à la présence d'affleurement rocheux dans ces types de sol peuvent être des facteurs limitatifs à l'agriculture.

La granulométrie du matériau parental, la classe de réaction, la classe de drainage et la région pédologique dominante sont les caractéristiques qui ont permis de définir les groupes de séries de sols utilisés pour l'étude. Les groupes (Figure 26) sont situés dans les régions pédologiques suivantes : Plaine de Montréal (A1), Hautes-terres du Saint-Laurent (A4), Monts Sutton (B1), Basses et moyennes collines des Appalaches orientales (B2), Basses et moyennes collines des Appalaches occidentales (B3), Bas plateau de Compton (B4), Hautes-terres des Laurentides (C1), Monts Notre-Dame (B6) et Bas-Plateau de la baie des Chaleurs (B7).

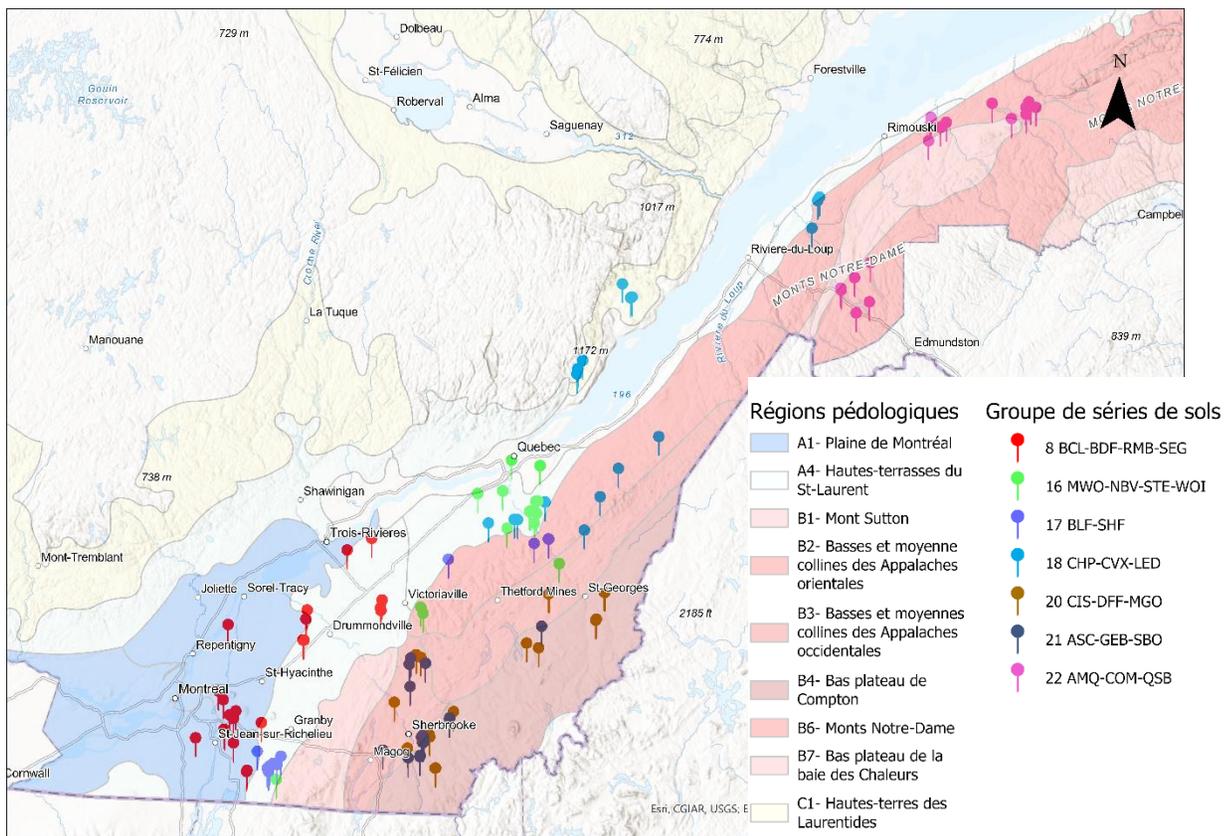


Figure 26 : Position des sites échantillonnés dans les tills et leurs régions pédologiques.

Les tills sont représentés par 21 séries de sols divisées en huit groupes (Tableau 103). Les sols des groupes 8-A et 8-B sont alcalins, mal drainés naturellement et sont situés dans les mêmes régions pédologiques, mais les sols du groupe 8-B sont plus grossiers que les sols du groupe 8-A. Les sols des groupes 16 et 17 sont des sols acides, loameux-grossiers sur un matériau parfois squelettique, mais leur drainage naturel est différent. Les sols du groupe 17 ont un bon drainage, tandis que les sols du groupe 16 ont un drainage mauvais à imparfait.

Tableau 103 : Caractéristiques définissant les groupes de séries des tills.

Groupe	Série de sols	Granulométrie du matériau parental	Classe de réaction	Classe de drainage	Région pédologique dominante
8-A	Boucherville*	Loameux-fin	Alcalin	Mauvais	Plaine de Montréal
	Bedford*	Loameux-fin à loameux-grossier	Alcalin	Mauvais	Hautes-terrasses du Saint-Laurent
8-B	Sainte-Brigide*	Loameux-grossier	Alcalin	Mauvais	Plaine de Montréal
	Raimbault*	Loameux-grossier	Alcalin	Mauvais	Hautes-terrasses du Saint-Laurent
16	Mawcook*	Loameux-grossier à squelettique-loameux	Acide	Mauvais	Hautes-terrasses du Saint-Laurent
	Norbertville	Loameux-grossier	Acide	Mauvais	Hautes-terrasses du Saint-Laurent
	Woodbridge*	Loameux-grossier à squelettique-loameux	Acide	Imparfait	Monts Sutton
	Sainte-Marie*	Loameux-grossier à squelettique-loameux	Acide	Mauvais	Basses et moyennes collines des Appalaches orientales
17	Shefford*	Squelettique-loameux	Acide	Bon	Hautes-terrasses du Saint-Laurent
	Blandford	Loameux-grossier à squelettique-loameux	Acide	Bon	Monts Sutton
18	Chapais	Squelettique-loameux	Acide	Bon	Basses et moyennes collines des Appalaches orientales
	Leeds	Loameux-grossier à squelettique-loameux	Acide	Bon	Basses et moyennes collines des Appalaches orientales
	Charlevoix	Loameux-grossier à squelettique-loameux	Acide	Bon	Hautes-terres des Laurentides
20	Magog*	Loameux	Acide	Mauvais	Basses et moyennes collines des Appalaches occidentales
	Calais*	Loameux	Neutre	Mauvais	Bas plateau de Compton
	Dufferin*	Loameux	Alcalin	Mauvais	Bas plateau de Compton
21	Sherbrooke*	Loameux-grossier	Acide	Modérément bon	Basses et moyennes collines des Appalaches occidentales
	Ascot*	Loameux-grossier	Acide	Bon	Basses et moyennes collines des Appalaches occidentales
	Greensboro*	Loameux-grossier	Acide	Modérément bon	Bas plateau de Compton
22	Amqui	Squelettique-loameux	Acide	Bon	Monts Notre-Dame
	Quisibis	Squelettique-loameux	Acide	Rapide	Monts Notre-Dame
	Comis	Loameux-fin	Acide	Modérément bon	Bas-plateau de la baie des Chaleurs

*Série de sols évaluée dans le cadre de l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec (Tabi et al., 1990).

Comme le groupe 17, les sols du groupe 18 sont bien drainés avec une granulométrie de matériaux semblable, mais sont situés dans des régions pédologiques différentes. Les groupes 20 et 21 sont situés dans les mêmes régions pédologiques, le drainage du groupe 21 étant meilleur que les sols du groupe 20. Les sols du groupe 22 se

retrouvent à l'intérieur d'une même région pédologique située à l'extrémité est de la province. Les sols indiqués loameux (groupe 20) ont une granulométrie variant de loameux-fin à loameux grossier.

Groupe 8-A : Séries Boucherville et Bedford

Les séries Boucherville et Bedford se sont développées sur des tills loameux-fins et alcalins avec un mauvais drainage naturel. Le matériau du groupe 8-A est légèrement plus fin que celui du groupe 8-B. Ces séries sont situées dans les régions pédologiques de la Plaine de Montréal et des Hautes-terrasses du Saint-Laurent.

Tableau 104 : Caractéristiques des sols du groupe 8-A (Boucherville et Bedford).

Caractéristiques	Boucherville (BCL)	Bedford (BDF)
Granulométrie du matériau, réaction	Loameux-fin, alcalin	Loameux-fin à loameux-grossier, alcalin
Type de dépôt	Till (glaciaire)	Till (glaciaire)
Classe de drainage	Mauvais	Mauvais
Groupe hydrologique	C	C
Taxonomie (sous-groupe)	Gleysol humique orthique	Gleysol humique orthique
Superficie cartographiée (ha)	13 509	44 749

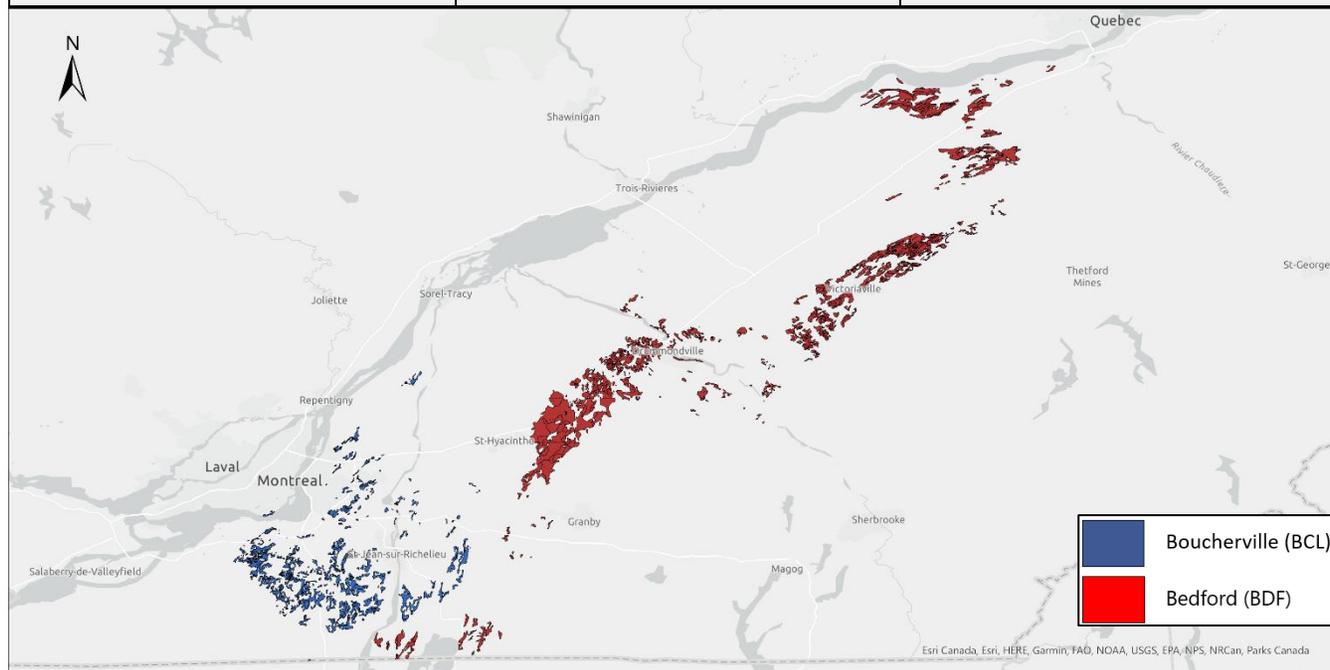


Figure 27 : Répartition géographique des sols du groupe 8-A (Boucherville et Bedford).

Une augmentation significative de la masse volumique apparente et une diminution significative de la porosité totale des horizons Ap1 et Ap2 des sols cultivés indiquent qu'ils sont plus compacts par rapport aux sols témoins (Tableau 105). De plus, une baisse de la macroporosité et de la teneur en air dans tous les horizons des sols cultivés indique une diminution de leur aération. La tortuosité des pores significativement plus élevée de même que la diffusivité relative des gaz plus faible et inférieure à 0,005 dans les trois horizons des sols cultivés indiquent aussi

des conditions limitantes pour les échanges gazeux par rapport aux sols témoins. La capacité au champ relative plus élevée et supérieure à 0,7 dans les trois horizons des sols cultivés indique des quantités d'eau en excès favorisant des processus anaérobies. La conductivité hydraulique saturée est significativement plus faible à 15 cm de profondeur dans les sols cultivés par rapport aux témoins et elle est inférieure au seuil de 10 cm/jour dans tout le profil, indiquant une circulation réduite de l'eau à la surface du profil. La structure des sols cultivés semble légèrement dégradée : la proportion des agrégats dont le diamètre est compris entre 0,5 et 4 mm est plus faible par rapport aux témoins. Toutefois, la proportion d'agrégats supérieurs à 4 mm et le DMP ne sont pas significativement différents entre sols cultivés et témoins.

Tableau 105 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 8-A (Boucherville et Bedford).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
Nombre d'observations	32	16	30	12	32	16
Sable (%)	50	51	50	50	47	48
Limon (%)	29	27	28	28	32	31
Argile (%)	21	22	22	22	21	21
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,39	1,03	1,56	1,18	1,78	1,62
Porosité totale (cm ³ /cm ³)	0,465	0,593	0,415	0,527	0,337	0,382
Macroporosité (cm ³ /cm ³)	0,110	0,187	0,063	0,179	0,056	0,106
Teneur en air au champ (cm ³ /cm ³)	0,108	0,208	0,072	0,194	0,064	0,107
Tortuosité des pores τ (—)	1,537	1,330	1,656	1,432	1,913	1,749
Diffusivité relative des gaz D/D0 (—)	0,004	0,011	0,001	0,012	0,001	0,005
Capacité au champ relative (—)	0,768	0,686	0,846	0,655	0,835	0,715
K _{sat} (cm/jour)			8,7	39,7	1,2	2,3
Diamètre moyen pondéré des agrégats (mm)	2,85	2,97				
Agrégats 4-8mm (%)	38,0	34,9				
Agrégats 2-4mm (%)	12,7	20,0				
Agrégats 1-2mm (%)	6,0	13,9				
Agrégats 0,5-1mm (%)	4,2	8,1				
Agrégats 0,25-0,5mm (%)	2,4	3,8				

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

K_{sat} : Conductivité hydraulique saturée mesurée à 15 cm (Ap2) et 40 cm de profondeur (B).

Les pertes de sol par érosion indiquées par le mouvement net de sol au Tableau 106 ne sont pas significativement différentes entre sols cultivés et témoins, mais dans le cas des sols cultivés, elles dépassent le seuil d'érosion de 6 t/ha/an tolérable pour la plupart des sols au Canada.

Tableau 106 : Bilans de masse des sols du groupe 8-A (Boucherville et Bedford).

Descripteurs	Cultivé	Témoin
Profondeur (cm)	44	38
Mouvement net de sol (t/ha)	-10,6	-3,3
C _{total} (t/ha)	95	131
Cu _{M3} (kg/ha)	13	11
K _{M3} (kg/ha)	342	260
P _{M3} (kg/ha)	156	78
Zn _{M3} (kg/ha)	14,9	9,3

Les valeurs en gras indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10 entre sols cultivés et témoins.
Profondeur : correspond à la profondeur de l'horizon Ap plus 15 cm dans le B.

La teneur en matière organique est significativement plus faible dans les horizons Ap1 et B des sols cultivés par rapport aux témoins (Tableau 107). Dans les sols témoins, la teneur en matière organique est d'un niveau élevé dans l'horizon Ap1 et modéré dans l'Ap2. Dans les sols cultivés, elle est modérée dans les horizons Ap1 et Ap2. La teneur en azote organique est aussi plus faible dans les horizons Ap1 et Ap2 des sols cultivés. Dans l'Ap1, cet appauvrissement en matière organique des sols cultivés par rapport aux témoins s'accompagne d'une plus faible teneur en carbone actif par rapport aux témoins. Les quantités de CO₂ dégagées après une incubation de 14 jours, sont significativement plus faibles dans les trois horizons des sols cultivés et l'azote minéralisable est aussi plus faible dans les horizons Ap1 et Ap2 des sols cultivés, indiquant des sources de C et de N moins disponibles et une activité biologique plus faible par rapport aux sols témoins.

Tableau 107 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 8-A (Boucherville et Bedford).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
M.O. (%)	3,50	4,92	3,26	3,68	0,75	1,15
C total (%)	2,03	2,85	1,89	2,19	0,43	0,67
N organique (mg/kg)	1 682	2 885	1 579	2 199	517	730
Ratio C/N	11,3	13,1	11,4	13,2	9,9	11,9
C actif (mg/kg)	540	769	444	572	99	182
Ratio C actif/C total (mg/g)	26,9	20,3	24,0	19,8	23,7	19,3
CO ₂ dégagé 14 jours (mg/kg)	421	838	352	574	137	191
N minéralisé 14 jours (mg/kg)	42,7	94,8	34,1	59,5	4,5	7,5
Ratio N minéralisé/N org. (mg/g)	25,7	33,6	21,7	27,7	7,9	9,0

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

M.O. : matière organique du sol estimée avec C total Leco et un facteur de 1,724.

N organique : N total Leco moins N minéral.

Ratio C/N : C total Leco divisé par N total Leco.

Le pH des sols cultivés est significativement plus élevé que celui des témoins dans les trois horizons, variant de neutre à faiblement alcalin (Tableau 108). Quant aux témoins, leurs niveaux de pH varient de faiblement acides dans les horizons Ap1 et Ap2, à neutre dans l'horizon B.

L'indice de saturation en P des sols du groupe 8-A se trouve en dessous de la valeur critique agroenvironnementale de 15 % en raison de la faible teneur en P de ces sols (Tableau 108). Le bilan de masse de P est plus élevé dans le profil des sols cultivés par rapport aux sols témoins, mais très inférieur au seuil de 500 kg/ha (Tableau 106). Les

sols cultivés ont une teneur modérée en Mn dans les horizons Ap1 et Ap2 qui est significativement plus élevée que celle des témoins. Le niveau du Cu et du Zn est aussi modéré dans les horizons Ap1 et Ap2 des sols cultivés. La teneur en bases échangeables des sols cultivés n'est pas différente de celle des sols témoins, avec des niveaux allant de modérés à élevés pour le K, élevés à très élevés pour le Mg, modérés pour le Ca et de très faibles à moyens pour le Na.

Tableau 108 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 8-A (Boucherville et Bedford).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
pH	6,8	6,3	7,0	6,4	7,5	6,9
pH _{SMP}	6,9	6,7	7,0	6,8	7,3	7,1
P _{M3} (mg/kg)	37,0	26,1	23,5	18,8	2,9	3,9
Al _{M3} (mg/kg)	686,4	610,6	659,7	630,4	579,5	513,6
Fe _{M3} (mg/kg)	241,9	266,5	238,6	228,1	145,1	182,6
ISP (%)	5,6	4,7	3,7	3,2	0,7	0,6
Mn _{M3} (mg/kg)	59,5	29,1	55,0	25,6	80,1	48,2
B _{M3} (mg/kg)	0,57	0,60	0,52	0,36	0,17	0,14
Cu _{M3} (mg/kg)	2,37	2,10	2,05	1,84	1,20	1,34
Zn _{M3} (mg/kg)	2,76	2,69	1,97	1,75	1,03	1,23
K _{M3} (cmol/kg)	0,170	0,198	0,118	0,146	0,085	0,099
Na _{M3} (cmol/kg)	0,031	0,028	0,037	0,029	0,040	0,043
Ca _{M3} (cmol/kg)	11,3	11,8	12,3	10,6	10,3	11,2
Mg _{M3} (cmol/kg)	1,02	1,16	0,92	1,00	0,94	1,10
(K+Na)/(Ca+Mg)	0,017	0,019	0,013	0,013	0,012	0,012
CEC (cmol/kg)	17,8	22,7	17,9	20,4	13,7	18,6
Sat. bases (%)	72,5	66,5	77,2	67,8	84,8	80,4

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

ISP : indice de saturation en phosphore.

CEC : capacité d'échange cationique.

M3 : extrait Mehlich-3.

Niveau d'interprétation (sauf Fe, B, ISP et (K+Na)/(Ca+Mg))

Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
-------------	--------	-------	-------	------------

Synthèse de l'état de santé des sols du groupe 8-A (Boucherville et Bedford).

Problèmes de dégradation observés dans les sols cultivés

- Les sols sont plus compacts dans les horizons Ap1 et Ap2.
- L'aération et les conditions pour les échanges gazeux sont limitantes dans les horizons Ap2 et B.
- Les quantités d'eau en excès favorisent des processus anaérobies dans les trois horizons.
- La circulation de l'eau est réduite à 15 et 40 cm de profondeur.
- La structure est dégradée dans l'horizon Ap1.
- L'érosion de sols dépassent le seuil de 6 t/ha/an.
- La teneur en matière organique est modérée et la teneur en C est proche du seuil critique de 2 % dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La respiration et la quantité d'azote minéralisable sont faibles dans les trois horizons.
- Les teneurs en Mn sont plus élevées dans les trois horizons.
- Les bilans de masse indiquent un enrichissement en P, Cu et Zn dans le profil.

Groupe 8-B : Séries Sainte-Brigide et Rimbault

Les séries Sainte-Brigide et Rimbault se sont développées sur des tills loameux-grossier et alcalin avec un mauvais drainage naturel. Le matériau du groupe 8-B est légèrement plus grossier que celui du groupe 8-A. Ces séries sont situées dans les régions pédologiques de la Plaine de Montréal et des Hautes-terrasses du Saint-Laurent.

Tableau 109 : Caractéristiques des sols du groupe 8-B (Sainte-Brigide et Rimbault).

Caractéristiques	Sainte-Brigide (SEG)	Rimbault (RMB)
Granulométrie du matériau, réaction	Loameux-grossier, alcalin	Loameux-grossier, alcalin
Type de dépôt	Till (glaciaire)	Till (glaciaire)
Classe de drainage	Mauvais	Mauvais à imparfait
Groupe hydrologique	C	C
Taxonomie (sous-groupe)	Gleysol humique orthique	Gleysol humique orthique
Superficie cartographiée (ha)	15 187	24 538*

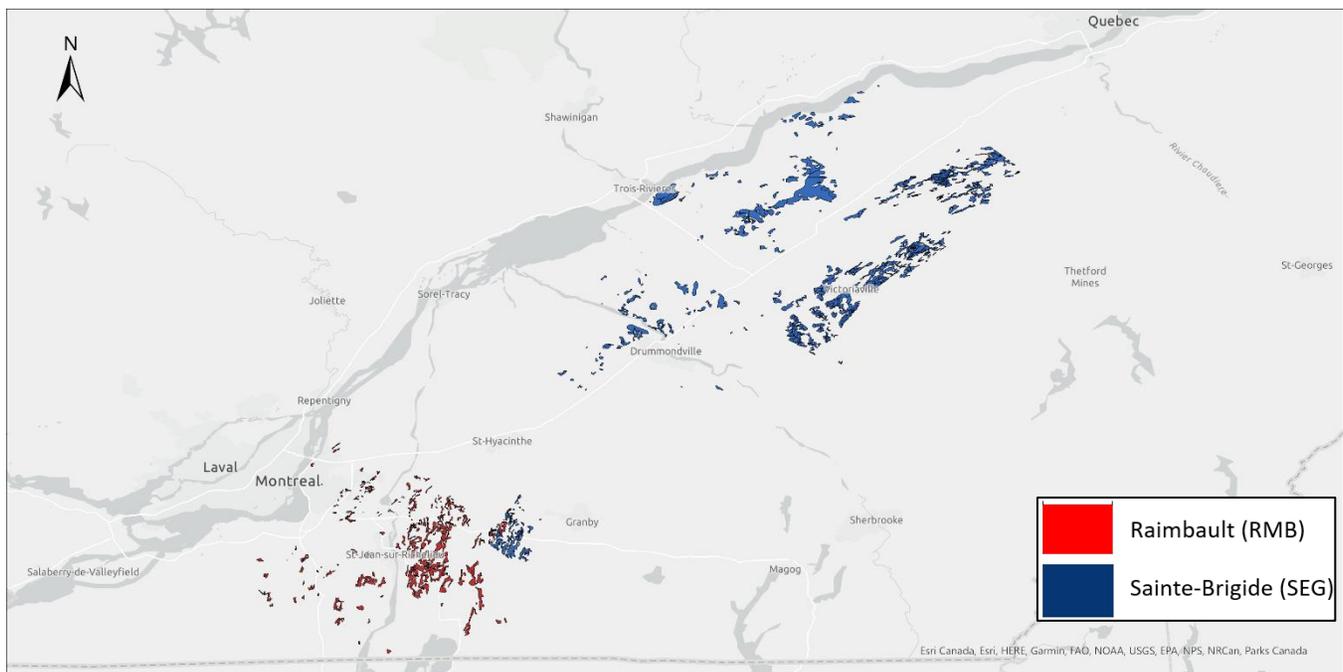


Figure 3 : Répartition géographique du groupe 8-B (Saint-Brigide et Rimbault)

Une augmentation significative de la masse volumique apparente des horizons Ap1 et Ap2 des sols cultivés et une diminution significative de la porosité totale de l'horizons Ap1 indiquent qu'ils sont plus compacts par rapport aux sols témoins (Tableau 110). De plus, une baisse de la macroporosité et de la teneur en air dans les trois horizons des sols cultivés indique une diminution de leur aération. La tortuosité des pores significativement plus élevée de même que la diffusivité relative des gaz plus faible et inférieure à 0,005 dans les trois horizons des sols cultivés indiquent aussi des conditions limitantes pour les échanges gazeux par rapport aux sols témoins. La capacité au champ relative plus élevée et supérieure à 0,7 dans les trois horizons des sols cultivés indique des quantités d'eau en excès favorisant des processus anaérobies. La conductivité hydraulique saturée est significativement plus faible

à 40 cm de profondeur dans les sols cultivés par rapport aux témoins et inférieure au seuil de 10 cm/jour, indiquant une circulation réduite de l'eau. La structure des sols cultivés semble légèrement dégradée : la proportion des agrégats dont le diamètre est compris entre 0,25 et 4 mm est plus faible par rapport aux témoins. Toutefois, la proportion d'agrégats supérieurs à 4 mm et le DMP ne sont pas significativement différents entre sols cultivés et témoins.

Tableau 110 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 8-B (Sainte-Brigide et Raimbault).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
Nombre d'observations	32	16	31	15	32	16
Sable (%)	57	65	58	65	53	59
Limon (%)	28	21	28	20	33	27
Argile (%)	15	14	14	15	14	14
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,44	1,25	1,57	1,41	1,82	1,79
Porosité totale (cm ³ /cm ³)	0,443	0,511	0,404	0,451	0,320	0,332
Macroporosité (cm ³ /cm ³)	0,107	0,185	0,083	0,151	0,062	0,098
Teneur en air au champ (cm ³ /cm ³)	0,096	0,219	0,080	0,176	0,064	0,119
Tortuosité des pores τ (—)	1,584	1,454	1,689	1,566	1,990	1,950
Diffusivité relative des gaz D/D0 (—)	0,003	0,018	0,002	0,010	0,001	0,005
Capacité au champ relative (—)	0,758	0,640	0,794	0,670	0,808	0,700
K _{sat} (cm/jour)			27,0	26,8	5,3	40,8
Diamètre moyen pondéré des agrégats (mm)	2,59	3,00				
Agrégats 4-8mm (%)	36,0	37,2				
Agrégats 2-4mm (%)	10,8	16,5				
Agrégats 1-2mm (%)	4,1	10,6				
Agrégats 0,5-1mm (%)	3,4	7,6				
Agrégats 0,25-0,5mm (%)	1,9	3,9				

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

K_{sat} : Conductivité hydraulique saturée mesurée à 15 cm (Ap2) et 40 cm de profondeur (B).

Les pertes de sol par érosion indiquées par le mouvement net de sol au Tableau 111 ne sont pas significativement différentes entre sols cultivés et témoins, mais dans les deux cas, elles dépassent le seuil d'érosion de 6 t/ha/an tolérable pour la plupart des sols au Canada.

Tableau 111 : Bilans de masse des sols du groupe 8-B (Sainte-Brigide et Raimbault).

Descripteurs	Cultivé	Témoin
Profondeur (cm)	48	45
Mouvement net de sol (t/ha)	-7,3	-11,0
C _{total} (t/ha)	83	91
C _{M3} (kg/ha)	20	8
K _{M3} (kg/ha)	453	352
P _{M3} (kg/ha)	600	240
Zn _{M3} (kg/ha)	25,4	10,0

Les valeurs en gras indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$ entre sols cultivés et témoins.

Profondeur : correspond à la profondeur de l'horizon Ap plus 15 cm dans le B.

La teneur en matière organique est significativement plus faible dans les horizons Ap1 et Ap2 des sols cultivés par rapport aux témoins (Tableau 112). Dans les sols témoins, la teneur en matière organique est d'un niveau moyen dans les horizons Ap1 et Ap2. Dans les sols cultivés, elle est faible dans les deux horizons Ap. Dans l'Ap1, cet appauvrissement en matière organique des sols cultivés par rapport aux témoins s'accompagne d'une plus faible

teneur en carbone actif par rapport aux témoins. Les quantités de CO₂ dégagées et de N minéralisé après une incubation de 14 jours sont significativement plus faibles dans les horizons Ap1 des sols cultivés, indiquant des sources de C et de N moins disponibles et une activité biologique plus faible par rapport aux sols témoins.

Tableau 112 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 8-B (Sainte-Brigide et Raimbault).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
M.O. (%)	2,68	3,57	2,44	3,26	0,55	0,59
C total (%)	1,55	2,07	1,41	1,89	0,32	0,34
N organique (mg/kg)	1 213	1 524	1 085	1 303	378	276
Ratio C/N	12,2	14,2	12,4	14,2	9,1	11,9
C actif (mg/kg)	495	513	431	423	93	75
Ratio C actif/C total (mg/g)	32,5	24,6	30,7	21,9	28,4	23,6
CO ₂ dégagé 14 jours (mg/kg)	359	503	295	374	95	74
N minéralisé 14 jours (mg/kg)	36,2	54,1	30,1	40,7	2,8	1,7
Ratio N minéralisé/N org. (mg/g)	30,0	37,3	28,7	31,5	8,0	5,8

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

M.O. : matière organique du sol estimée avec C total Leco et un facteur de 1,724.

N organique : N total Leco moins N minéral.

Ratio C/N : C total Leco divisé par N total Leco.

Les sols cultivés ont un pH neutre dans les trois horizons, alors que les témoins sont faiblement acides (Tableau 113). La teneur en P est significativement plus élevée dans les trois horizons des sols cultivés par rapport aux témoins, avec un niveau élevé dans l'Ap1 et moyen dans l'Ap2. L'indice de saturation en P de ces sols cultivés est à la limite de la valeur critique environnementale de 15 % dans l'Ap1 et légèrement en-dessous dans l'Ap2.

Les sols cultivés ont une teneur en Na plus élevée que les témoins dans les horizons Ap1 et Ap2. Toutefois, le niveau de Na dans les sols demeure très faible. Le niveau des autres bases échangeables est faible dans les sols cultivés et dans les témoins. La teneur en Zn et en Cu des sols cultivés est plus élevée que celle dans les témoins dans les horizons Ap1 et Ap2, avec des niveaux variant de moyens à élevés. La teneur en Mn des sols cultivés est moyenne dans l'Ap1 et faible dans l'Ap2. Elle est faible dans les témoins dans les trois horizons.

Tableau 113 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 8-B (Sainte-Brigide et Raimbault).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
pH	6,6	6,1	6,8	6,1	7,3	6,4
pH _{SMP}	7,0	6,8	7,0	6,8	7,3	7,1
P _{M3} (mg/kg)	108,6	55,8	89,2	44,5	8,9	4,4
Al _{M3} (mg/kg)	697,1	693,1	658,4	715,2	523,3	568,4
Fe _{M3} (mg/kg)	329,9	209,7	310,5	203,9	189,1	143,9
ISP (%)	15,3	7,7	13,3	5,7	1,3	0,8
Mn _{M3} (mg/kg)	54,2	33,5	48,7	26,9	67,8	41,4
B _{M3} (mg/kg)	0,41	0,30	0,36	0,25	0,10	0,05
Cu _{M3} (mg/kg)	3,31	1,54	2,72	1,49	0,99	0,68
Zn _{M3} (mg/kg)	5,21	2,23	3,50	1,68	1,18	0,72
K _{M3} (cmol/kg)	0,198	0,186	0,148	0,115	0,085	0,068
Na _{M3} (cmol/kg)	0,034	0,021	0,040	0,022	0,046	0,032
Ca _{M3} (cmol/kg)	7,6	5,9	7,9	5,2	6,9	4,8
Mg _{M3} (cmol/kg)	0,82	0,72	0,69	0,65	0,76	0,94
(K+Na)/(Ca+Mg)	0,030	0,035	0,023	0,026	0,016	0,020
CEC (cmol/kg)	13,6	14,5	13,2	14,0	10,0	8,9
Sat. bases (%)	67,1	50,0	69,7	46,2	80,0	63,8

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

ISP : indice de saturation en phosphore.

CEC : capacité d'échange cationique.

M3 : extrait Mehlich-3.

Niveau d'interprétation (sauf Fe, B, ISP et (K+Na)/(Ca+Mg))

Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
-------------	--------	-------	-------	------------

Synthèse de l'état de santé des sols du groupe 8-B (Sainte-Brigide et Raimbault).

Problèmes de dégradation observés dans les sols cultivés

- Les sols sont plus compacts dans les horizons Ap1 et Ap2.
- L'aération et les conditions pour les échanges gazeux sont limitantes dans les horizons Ap2 et B.
- Les quantités d'eau en excès favorisent des processus anaérobies dans les trois horizons.
- La circulation de l'eau est réduite à 15 et 40 cm de profondeur.
- La structure est dégradée dans l'horizon Ap1.
- L'érosion de sols dépassent le seuil de 6 t/ha/an.
- La teneur en matière organique est faible et la teneur en C est sous le seuil critique de 2 % dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La respiration et la quantité d'azote minéralisable sont faibles dans les trois horizons.
- La teneur en P et l'indice de saturation en P sont plus élevées dans les horizons Ap1 et Ap2 et l'ISP dépasse le seuil de 15 %. Le bilan de masse de P apparaît plus élevé dans le profil.
- Les teneurs en Cu, Zn et Na sont plus élevées dans les horizons Ap1 et Ap2.

Groupe 16 : Séries Mawcook, Norbertville, Woodbridge et Sainte-Marie

Les séries Mawcook, Norbertville, Woodbridge et Sainte-Marie se sont développées sur des tills loameux-grossier à squelettique-loameux (plus de 35 % de fragments grossiers en volume), acide sauf pour le Norbertville qui ne devient pas squelettique. Le drainage naturel de ces sols varie entre mauvais et imparfait, comparativement aux sols du groupe 17 qui sont mieux drainés naturellement. Ces séries sont situées dans les régions pédologiques des Basses et moyennes collines des Appalaches orientales, des Hautes terrasses du Saint-Laurent et des Monts Sutton.

Tableau 114 : Caractéristiques des sols du groupe 16 (Mawcook, Norbertville, Woodbridge et Sainte-Marie).

Caractéristiques	Mawcook (MWO)	Norbertville (NBV)	Woodbridge (WOI)	Sainte-Marie (STE)
Granulométrie du matériau, réaction	Loameux-grossier à squelettique-loameux, acide	Loameux-grossier, acide	Loameux-grossier à squelettique-loameux, acide	Loameux-grossier à squelettique-loameux, acide
Type de dépôt	Till (glaciaire)	Till (glaciaire)	Till (glaciaire)	Till (glaciaire)
Classe de drainage	Mauvais	Mauvais	Imparfait	Mauvais
Groupe hydrologique	C	C	C	C
Taxonomie (sous-groupe)	Gleysol humique orthique	Gleysol orthique	Brunisol dystrique éluvié gleyifié	Gleysol orthique
Superficie cartographiée (ha)	51 882	6 069	83 230	65 614

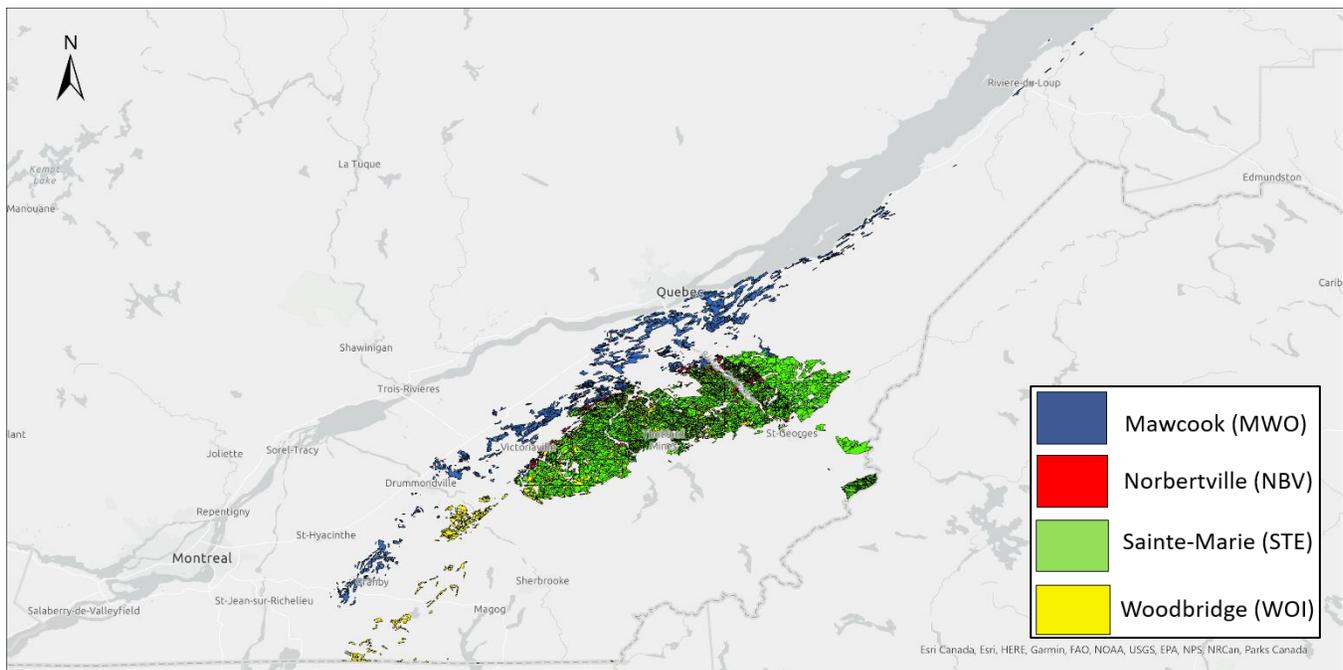


Figure 28 : Répartition géographique des sols du groupe 16 (Mawcook, Norbertville, Woodbridge et Sainte-Marie).

Une augmentation significative de la masse volumique apparente et une diminution significative de la porosité totale des horizons Ap1 et Ap2 des sols cultivés indiquent qu'ils sont plus compacts par rapport aux sols témoins (Tableau 115). Les sols cultivés ont une plus faible macroporosité que les témoins dans l'horizon Ap2. La tortuosité des pores significativement plus élevée dans les horizons Ap1 et Ap2 de même que la diffusivité relative des gaz plus faible et inférieure à 0,005 dans l'horizon Ap2 des sols cultivés indiquent aussi des conditions limitantes pour les échanges gazeux par rapport aux sols témoins. La capacité au champ relative est à la limite supérieure de 0,7 dans tous les sols indiquant des conditions favorisant des processus anaérobies d'ordre naturel. La conductivité hydraulique saturée n'est pas significativement différente entre les sols cultivés et témoins. La proportion des agrégats dont le diamètre est compris entre 1 et 4 mm est plus faible dans les sols cultivés que dans les témoins. Toutefois, la proportion d'agrégats supérieurs à 4 mm et le DMP ne sont pas significativement différents entre sols cultivés et témoins.

Tableau 115 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 16 (Mawcook, Norbertville, Woodbridge et Sainte-Marie).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
Nombre d'observations	64	30	58	26	64	30
Sable (%)	53	51	55	56	56	57
Limon (%)	30	31	29	28	30	29
Argile (%)	17	18	16	16	14	14
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,23	0,98	1,36	1,22	1,58	1,52
Porosité totale (cm ³ /cm ³)	0,526	0,590	0,479	0,535	0,397	0,424
Macroporosité (cm ³ /cm ³)	0,133	0,162	0,115	0,152	0,113	0,117
Teneur en air au champ (cm ³ /cm ³)	0,137	0,166	0,121	0,159	0,110	0,123
Tortuosité des pores τ (—)	1,428	1,338	1,507	1,408	1,737	1,679
Diffusivité relative des gaz D/D0 (—)	0,006	0,008	0,004	0,007	0,006	0,006
Capacité au champ relative (—)	0,748	0,719	0,759	0,712	0,714	0,718
K _{sat} (cm/jour)			14,1	26,9	16,1	12,2
Diamètre moyen pondéré des agrégats (mm)	3,17	3,13				
Agrégats 4-8mm (%)	41,2	38,1				
Agrégats 2-4mm (%)	16,5	19,8				
Agrégats 1-2mm (%)	9,5	12,3				
Agrégats 0,5-1mm (%)	5,7	6,4				
Agrégats 0,25-0,5mm (%)	3,0	2,8				

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

K_{sat} : Conductivité hydraulique saturée mesurée à 15 cm (Ap2) et 40 cm de profondeur (B).

Les pertes de sol par érosion indiquées par le mouvement net de sol au Tableau 116 ne sont pas significativement différentes entre sols cultivés et témoins, mais dans les deux cas, elles dépassent le seuil d'érosion de 6 t/ha/an, toléré pour la plupart des sols au Canada.

La teneur en matière organique n'est pas significativement différente entre sols cultivés et témoins du groupe 16 (Tableau 117). Elle est de niveau élevé dans l'Ap1 et modéré dans l'Ap2. La teneur en azote organique est plus faible et celle du ratio carbone actif sur C total est plus élevée dans l'horizon Ap1 des sols cultivés, tandis que les quantités de CO₂ dégagées et de N minéralisé après une incubation de 14 jours sont significativement plus faibles dans le même horizon des sols cultivés.

Les sols cultivés sont faiblement acides sur tout le profil, alors que le pH des sols témoins varie de fortement acide (Ap1) à moyennement acide (Ap2 et B; Tableau 118). La teneur en P est significativement plus élevée dans les trois horizons des sols cultivés par rapport aux témoins, avec un niveau élevé dans l'Ap1 et moyen dans l'Ap2 (Tableau 118). Le bilan de masse de P est aussi significativement plus élevé dans les sols cultivés (Tableau 116). Dans les sols témoins, le niveau de P est faible dans les horizons Ap1 et Ap2. L'indice de saturation en P de ces sols cultivés est plus élevé que celui des témoins mais demeure sous le seuil critique agroenvironnemental de 15 %.

Tableau 116 : Bilans de masse des sols du groupe 16 (Mawcook, Norbertville, Woodbridge et Sainte-Marie).

Descripteurs	Cultivé	Témoin
Profondeur (cm)	39	39
Mouvement net de sol (t/ha)	-8,4	-7,6
C _{total} (t/ha)	102	109
Cu _{M3} (kg/ha)	19	10
K _{M3} (kg/ha)	381	267
P _{M3} (kg/ha)	399	168
Zn _{M3} (kg/ha)	24,6	15,1

Les valeurs en gras indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10 entre sols cultivés et témoins.
Profondeur : correspond à la profondeur de l'horizon Ap plus 15 cm dans le B.

Tableau 117 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 16 (Mawcook, Norbertville, Woodbridge et Sainte-Marie).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
M.O. (%)	4,80	5,63	3,86	3,84	2,04	1,74
C total (%)	2,78	3,26	2,24	2,23	1,18	1,01
N organique (mg/kg)	2 347	2 862	1 873	1 985	968	1 035
Ratio C/N	11,6	11,9	11,8	11,7	11,8	11,8
C actif (mg/kg)	602	709	442	466	230	223
Ratio C actif/C total (mg/g)	22,5	19,2	20,4	19,3	19,0	21,0
CO ₂ dégagé 14 jours (mg/kg)	666	997	403	514	188	210
N minéralisé 14 jours (mg/kg)	80,6	105,6	47,7	54,2	17,7	20,5
Ratio N minéralisé/N org. (mg/g)	35,2	36,0	26,8	28,0	17,7	17,4

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

M.O. : matière organique du sol estimée avec C total Leco et un facteur de 1,724.

N organique : N total Leco moins N minéral.

Ratio C/N : C total Leco divisé par N total Leco.

La saturation en bases des sols cultivés est significativement plus élevée que celle des témoins dans les horizons Ap1 et Ap2, principalement en raison de leur teneur plus élevée en Na, Ca et Mg (Tableau 118). Toutefois, les niveaux de Na, Ca et de Mg demeurent faibles ou très faibles. Le niveau du K des sols cultivés est moyen dans l'Ap1 et faible dans l'Ap2. Les sols cultivés ont une teneur en B significativement plus élevée que celle des sols témoins dans les trois horizons. Les teneurs en Cu dans l'Ap1 et l'Ap2, et en Zn dans l'Ap2 des sols cultivés sont aussi plus élevées par rapport celles des témoins, avec des niveaux élevés dans l'Ap1 et l'Ap2. Le bilan de masse de Cu est aussi significativement plus élevé dans les sols cultivés, soit près de deux fois plus que dans les sols témoins (Tableau 116). La teneur en Mn des sols cultivés est moyenne dans l'Ap1 et faible dans l'Ap2. Les bilans de masse de Cu et de Zn sont près de deux fois plus élevés dans les sols cultivés par rapport aux témoins (Tableau 116).

Tableau 118 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 16 (Mawcook, Norbertville, Woodbridge et Sainte-Marie).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
pH	6,1	5,5	6,2	5,6	6,3	5,8
pH _{SMP}	6,5	6,1	6,6	6,2	6,7	6,5
P _{M3} (mg/kg)	109,0	51,0	74,2	36,9	36,4	18,0
Al _{M3} (mg/kg)	1 027,8	1 073,4	1 055,7	1 148,2	1 097,8	1 032,4
Fe _{M3} (mg/kg)	263,4	257,0	240,1	225,5	196,9	188,6
ISP (%)	11,2	4,9	7,3	3,6	3,3	1,7
Mn _{M3} (mg/kg)	68,8	74,8	57,5	48,1	44,8	52,7
B _{M3} (mg/kg)	0,32	0,16	0,22	0,11	0,11	0,06
Cu _{M3} (mg/kg)	5,33	2,87	3,56	1,85	1,86	1,34
Zn _{M3} (mg/kg)	7,62	5,24	4,44	2,71	2,28	1,70
K _{M3} (cmol/kg)	0,264	0,215	0,152	0,132	0,102	0,092
Na _{M3} (cmol/kg)	0,053	0,035	0,049	0,033	0,041	0,035
Ca _{M3} (cmol/kg)	6,8	4,7	5,8	3,6	3,4	2,4
Mg _{M3} (cmol/kg)	0,84	0,59	0,62	0,40	0,40	0,34
(K+Na)/(Ca+Mg)	0,046	0,051	0,034	0,050	0,043	0,054
CEC (cmol/kg)	17,2	19,6	15,5	16,9	11,7	12,3
Sat. bases (%)	49,0	31,2	45,4	27,6	36,6	28,1

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

ISP : indice de saturation en phosphore.

CEC : capacité d'échange cationique.

M3 : extrait Mehlich-3.

Niveau d'interprétation (sauf Fe, B, ISP et (K+Na)/(Ca+Mg))

Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
-------------	--------	-------	-------	------------

Synthèse de l'état de santé des sols du groupe 16 (Mawcook, Norbertville, Woodbridge et Sainte-Marie).

Problèmes de dégradation observés dans les sols cultivés

- Les sols sont plus compacts dans les horizons Ap1 et Ap2.
- L'aération et les conditions pour les échanges gazeux sont limitantes dans l'horizon Ap2.
- Les quantités d'eau en excès favorisent des processus anaérobies dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La structure est dégradée dans l'horizon Ap1.
- L'érosion de sols dépassent le seuil de 6 t/ha/an.
- La teneur en matière organique est modérée à élevée et la teneur en C dépasse le seuil critique de 2 % dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La respiration et la quantité d'azote minéralisable sont plus faibles dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La teneur en P et l'indice de saturation en P sont plus élevées dans les trois horizons, mais l'ISP ne dépasse pas le seuil de 15 %.
- Les teneurs en B et Ca sont plus élevées dans les trois horizons.
- Les teneurs en Cu et Na sont plus élevées dans les horizons Ap1 et Ap2.
- Les bilans de masse indiquent un enrichissement en P, Cu et Zn dans le profil.

Groupe 17 : Séries Shefford et Blandford

Les séries Shefford et Blandford se sont développées sur des tills loameux-grossiers à squelettiques-loameux et acides. Ils ont un bon drainage naturel, comparativement aux sols du groupe 16. Ces séries sont situées dans les régions pédologiques des Hautes-terrasses du Saint-Laurent et des Monts Sutton.

Tableau 119 : Caractéristiques des sols du groupe 17 (Shefford et Blandford).

Caractéristiques	Shefford (SHF)	Blandford (BLF)
Granulométrie du matériau, réaction	Squelettique-loameux, acide	Loameux-grossier à squelettique-loameux, acide
Type de dépôt	Till (glaciaire)	Till (glaciaire)
Classe de drainage	Bon	Bon à modérément bon
Groupe hydrologique	B	B
Taxonomie (sous-groupe)	Brunisol dystrique orthique	Brunisol dystrique éluvié
Superficie cartographiée (ha)	25 316	106 353

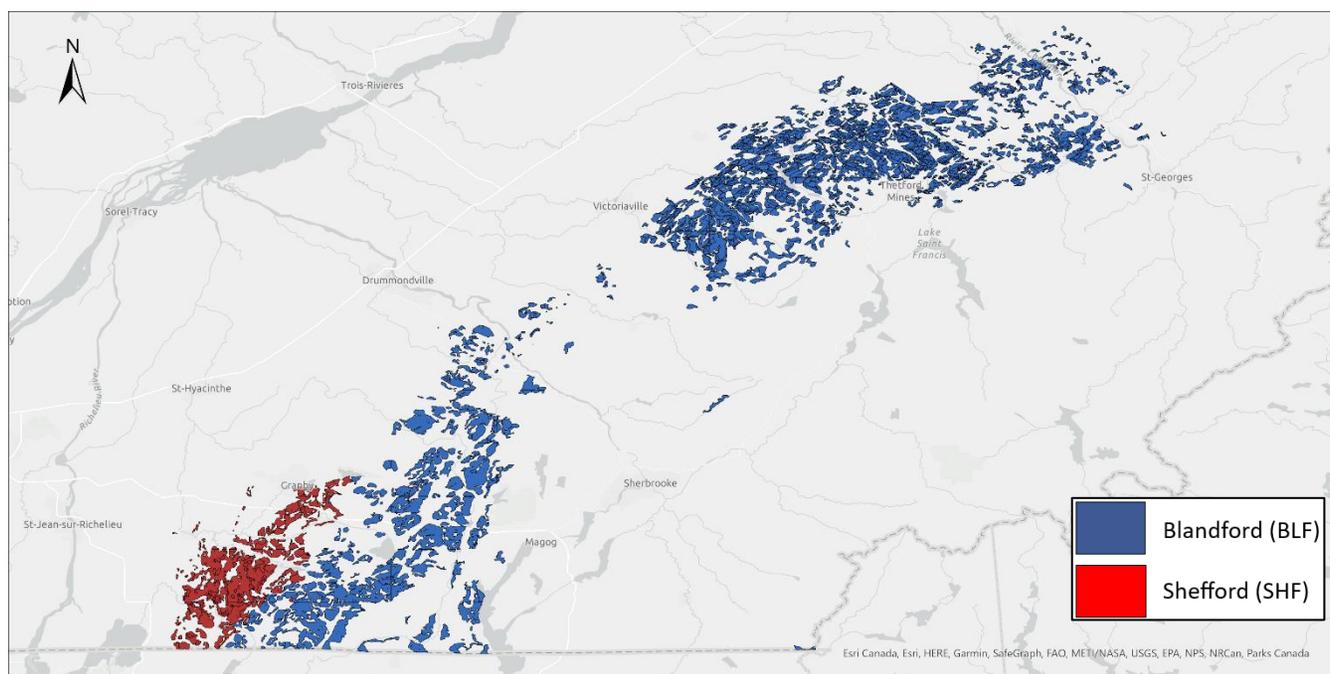


Figure 29 : Répartition géographique des sols du groupe 17 (Shefford et Blandford).

La masse volumique apparente de l'horizon Ap1 des sols cultivés est significativement plus élevée que dans les témoins, mais demeure acceptable en étant inférieure à $1,2 \text{ g/cm}^3$ (Tableau 120). Les autres propriétés physiques n'indiquent pas de dégradation apparente des sols cultivés.

Tableau 120 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 17 (Shefford et Blandford).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
Nombre d'observations	32	16	29	16	32	16
Sable (%)	56	45	56	48	63	55
Limon (%)	28	37	28	36	24	32
Argile (%)	16	18	16	16	13	13
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,19	1,06	1,26	1,19	1,32	1,27
Porosité totale (cm ³ /cm ³)	0,534	0,577	0,516	0,535	0,494	0,522
Macroporosité (cm ³ /cm ³)	0,180	0,161	0,178	0,174	0,179	0,172
Teneur en air au champ (cm ³ /cm ³)	0,207	0,162	0,203	0,185	0,200	0,165
Tortuosité des pores τ (—)	1,414	1,347	1,442	1,406	1,480	1,449
Diffusivité relative des gaz D/D0 (—)	0,015	0,008	0,013	0,012	0,016	0,012
Capacité au champ relative (—)	0,664	0,716	0,653	0,671	0,622	0,674
K _{sat} (cm/jour)			36,9	66,7	55,4	30,0
Diamètre moyen pondéré des agrégats (mm)	2,78	2,73				
Agrégats 4-8mm (%)	32,4	30,0				
Agrégats 2-4mm (%)	18,3	20,2				
Agrégats 1-2mm (%)	13,0	16,5				
Agrégats 0,5-1mm (%)	9,4	10,7				
Agrégats 0,25-0,5mm (%)	5,6	5,3				

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

K_{sat} : Conductivité hydraulique saturée mesurée à 15 cm (Ap2) et 40 cm de profondeur (B).

Les pertes de sol par érosion indiquées par le mouvement net de sol au Tableau 121 ne sont pas significativement différentes entre sols cultivés et témoins, mais dans le cas des sols témoins, elles dépassent légèrement le seuil d'érosion de 6 t/ha/an tolérable pour la plupart des sols au Canada.

Tableau 121 : Bilans de masse des sols du groupe 17 (Shefford et Blandford).

Descripteurs	Cultivé	Témoin
Profondeur (cm)	41	41
Mouvement net de sol (t/ha)	-5,3	-6,8
C _{total} (t/ha)	111	117
Cu _{M3} (kg/ha)	15	9
K _{M3} (kg/ha)	594	232
P _{M3} (kg/ha)	333	104
Zn _{M3} (kg/ha)	24,0	17,4

Les valeurs en gras indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$ entre sols cultivés et témoins.

Profondeur : correspond à la profondeur de l'horizon Ap plus 15 cm dans le B.

La teneur en matière organique tend à être plus faible dans les trois horizons des sols cultivés par rapport aux témoins, avec une différence significative dans l'horizon Ap1 (Tableau 122). Dans les sols témoins, la teneur en matière organique est d'un niveau très élevé dans l'horizon Ap1 et élevé dans l'Ap2. Dans les sols cultivés, elle est élevée dans l'Ap1 et modérée dans l'Ap2. Les quantités de CO₂ dégagées et de N minéralisé après une incubation de 14 jours sont significativement plus faibles dans l'horizon Ap1 des sols cultivés.

Tableau 122 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 17 (Shefford et Blandford).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
M.O. (%)	5,17	6,58	3,89	4,53	1,90	2,27
C total (%)	3,00	3,81	2,26	2,62	1,10	1,32
N organique (mg/kg)	3 000	3 421	2 245	2 317	1 103	1 233
Ratio C/N	10,9	11,1	10,7	11,2	10,5	11,0
C actif (mg/kg)	653	716	464	488	236	243
Ratio C actif/C total (mg/g)	19,8	18,9	19,5	18,3	18,5	18,6
CO₂ dégagé 14 jours (mg/kg)	691	976	399	519	170	179
N minéralisé 14 jours (mg/kg)	84,5	119,8	47,4	58,4	15,0	18,2
Ratio N minéralisé/N org. (mg/g)	28,7	34,5	21,7	25,9	12,5	13,7

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

M.O. : matière organique du sol estimée avec C total Leco et un facteur de 1,724.

N organique : N total Leco moins N minéral.

Ratio C/N : C total Leco divisé par N total Leco.

Le pH des sols cultivés est généralement plus élevé que celui des témoins dans les trois horizons avec une différence significative dans l'horizon Ap1 (Tableau 123). Toutefois, les sols cultivés demeurent moyennement (Ap1 et Ap2) ou faiblement acides (horizon B). Quant aux témoins, leurs niveaux de pH varient de fortement à faiblement acides.

La teneur en P est significativement plus élevée dans les trois horizons des sols cultivés par rapport aux témoins, avec un niveau élevé dans l'Ap1 et moyen dans l'Ap2. Dans les sols témoins, le niveau de P est faible dans l'Ap1 et très faible dans l'Ap2. L'indice de saturation en P de ces sols cultivés est plus élevé que celui des témoins dans l'Ap1 et l'Ap2, mais demeure en-dessous de la valeur critique agroenvironnementale de 15 %. La teneur en bases échangeables des sols cultivés est d'un niveau moyen dans l'Ap1 et faible dans l'Ap2 pour le K, faible pour le Ca et le Mg, et très faible pour le Na. Dans les témoins, le niveau des bases échangeables varie de faible à très faible selon l'élément et l'horizon. Les sols cultivés ont des teneurs plus élevées en Cu dans l'horizon Ap1 par rapport aux témoins (Tableau 123). Le niveau du Cu dans les sols cultivés est élevé dans les horizons Ap1 et Ap2, et faible dans le B. Dans les témoins, il est moyen dans l'Ap1 et l'Ap2, et très faible dans le B. Pour les autres éléments mineurs, les teneurs dans les sols cultivés varient de niveaux élevés (Ap1 et Ap2) à faible (horizon B) pour le Zn, et de faible (Ap1 et Ap2) à très faible pour le Mn. Les bilans de masse de P, K et Cu sont près de deux fois plus élevés dans les sols cultivés par rapport aux témoins, mais demeure en deçà du seuil du 500 kg/ha pour le P (Tableau 121).

Tableau 123 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 17 (Shefford et Blandford).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
pH	6,0	5,5	5,9	5,6	6,2	5,9
pH _{SMP}	6,3	6,0	6,3	6,1	6,5	6,4
P _{M3} (mg/kg)	112,7	33,8	67,4	17,7	20,8	10,7
Al _{M3} (mg/kg)	1 180,1	1 214,0	1 246,7	1 290,2	1 325,9	1 326,3
Fe _{M3} (mg/kg)	218,6	207,0	197,9	191,1	158,5	182,4
ISP (%)	9,5	2,7	5,3	1,5	1,5	0,8
Mn _{M3} (mg/kg)	46,9	58,0	35,1	45,2	19,1	30,2
B _{M3} (mg/kg)	0,33	0,28	0,22	0,18	0,11	0,09
Cu _{M3} (mg/kg)	4,45	2,60	3,10	2,01	1,18	0,91
Zn _{M3} (mg/kg)	7,75	6,42	4,25	2,98	1,50	1,25
K _{M3} (cmol/kg)	0,413	0,241	0,229	0,100	0,117	0,064
Na _{M3} (cmol/kg)	0,028	0,028	0,024	0,027	0,019	0,023
Ca _{M3} (cmol/kg)	6,6	4,5	5,0	3,4	3,1	1,9
Mg _{M3} (cmol/kg)	1,09	0,60	0,70	0,26	0,40	0,14
(K+Na)/(Ca+Mg)	0,059	0,051	0,051	0,042	0,048	0,055
CEC (cmol/kg)	19,3	21,0	17,4	17,7	13,0	13,0
Sat. bases (%)	44,1	26,5	35,9	23,7	30,0	20,7

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

ISP : indice de saturation en phosphore.

CEC : capacité d'échange cationique.

M3 : extrait Mehlich-3.

Niveau d'interprétation (sauf Fe, B, ISP et (K+Na)/(Ca+Mg))

Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
-------------	--------	-------	-------	------------

Synthèse de l'état de santé des sols du groupe 17 (Shefford et Blandford).

Problèmes de dégradation observés dans les sols cultivés

- Les sols sont légèrement plus compacts dans l'horizons Ap1.
- L'aération et les conditions pour les échanges gazeux ne sont pas limitantes.
- La capacité de rétention en eau n'est pas limitée.
- La structure n'est pas dégradée.
- La teneur en matière organique est modérée à élevée et la teneur en C dépasse le seuil critique de 2 % dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La respiration et la quantité d'azote minéralisable sont plus faibles dans l'horizon Ap1.
- La teneur en P et l'indice de saturation en P sont plus élevées dans les trois horizons, mais l'ISP ne dépasse pas le seuil de 15 %.
- La teneur en Mg est plus élevée dans les trois horizons.
- La teneur en K est plus élevée dans les horizons Ap2 et B.
- La teneur en Cu est plus élevée dans l'horizon Ap1.
- Les bilans de masse indiquent un enrichissement en P et Cu dans le profil.

Groupe 18 : Séries Leeds, Chapais et Charlevoix

Les séries Leeds, Chapais et Charlevoix se sont développées sur des tills loameux-grossiers à squelettiques-loameux et acides. Ils ont un bon drainage naturel. Ces séries sont situées dans les régions pédologiques des Basses et moyennes collines des Appalaches orientales et des Hautes-terres des Laurentides.

Tableau 124 : Caractéristiques des sols du groupe 18 (Leeds, Chapais, Charlevoix).

Caractéristiques	Leeds (LED)	Chapais (CHP)	Charlevoix (CVX)
Granulométrie du matériau, réaction	Loameux-grossier à squelettique-loameux, acide	Squelettique-loameux, acide	Loameux-grossier à squelettique-loameux, acide
Type de dépôt	Till (glaciaire)	Till (glaciaire)	Till (glaciaire)
Classe de drainage	Bon	Bon	Bon
Groupe hydrologique	C	C	B
Taxonomie (sous-groupe)	Podzol humo-ferrique fragique	Podzol humo-ferrique fragique	Podzol humo-ferrique fragique
Superficie cartographiée (ha)	83 890	178 931	42 202

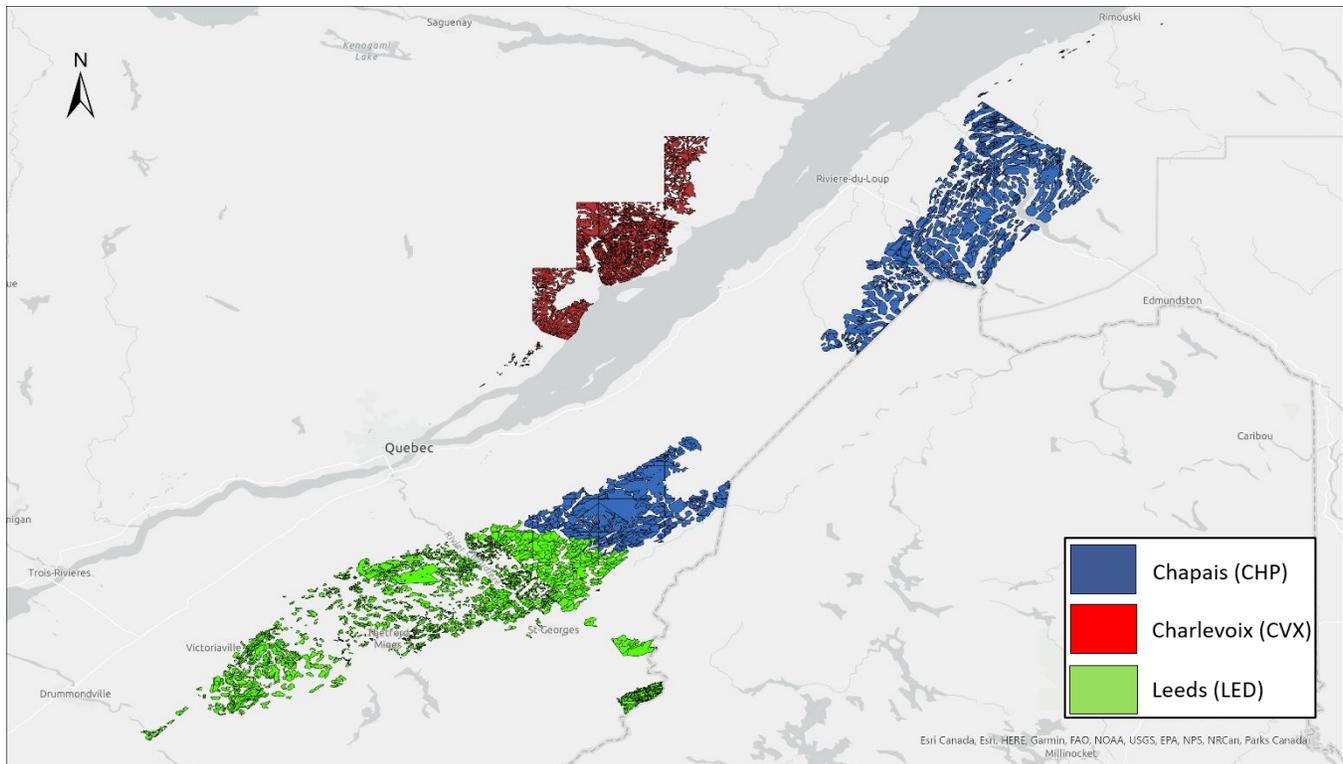


Figure 30 : Répartition géographique des sols du groupe 18 (Leeds, Chapais, Charlevoix).

Les sols cultivés ne manifestent pas de modifications significatives de leurs propriétés physiques par rapport aux témoins (Tableau 125).

Tableau 125 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 18 (Leeds, Chapais, Charlevoix).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
Nombre d'observations	48	24	32	15	48	24
Sable (%)	51	50	52	53	56	56
Limon (%)	32	31	31	32	28	28
Argile (%)	17	19	17	15	16	16
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,04	1,02	1,14	1,14	1,20	1,22
Porosité totale (cm ³ /cm ³)	0,591	0,602	0,548	0,547	0,529	0,529
Macroporosité (cm ³ /cm ³)	0,173	0,185	0,142	0,167	0,153	0,166
Teneur en air au champ (cm ³ /cm ³)	0,215	0,238	0,174	0,204	0,189	0,195
Tortuosité des pores τ (—)	1,331	1,319	1,388	1,390	1,422	1,419
Diffusivité relative des gaz D/D0 (—)	0,010	0,012	0,006	0,010	0,009	0,011
Capacité au champ relative (—)	0,705	0,699	0,741	0,697	0,707	0,681
K _{sat} (cm/jour)			46,5	60,4	45,2	63,1
Diamètre moyen pondéré des agrégats (mm)	2,59	2,74				
Agrégats 4-8mm (%)	26,6	30,3				
Agrégats 2-4mm (%)	19,4	20,3				
Agrégats 1-2mm (%)	15,7	15,6				
Agrégats 0,5-1mm (%)	10,4	9,8				
Agrégats 0,25-0,5mm (%)	5,7	5,3				

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

K_{sat} : Conductivité hydraulique saturée mesurée à 15 cm (Ap2) et 40 cm de profondeur (B).

Les pertes de sol par érosion indiquées par le mouvement net de sol au Tableau 126 ne sont pas significativement différentes entre sols cultivés et témoins, mais dans le cas des sols témoins, elles dépassent légèrement le seuil d'érosion de 6 t/ha/an tolérable pour la plupart des sols au Canada.

Tableau 126 : Bilans de masse des sols du groupe 18 (Leeds, Chapais, Charlevoix).

Descripteurs	Cultivé	Témoin
Profondeur (cm)	34	32
Mouvement net de sol (t/ha)	-4,3	-8,3
C _{total} (t/ha)	112	115
C _{UM3} (kg/ha)	6	4
K _{M3} (kg/ha)	308	210
P _{M3} (kg/ha)	114	66
Zn _{M3} (kg/ha)	18,1	13,5

Les valeurs en gras indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$ entre sols cultivés et témoins.

Profondeur : correspond à la profondeur de l'horizon Ap plus 15 cm dans le B.

La teneur en matière organique n'est pas significativement différente entre les sols cultivés et les sols témoins (Tableau 127). Elle est de niveau très élevé dans l'Ap1 et élevée dans l'Ap2. Les quantités de CO₂ dégagées et d'azote minéralisable après une incubation de 14 jours sont significativement élevées autant dans les horizons Ap1

et Ap2 des sols cultivés que témoins, indiquant des sources de C et de N disponibles et une bonne activité biologique.

Tableau 127 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 18 (Leeds, Chapais, Charlevoix).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
M.O. (%)	7,37	8,27	5,63	6,15	3,83	3,85
C total (%)	4,27	4,79	3,27	3,57	2,22	2,23
N organique (mg/kg)	3 436	3 609	2 499	2 688	1 521	1 641
Ratio C/N	12,4	13,1	13,0	13,3	14,6	14,5
C actif (mg/kg)	871	813	636	546	395	368
Ratio C actif/C total (mg/g)	20,2	17,1	19,1	15,9	18,1	15,5
CO₂ dégagé 14 jours (mg/kg)	938	1 184	517	578	246	302
N minéralisé 14 jours (mg/kg)	110,9	110,2	60,0	62,2	20,8	23,8
Ratio N minéralisé/N org. (mg/g)	32,1	32,6	24,5	24,3	13,4	15,0

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

M.O. : matière organique du sol estimée avec C total Leco et un facteur de 1,724.

N organique : N total Leco moins N minéral.

Ratio C/N : C total Leco divisé par N total Leco.

Le pH des sols cultivés est significativement plus élevé que celui des témoins dans les trois horizons (Tableau 128). Toutefois, les sols cultivés demeurent faiblement (Ap1) ou moyennement acides (horizons Ap2 et B). Quant aux témoins, ils sont moyennement acides dans les trois horizons.

La teneur en P des sols cultivés dont le niveau varie de faible (Ap1 et Ap2) à très faible (B), n'est pas significativement différente de celle des témoins (Tableau 128). Le bilan de masse de P est toute de même deux fois plus élevé dans les sols cultivés, mais demeure bien en deçà du seuil de 500 kg/ha P (Tableau 126). Les sols cultivés ont une capacité de fixation en P plus faible que celle des témoins tel qu'indiquée par leurs teneurs en Al et en Fe. L'indice de saturation en P des sols du groupe 18 se trouve nettement en-dessous de la valeur critique agroenvironnementale de 15 % au-delà de laquelle les recommandations en P ne devraient pas dépasser les exportations par les cultures. La saturation en bases des sols cultivés est significativement plus élevée que celle des témoins dans les trois horizons, principalement en raison de leur teneur plus élevée en Ca et Mg (Tableau 128). Toutefois, les niveaux de Ca, de Mg et de Na demeurent faibles ou très faibles. Le niveau du K des sols cultivés est moyen dans l'Ap1 et faible dans l'Ap2. La teneur en B des sols cultivés est significativement plus élevée que celle des témoins dans les trois horizons. Le niveau des autres éléments mineurs dans les horizons dans les sols cultivés varie de moyen à très faible pour le Cu, d'élevé à faible pour le Zn, et est très faible pour le Mn.

Tableau 128 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 18 (Leeds, Chapais, Charlevoix).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoïn	Cultivé	Témoïn	Cultivé	Témoïn
pH	6,1	5,6	6,0	5,6	6,0	5,7
pH _{SMP}	6,2	5,9	6,2	6,0	6,2	6,1
P _{M3} (mg/kg)	39,5	30,0	22,7	17,9	15,8	12,7
Al _{M3} (mg/kg)	1 411,8	1 501,6	1 536,8	1 576,5	1 780,8	1 834,9
Fe _{M3} (mg/kg)	166,0	230,5	156,6	208,9	105,3	153,3
ISP (%)	3,0	2,1	1,8	1,2	0,8	0,7
Mn _{M3} (mg/kg)	18,9	23,2	14,7	17,1	5,8	8,8
B _{M3} (mg/kg)	0,30	0,17	0,17	0,09	0,09	0,05
Cu _{M3} (mg/kg)	2,26	1,49	1,39	1,05	0,58	0,53
Zn _{M3} (mg/kg)	7,33	5,96	3,71	2,93	1,60	1,31
K _{M3} (cmol/kg)	0,313	0,261	0,153	0,124	0,094	0,074
Na _{M3} (cmol/kg)	0,073	0,061	0,062	0,050	0,050	0,031
Ca _{M3} (cmol/kg)	7,8	5,3	5,8	3,9	3,7	2,3
Mg _{M3} (cmol/kg)	0,98	0,59	0,53	0,32	0,31	0,17
(K+Na)/(Ca+Mg)	0,044	0,055	0,034	0,043	0,036	0,058
CEC (cmol/kg)	22,4	21,2	19,6	19,0	16,4	15,9
Sat. bases (%)	44,9	30,7	36,4	24,4	26,9	16,5

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

ISP : indice de saturation en phosphore.

CEC : capacité d'échange cationique.

M3 : extrait Mehlich-3.

Niveau d'interprétation (sauf Fe, B, ISP et (K+Na)/(Ca+Mg))

Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
-------------	--------	-------	-------	------------

Synthèse de l'état de santé des sols du groupe 18 (Leeds, Chapais, Charlevoix).

Problèmes de dégradation observés dans les sols cultivés

- Les sols ne sont pas compacts.
- L'aération et les conditions pour les échanges gazeux ne sont pas limitantes.
- La capacité de rétention en eau n'est pas limitée.
- La structure n'est pas dégradée.
- La teneur en matière organique est élevée à très élevée et la teneur en C dépasse le seuil critique de 2 % dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La respiration et la quantité d'azote minéralisable ne sont pas affectées.
- Les teneurs en B, Ca et Mg sont plus élevées dans les trois horizons.

Groupe 20 : Séries Magog, Calais et Dufferin

Les séries Magog, Calais et Dufferin se sont développées sur des tills loameux et mal drainés naturellement. Ces séries sont situées dans les régions pédologiques du Bas-plateau de Compton et des Basses et moyennes collines des Appalaches occidentales.

Tableau 129 : Caractéristiques des sols du groupe 20 (Magog, Calais et Dufferin).

Caractéristiques	Magog (MGO)	Calais (CIS)	Dufferin (DFF)
Granulométrie du matériau, réaction	Loameux, acide	Loameux, neutre	Loameux, alcalin
Type de dépôt	Till (glaciaire)	Till (glaciaire)	Till (glaciaire)
Classe de drainage	Mauvais	Mauvais	Mauvais
Groupe hydrologique	C	C	C
Taxonomie (sous-groupe)	Podzol humo-ferrique fragique	Podzol humo-ferrique fragique	Podzol humo-ferrique fragique
Superficie cartographiée (ha)	87 499	118 892	62 311

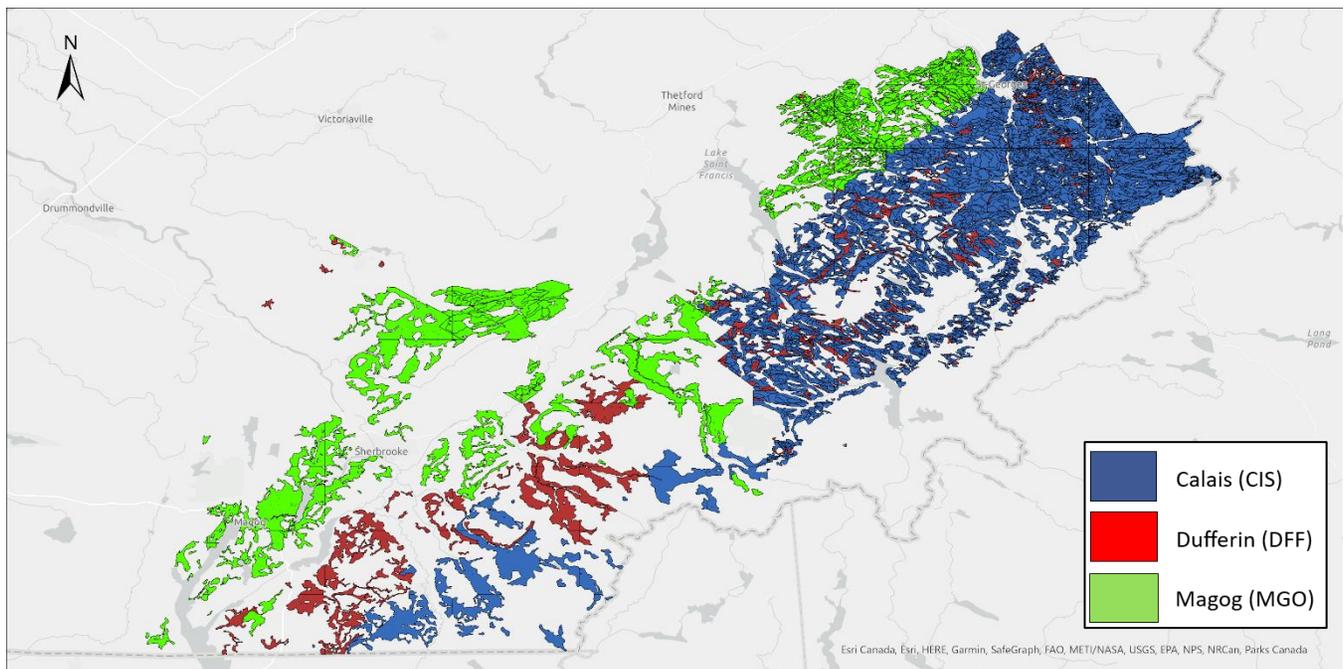


Figure 31 : Répartition géographique des sols du groupe 20 (Magog, Calais et Dufferin).

Une augmentation significative de la masse volumique apparente des horizons Ap1 et Ap2 et une diminution significative de la porosité totale des trois horizons des sols cultivés indiquent qu'ils sont plus compacts par rapport aux sols témoins (Tableau 130). De plus, les sols cultivés ont une plus faible macroporosité que les témoins dans les horizons Ap1 et Ap2. La tortuosité des pores est plus élevée dans les trois horizons des sols cultivés et la diffusivité relative des gaz plus faibles dans les horizons Ap1 et Ap2 indiquent des conditions défavorables aux échanges gazeux. La capacité au champ relative est plus élevée dans l'horizon Ap2 des sols cultivés, mais tous les

horizons dépassent le critère de 0,7 et donc présentent des conditions anoxiques. La conductivité hydraulique saturée n'est pas différente entre sols cultivés et témoins, mais elle est inférieure au seuil de 10 cm/jour à 40 cm de profondeur indiquant une circulation de l'eau réduite. La proportion d'agrégats dont le diamètre est compris entre 1 et 2 mm est plus faible dans les sols cultivés que dans les témoins. Toutefois, la proportion d'agrégats supérieurs à 4 mm et le DMP ne sont pas significativement différents entre sols cultivés et témoins.

Tableau 130 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 20 (Magog, Calais et Dufferin).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
Nombre d'observations	48	24	47	22	48	24
Sable (%)	39	38	40	41	38	41
Limon (%)	45	43	43	41	45	42
Argile (%)	16	19	17	18	17	17
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,19	0,98	1,38	1,16	1,66	1,55
Porosité totale (cm ³ /cm ³)	0,539	0,623	0,479	0,569	0,366	0,434
Macroporosité (cm ³ /cm ³)	0,126	0,165	0,101	0,159	0,077	0,087
Teneur en air au champ (cm ³ /cm ³)	0,120	0,148	0,098	0,153	0,078	0,063
Tortuosité des pores τ (—)	1,419	1,303	1,513	1,376	1,826	1,693
Diffusivité relative des gaz D/D0 (—)	0,004	0,008	0,003	0,009	0,002	0,002
Capacité au champ relative (—)	0,767	0,734	0,780	0,720	0,788	0,798
K _{sat} (cm/jour)			13,4	13,9	3,3	5,7
Diamètre moyen pondéré des agrégats (mm)	2,58	2,74				
Agrégats 4-8mm (%)	32,4	31,6				
Agrégats 2-4mm (%)	15,4	17,5				
Agrégats 1-2mm (%)	8,1	10,7				
Agrégats 0,5-1mm (%)	5,1	6,1				
Agrégats 0,25-0,5mm (%)	2,9	3,0				

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

K_{sat} : Conductivité hydraulique saturée mesurée à 15 cm (Ap2) et 40 cm de profondeur (B).

Les pertes de sol par érosion indiquées par le mouvement net de sol au Tableau 131 ne sont pas significativement différentes entre sols cultivés et témoins, mais dans les deux cas, elles dépassent le seuil d'érosion de 6 t/ha/an tolérable pour la plupart des sols au Canada.

Tableau 131 : Bilans de masse des sols du groupe 20 (Magog, Calais et Dufferin).

Descripteurs	Cultivé	Témoin
Profondeur (cm)	41	40
Mouvement net de sol (t/ha)	-10,7	-8,6
C _{total} (t/ha)	92	107
C _{M3} (kg/ha)	18	7
K _{M3} (kg/ha)	294	246
P _{M3} (kg/ha)	318	99
Zn _{M3} (kg/ha)	22,2	10,3

Les valeurs en gras indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$ entre sols cultivés et témoins.

Profondeur : correspond à la profondeur de l'horizon Ap plus 15 cm dans le B.

La teneur en matière organique est plus faible dans les trois horizons des sols cultivés par rapport aux témoins, avec une différence significative dans les horizons Ap1 et Ap2 (Tableau 132). Dans les sols témoins, la teneur en matière organique est d'un niveau très élevé dans l'horizon Ap1 et élevé dans l'Ap2. Dans les sols cultivés, elle est élevée dans l'Ap1 et modérée dans l'Ap2. Suivant la même tendance, la teneur en azote organique de même que la quantité de N minéralisée après une incubation de 14 jours sont plus faibles dans les horizons Ap1 et Ap2 des sols cultivés. La teneur en carbone actif de même que la quantité de CO₂ dégagée sont plus faibles dans les trois horizons des sols cultivés. Cet appauvrissement en matière organique des sols cultivés exprime une diminution des sources de C et N disponibles et de l'activité biologique dans les sols cultivés du groupe 20 par rapport aux témoins.

Tableau 132 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 20 (Magog, Calais et Dufferin).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
M.O. (%)	4,63	6,57	3,56	5,25	1,14	1,37
C total (%)	2,64	3,81	2,00	3,05	0,66	0,79
N organique (mg/kg)	2 288	3 174	1 774	2 531	698	870
Ratio C/N	11,1	12,2	11,1	12,0	9,5	9,3
C actif (mg/kg)	615	840	442	582	139	203
Ratio C actif/C total (mg/g)	24,4	21,0	22,6	18,9	21,1	23,8
CO ₂ dégagé 14 jours (mg/kg)	611	1 043	366	596	120	166
N minéralisé 14 jours (mg/kg)	75,8	113,8	44,5	60,6	8,0	10,7
Ratio N minéralisé/N org. (mg/g)	33,4	38,4	25,5	23,7	11,3	11,1

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

M.O. : matière organique du sol estimée avec C total Leco et un facteur de 1,724.

N organique : N total Leco moins N minéral.

Ratio C/N : C total Leco divisé par N total Leco.

Le pH des sols cultivés est plus élevé que celui des témoins, avec une différence significative dans les horizons Ap1 et Ap2 (Tableau 133). Toutefois, les sols cultivés demeurent faiblement acides dans les trois horizons. Quant aux témoins, ils sont moyennement (Ap1 et Ap2) ou faiblement acides (horizon B).

La teneur en P est significativement plus élevée dans les trois horizons des sols cultivés par rapport aux témoins (Tableau 133). Le niveau de P dans les sols cultivés demeure toutefois modéré dans l'Ap1 et l'Ap2, et très faible dans le B. L'indice de saturation en P de ces sols cultivés est aussi plus élevé par rapport à celui des témoins, mais demeure sous le seuil critique agroenvironnementale de 11 % (Tableau 133). Les sols cultivés ont une teneur en Na significativement plus élevée que les témoins dans les trois horizons. Toutefois, le niveau de Na dans les sols du groupe 20 demeure très faible. Les niveaux des autres bases échangeables varient de faibles à très faibles selon l'horizon. Les sols cultivés ont des teneurs plus élevées en Cu dans les horizons Ap1 et Ap2, en Zn dans l'horizon Ap1 et en B dans l'horizon B. Les niveaux des éléments mineurs dans les horizons Ap1 et Ap2 des sols cultivés sont élevés pour le Cu et le Zn, et modérés pour le Mn. Dans les témoins, ils sont modérés pour le Cu, élevés (Ap1) ou modérés (Ap2) pour le Zn et le Mn. Les bilans de masse de P, Cu et Zn sont deux fois plus élevés dans les sols cultivés par rapport aux témoins, mais demeure en deçà du seuil du 500 kg/ha pour le P (Tableau 131).

Tableau 133 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 20 (Magog, Calais et Dufferin).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
pH	6,1	5,6	6,2	5,8	6,5	6,2
pH _{SMP}	6,6	6,2	6,6	6,2	6,9	6,7
P _{M3} (mg/kg)	82,9	36,6	56,9	24,7	19,4	11,2
Al _{M3} (mg/kg)	883,1	1 055,6	915,8	1 073,3	851,0	926,4
Fe _{M3} (mg/kg)	297,5	258,2	273,6	218,1	212,0	194
ISP (%)	9,0	3,8	6,5	2,4	2,2	1,1
Mn _{M3} (mg/kg)	72,4	86,4	58,6	67,5	75,5	94,0
B _{M3} (mg/kg)	0,28	0,18	0,18	0,11	0,07	0,02
Cu _{M3} (mg/kg)	4,68	2,29	3,24	1,99	1,31	1,06
Zn _{M3} (mg/kg)	6,56	3,56	3,56	2,35	1,46	1,25
K _{M3} (cmol/kg)	0,186	0,211	0,126	0,131	0,091	0,089
Na _{M3} (cmol/kg)	0,066	0,031	0,059	0,032	0,049	0,028
Ca _{M3} (cmol/kg)	7,3	7,2	6	6,3	3,9	3,1
Mg _{M3} (cmol/kg)	0,94	0,94	0,70	0,68	0,58	0,51
(K+Na)/(Ca+Mg)	0,032	0,035	0,029	0,026	0,032	0,034
CEC (cmol/kg)	16,9	20,8	15,1	19,0	10,2	11,4
Sat. bases (%)	51,4	41,3	47,4	39,1	48,7	38,6

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

ISP : indice de saturation en phosphore.

CEC : capacité d'échange cationique.

M3 : extrait Mehlich-3.

Niveau d'interprétation (sauf Fe, B, ISP et (K+Na)/(Ca+Mg))

Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
-------------	--------	-------	-------	------------

Synthèse de l'état de santé des sols du groupe 20 (Magog, Calais et Dufferin).

Problèmes de dégradation observés dans les sols cultivés

- Les sols sont plus compacts dans les trois horizons.
- L'aération et les conditions pour les échanges gazeux sont limitantes dans les trois horizons.
- Les quantités d'eau en excès favorisent des processus anaérobies dans les trois horizons.
- La structure est légèrement dégradée.
- La circulation de l'eau est réduite à 40 cm de profondeur.
- L'érosion des sols dépassent le seuil de 6 t/ha/an.
- La teneur en matière organique est modérée à élevée et la teneur en C dépasse le seuil critique de 2 % dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La respiration et la quantité d'azote minéralisable sont plus faibles dans les trois horizons.
- La teneur en P et l'indice de saturation en P sont plus élevées dans les trois horizons, mais l'ISP ne dépasse pas le seuil de 11 %.
- La teneur en Na est plus élevée dans les trois horizons.
- La teneur en Cu est plus élevée dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La teneur en Zn est plus élevée dans l'horizon Ap1.
- Les bilans de masse indiquent un enrichissement en P, Cu et Zn dans le profil.

Groupe 21 : Séries Sherbrooke, Ascot et Greensboro

Les séries Sherbrooke, Ascot et Greensboro sont situées dans les mêmes régions pédologiques que les séries du groupe 20. Ces sols se sont développés sur des tills loameux-grossiers. Ils ont un meilleur drainage naturel comparativement aux sols du groupe 20.

Tableau 134 : Caractéristiques des sols du groupe 21 (Sherbrooke, Ascot et Greensboro).

Caractéristiques	Sherbrooke (SBO)	Ascot (ASC)	Greensboro (GEB)
Granulométrie du matériau, réaction	Loameux-fin, acide	Loameux-grossier à loameux-fin, acide	Loameux-fin, acide
Type de dépôt	Till (glaciaire)	Till (glaciaire)	Till (glaciaire)
Classe de drainage	Imparfait à modérément bon	Bon	Modérément bon
Groupe hydrologique	B	B	C
Taxonomie (sous-groupe)	Brunisol sombrique gleyifié	Podzol humo-ferrique orthique	Podzol humo-ferrique gleyifié
Superficie cartographiée (ha)	31 772	63 705	176 598

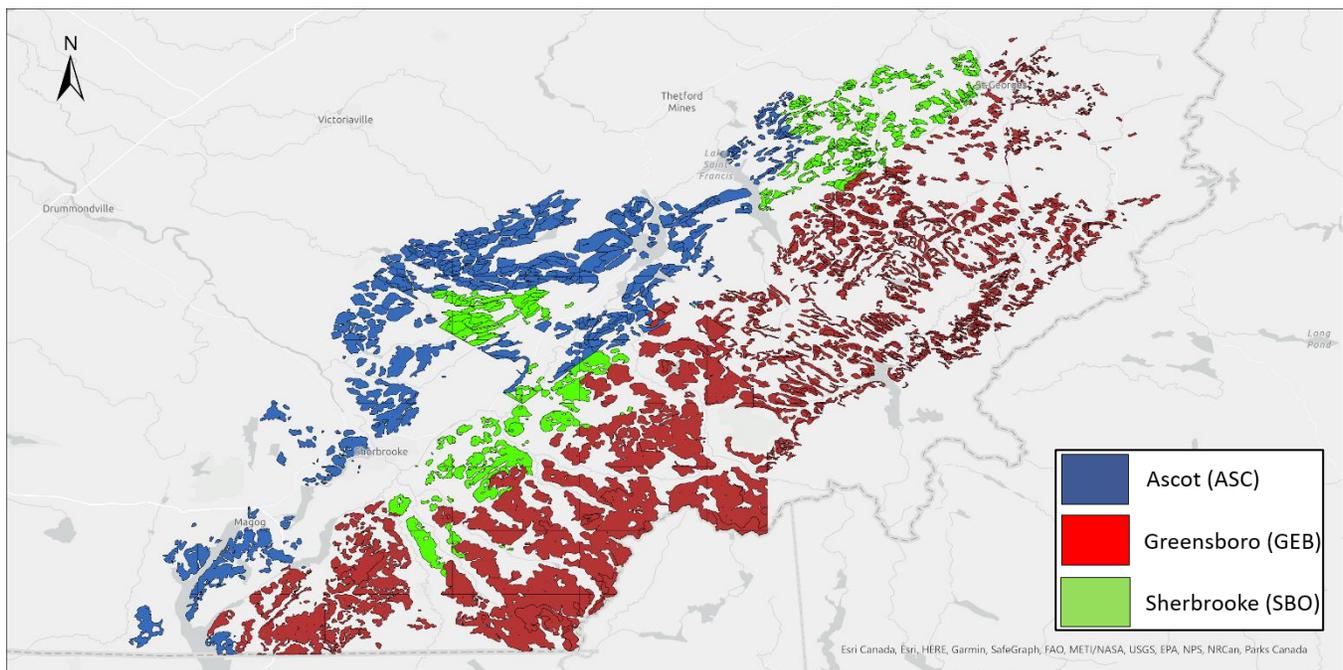


Figure 32 : Répartition géographique des sols du groupe 21 (Sherbrooke, Ascot et Greensboro).

Une augmentation significative de la masse volumique apparente et une diminution significative de la porosité totale des trois horizons des sols cultivés indiquent qu'ils sont plus compacts par rapport aux sols témoins (Tableau 135). La plus faible macroporosité de l'horizon Ap2 des sols cultivés indique une moins bonne aération par rapport aux sols témoins. La tortuosité des pores est plus élevée dans les horizons Ap2 et B des sols cultivés et la diffusivité relative des gaz plus faible dans l'horizon Ap2 indiquent des conditions défavorables aux échanges gazeux. La

capacité au champ relative n'est pas différente entre sols cultivés et témoins, mais presque tous les horizons dépassent le critère de 0,7 et donc présentent des conditions anoxiques. La conductivité hydraulique mesurée à 15 cm et à 40 cm de profondeur n'est pas significativement différente entre sols cultivés et témoins, cependant ces signes de dégradation physique des sols cultivés par rapport aux témoins ne semblent pas avoir d'impact sur la circulation de l'eau. La proportion des agrégats dont le diamètre est compris entre 0,25 et 4 mm est plus faible dans les sols cultivés que dans les témoins. Toutefois, la proportion d'agrégats supérieurs à 4 mm et le DMP ne sont pas significativement différents entre sols cultivés et témoins.

Tableau 135 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 21 (Sherbrooke, Ascot et Greensboro).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
Nombre d'observations	48	23	46	21	48	23
Sable (%)	45	42	44	45	45	47
Limon (%)	41	42	42	41	40	40
Argile (%)	14	16	14	14	15	13
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,20	1,08	1,31	1,14	1,47	1,24
Porosité totale (cm ³ /cm ³)	0,531	0,580	0,496	0,556	0,428	0,508
Macroporosité (cm ³ /cm ³)	0,137	0,172	0,117	0,155	0,109	0,130
Teneur en air au champ (cm ³ /cm ³)	0,135	0,194	0,122	0,176	0,116	0,142
Tortuosité des pores τ (—)	1,419	1,354	1,474	1,384	1,637	1,463
Diffusivité relative des gaz D/D0 (—)	0,006	0,010	0,003	0,008	0,005	0,005
Capacité au champ relative (—)	0,744	0,697	0,765	0,718	0,740	0,744
K _{sat} (cm/jour)			15,8	27,1	24,4	39,7
Diamètre moyen pondéré des agrégats (mm)	2,76	2,62				
Agrégats 4-8mm (%)	34,8	30,1				
Agrégats 2-4mm (%)	15,2	18,7				
Agrégats 1-2mm (%)	9,5	13,9				
Agrégats 0,5-1mm (%)	6,4	9,8				
Agrégats 0,25-0,5mm (%)	3,3	5,5				

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

K_{sat} : Conductivité hydraulique saturée mesurée à 15 cm (Ap1) et 40 cm de profondeur (B).

Les pertes de sol par érosion indiquées par le mouvement net de sol au Tableau 136 ne sont pas significativement différentes entre sols cultivés et témoins, mais dans les deux cas, elles dépassent le seuil d'érosion de 6 t/ha/an tolérable pour la plupart des sols au Canada.

Tableau 136 : Bilans de masse des sols du groupe 21 (Sherbrooke, Ascot et Greensboro).

Descripteurs	Cultivé	Témoin
Profondeur (cm)	41	41
Mouvement net de sol (t/ha)	-9,4	-6,8
C _{total} (t/ha)	99	106
C _{M3} (kg/ha)	12	7
K _{M3} (kg/ha)	409	275
P _{M3} (kg/ha)	374	182
Zn _{M3} (kg/ha)	21,8	12,7

Les valeurs en gras indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$ entre sols cultivés et témoins.

Profondeur : correspond à la profondeur de l'horizon Ap plus 15 cm dans le B.

La teneur en matière organique est plus faible dans les trois horizons des sols cultivés par rapport aux témoins, avec une différence significative dans les horizons Ap1 et B (Tableau 137). Toutefois, le niveau de la matière organique dans l'horizon Ap1 demeure élevé dans les sols cultivés et témoins. Dans l'Ap2, il est élevé dans les témoins et modéré dans les sols cultivés. Le ratio C actif/C total est plus élevé dans les trois horizons des sols cultivés en raison d'une teneur significativement plus faible en C total et peut-être des teneurs en C actif plus élevées dans les sols cultivés. Les quantités de CO₂ dégagées et de N minéralisé après une incubation de 14 jours sont plus faibles dans l'horizon Ap1 des sols cultivés, indiquant une diminution des sources de C et N disponibles et de l'activité biologique dans les sols cultivés du groupe 21 par rapport aux témoins.

Tableau 137 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 21 (Sherbrooke, Ascot et Greensboro).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
M.O. (%)	4,46	5,39	3,80	4,52	1,85	2,75
C total (%)	2,58	3,12	2,20	2,62	1,07	1,60
N organique (mg/kg)	2 242	2 529	1 914	2 172	979	1 136
Ratio C/N	11,4	12,0	11,3	12,1	11,2	13,2
C actif (mg/kg)	616	586	497	426	195	224
Ratio C actif/C total (mg/g)	24,0	19,4	22,7	16,3	18,3	14,1
CO ₂ dégagé 14 jours (mg/kg)	475	715	326	410	126	165
N minéralisé 14 jours (mg/kg)	55,7	82,3	38,2	44,6	10,1	11,6
Ratio N minéralisé/N org. (mg/g)	25,6	33,0	20,6	20,9	10,5	9,6

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

M.O. : matière organique du sol estimée avec C total Leco et un facteur de 1,724.

N organique : N total Leco moins N minéral.

Ratio C/N : C total Leco divisé par N total Leco.

Le pH des sols cultivés est significativement plus élevé que celui des témoins dans les trois horizons (Tableau 138). Toutefois, les sols cultivés demeurent faiblement acides sur toute leur profondeur. Quant aux témoins, leurs niveaux de pH varient de fortement acides dans les horizons Ap1 et Ap2 à moyennement acides dans l'horizon B.

La teneur en P est significativement plus élevée dans les trois horizons des sols cultivés par rapport aux témoins (Tableau 138). Le niveau de P dans les sols cultivés demeure toutefois modéré dans l'Ap1 et l'Ap2, et faible dans le B. L'indice de saturation en P de ces sols cultivés est aussi plus élevé par rapport à celui des témoins, mais demeure en-dessous de la valeur critique agroenvironnementale de 11 % (Tableau 138). La saturation en bases des sols cultivés est significativement plus élevée que celle des témoins dans les trois horizons, principalement en raison de leur teneur plus élevée en Ca, en Mg et en Na (Tableau 138). Toutefois, les niveaux de Ca, de Mg et de Na demeurent faibles ou très faibles. Le niveau du K des sols cultivés est moyen dans l'Ap1 et faible dans l'Ap2. Les sols cultivés ont des teneurs plus élevées en B dans les trois horizons et en Mn dans l'horizon en B. Les niveaux des éléments mineurs dans les horizons Ap1 et Ap2 des sols cultivés sont élevés ou moyens pour le Cu et le Zn, et faibles pour le Mn. Dans les témoins, ils sont modérés (Ap1) ou faibles (Ap2) pour le Cu, élevés (Ap1) ou modérés (Ap2) pour le Zn et faibles pour le Mn. Les bilans de masse de P, Cu et Zn sont près deux fois plus élevés dans les sols cultivés par rapport aux témoins, mais demeure en deçà du seuil du 500 kg/ha pour le P (Tableau 136).

Tableau 138 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 21 (Sherbrooke, Ascot et Greensboro).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
pH	6,2	5,5	6,2	5,5	6,4	5,6
pH _{SMP}	6,5	6	6,5	6,0	6,7	6,2
P _{M3} (mg/kg)	82,8	38,6	64,5	26,8	31,5	13,9
Al _{M3} (mg/kg)	1 307,7	1 565,7	1 340,5	1 645,7	1 427,5	1 765,4
Fe _{M3} (mg/kg)	204,5	223,7	187,9	185,9	141,6	152,8
ISP (%)	6,6	2,8	5,4	2,0	2,1	1,0
Mn _{M3} (mg/kg)	49,6	34,0	37,1	28,7	21,6	12,9
B _{M3} (mg/kg)	0,37	0,15	0,3	0,11	0,14	0,04
Cu _{M3} (mg/kg)	2,94	1,94	2,26	1,57	0,88	0,66
Zn _{M3} (mg/kg)	5,33	3,85	3,91	2,89	1,75	1,44
K _{M3} (cmol/kg)	0,271	0,221	0,149	0,138	0,098	0,088
Na _{M3} (cmol/kg)	0,025	0,017	0,024	0,015	0,022	0,016
Ca _{M3} (cmol/kg)	6,6	3,7	6,2	2,8	3,4	1,4
Mg _{M3} (cmol/kg)	0,68	0,47	0,55	0,26	0,33	0,17
(K+Na)/(Ca+Mg)	0,044	0,068	0,029	0,050	0,035	0,071
CEC (cmol/kg)	16,9	17,6	16,0	16,3	11,3	13,2
Sat. bases (%)	45,9	25,1	44,0	20,2	35,5	13,4

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

ISP : indice de saturation en phosphore.

CEC : capacité d'échange cationique.

M3 : extrait Mehlich-3.

Niveau d'interprétation (sauf Fe, B, ISP et (K+Na)/(Ca+Mg))

Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
-------------	--------	-------	-------	------------

Synthèse de l'état de santé des sols du groupe 21 (Sherbrooke, Ascot et Greensboro).

Problèmes de dégradation observés dans les sols cultivés

- Les sols sont plus compacts dans les trois horizons.
- L'aération et les conditions pour les échanges gazeux sont limitantes dans les horizons Ap2 et B.
- Les quantités d'eau en excès favorisent des processus anaérobies dans les horizons Ap2 et B.
- La structure est légèrement dégradée.
- L'érosion des sols dépassent le seuil de 6 t/ha/an.
- La teneur en matière organique est modérée à élevée et la teneur en C dépasse le seuil critique de 2 % dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La respiration et la quantité d'azote minéralisable sont plus faibles dans l'horizon Ap1.
- La teneur en P et l'indice de saturation en P sont plus élevées dans les trois horizons, mais l'ISP ne dépasse pas le seuil de 11 %.
- Les teneurs en B et Ca sont plus élevées dans les trois horizons.
- La teneur en Mg est plus élevée dans les horizons Ap2 et B.
- Les bilans de masse indiquent un enrichissement en P, Cu et Zn dans le profil.

Groupe 22 : Séries Amqui, Quisibis et Comis

Les séries Amqui, Quisibis et Comis se sont développées sur des matériaux loameux-fin ou squelettique-loameux. Leur drainage naturel varie de modérément bon à rapide. Ces séries sont situées à l'est de la province dans les régions pédologiques des Monts Notre-Dame et du Bas-plateau de la baie des Chaleurs.

Tableau 139 : Caractéristiques des sols du groupe 22 (Amqui, Quisibis et Comis).

Caractéristiques	Amqui (AMQ)	Quisibis (QSB)	Comis (COM)
Granulométrie du matériau, réaction	Squelettique-loameux, acide	Squelettique-loameux, acide	Loameux fin, acide
Type de dépôt	Till (glaciaire)	Till (glaciaire)	Till (glaciaire)
Classe de drainage	Bon	Rapide	Modérément bon
Groupe hydrologique	B	D	C
Taxonomie (sous-groupe)	Podzol humo-ferrique orthique	Podzol humo-ferrique orthique	Brunisol mélanique gleyifié
Superficie cartographiée (ha)	5 742	47 653	3 372

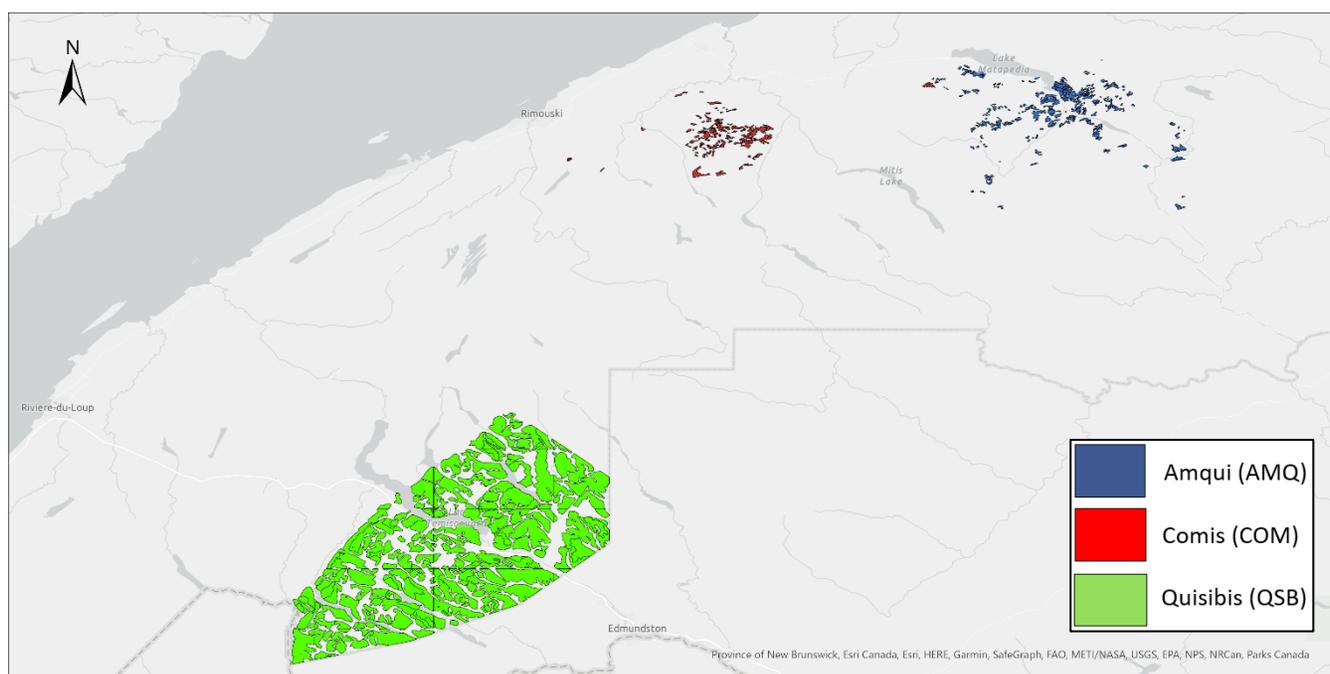


Figure 33 : Répartition géographique des sols du groupe 22 (Amqui, Quisibis et Comis).

La masse volumique apparente de l'horizon Ap1 des sols cultivés est significativement plus élevée que dans les témoins, mais demeure acceptable en étant inférieure à $1,10 \text{ g/cm}^3$ (Tableau 140). La porosité totale et la macroporosité sont plus faibles et la tortuosité des pores est aussi plus élevée dans l'horizon Ap1 des sols cultivés, mais demeurent à des niveaux acceptables. Les autres propriétés et la conductivité hydraulique mesurée à 15 cm et à 40 cm de profondeur ne sont pas significativement différentes entre sols cultivés et témoins.

Tableau 140 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 22 (Amqui, Quisibis et Comis).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
Nombre d'observations	52	20	34	18	52	20
Sable (%)	28	22	30	28	35	32
Limon (%)	48	51	49	48	44	45
Argile (%)	24	27	21	24	21	23
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,06	0,81	1,11	1,03	1,20	1,11
Porosité totale (cm ³ /cm ³)	0,598	0,679	0,579	0,607	0,535	0,566
Macroporosité (cm ³ /cm ³)	0,226	0,281	0,219	0,235	0,182	0,203
Teneur en air au champ (cm ³ /cm ³)	0,291	0,327	0,263	0,264	0,236	0,225
Tortuosité des pores τ (—)	1,322	1,242	1,347	1,312	1,408	1,365
Diffusivité relative des gaz D/D0 (—)	0,021	0,032	0,019	0,024	0,014	0,017
Capacité au champ relative (—)	0,622	0,594	0,624	0,611	0,654	0,645
K _{sat} (cm/jour)			90,2	130,8	44,4	21,4
Diamètre moyen pondéré des agrégats (mm)	2,52	2,44				
Agrégats 4-8mm (%)	23,7	20,0				
Agrégats 2-4mm (%)	23,7	25,1				
Agrégats 1-2mm (%)	19,3	22,0				
Agrégats 0,5-1mm (%)	11,1	11,1				
Agrégats 0,25-0,5mm (%)	5,8	5,8				

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

K_{sat} : Conductivité hydraulique saturée mesurée à 15 cm (Ap2) et 40 cm de profondeur (B).

Les pertes de sol par érosion indiquées par le mouvement net de sol au Tableau 141 ne sont pas significativement différentes entre sols cultivés et témoins, mais dans le cas des sols cultivés, elles dépassent le seuil d'érosion de 6 t/ha/an tolérable pour la plupart des sols au Canada.

Tableau 141 : Bilans de masse des sols du groupe 22 (Amqui, Quisibis et Comis).

Descripteurs	Cultivé	Témoin
Profondeur (cm)	33	37
Mouvement net de sol (t/ha)	-8,2	-4,0
C _{total} (t/ha)	83	99
C _{UM3} (kg/ha)	2	2
K _{M3} (kg/ha)	252	313
P _{M3} (kg/ha)	103	72
Zn _{M3} (kg/ha)	7,7	8,0

Les valeurs en gras indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$ entre sols cultivés et témoins.

Profondeur : correspond à la profondeur de l'horizon Ap plus 15 cm dans le B.

La teneur en matière organique est significativement plus faible dans l'horizon Ap1 des sols cultivés par rapport aux sols témoins, mais demeure relativement élevée (Tableau 142). Dans les sols témoins, la teneur en matière organique est d'un niveau très élevé dans l'horizon Ap1 et élevé dans l'Ap2. Dans les sols cultivés, elle est élevée dans l'Ap1 et l'Ap2. La teneur en azote organique ainsi que les quantités de CO₂ dégagées et de N minéralisé après une incubation de 14 jours sont plus faibles dans l'horizon Ap1 des sols cultivés, indiquant une diminution des sources de C et N disponibles et de l'activité biologique dans les sols cultivés du groupe 22 par rapport aux témoins.

Tableau 142 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 22 (Amqui, Quisibis et Comis).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
M.O. (%)	5,46	8,23	4,54	5,09	2,67	3,12
C total (%)	3,16	4,76	2,64	2,95	1,55	1,81
N organique (mg/kg)	2 676	3 930	2 314	2 571	1 383	1 555
Ratio C/N	11,6	12,1	11,2	11,6	11,7	11,6
C actif (mg/kg)	745	978	640	712	398	425
Ratio C actif/C total (mg/g)	24,0	20,3	24,1	23,8	24,2	23,7
CO₂ dégagé 14 jours (mg/kg)	797	1 414	584	712	337	375
N minéralisé 14 jours (mg/kg)	85,7	155,4	59,2	73,7	37,3	31,0
Ratio N minéralisé/N org. (mg/g)	32,7	40,1	28,1	28,4	25,1	21,2

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

M.O. : matière organique du sol estimée avec C total Leco et un facteur de 1,724.

N organique : N total Leco moins N minéral.

Ratio C/N : C total Leco divisé par N total Leco.

Le pH des sols cultivés n'est pas différent de celui des sols témoins. Les niveaux de pH mesurés (sols cultivés et témoins) varient de moyennement à faiblement acides (Tableau 143). La teneur en P n'est pas significativement différente entre les sols cultivés et témoins, avec des niveaux faibles ou très faibles dans les trois horizons.

Les sols cultivés ont par rapport aux sols témoins, des teneurs significativement plus faibles en K et plus élevées en Na dans l'horizon Ap1. Toutefois, le niveau de Na dans les sols du groupe 22 demeure très faible. À l'inverse, les témoins ont plus de K dans l'Ap1 que les sols cultivés. Les niveaux de K sont faibles dans les sols cultivés (Ap1 et Ap2), moyens dans l'Ap1 et faible dans l'Ap2 des sols témoins. Le niveau des autres bases échangeables varie de faible à modéré pour le Ca et de très faible à faible pour le Mg. La CEC est significativement plus faible dans l'Horizon Ap1 des sols cultivés.

Tableau 143 : Indicateurs de chimie-fertilité des sols du groupe 22 (Amqui, Quisibis et Comis).

Descripteurs	Horizon Ap1		Horizon Ap2		Horizon B	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
pH	6,1	5,8	6,0	6,0	6,1	6,1
pH _{SMP}	6,4	6,2	6,4	6,3	6,5	6,4
P _{M3} (mg/kg)	31,3	28,5	23,5	15,7	19,8	15,6
Al _{M3} (mg/kg)	1 070,9	919,1	1 116,5	973,2	1 373,8	1 243,6
Fe _{M3} (mg/kg)	220,9	283,4	222,1	252,9	188,6	220,6
ISP (%)	3,0	3,1	2,2	1,7	1,6	1,2
Mn _{M3} (mg/kg)	45,1	45,0	38,2	36,0	20,6	16,0
B _{M3} (mg/kg)	0,45	0,46	0,34	0,31	0,23	0,17
Cu _{M3} (mg/kg)	0,87	0,86	0,70	0,59	0,46	0,39
Zn _{M3} (mg/kg)	2,62	3,71	2,00	2,13	1,52	1,30
K _{M3} (cmol/kg)	0,257	0,424	0,160	0,173	0,121	0,106
Na _{M3} (cmol/kg)	0,039	0,024	0,038	0,029	0,035	0,03
Ca _{M3} (cmol/kg)	9,6	10,9	8,4	9,7	5,8	7,2
Mg _{M3} (cmol/kg)	0,86	1,08	0,64	0,57	0,38	0,31
(K+Na)/(Ca+Mg)	0,030	0,036	0,023	0,022	0,028	0,019
CEC (cmol/kg)	20,6	23,8	19,4	20,9	15,8	17,1
Sat. bases (%)	53,6	51,9	49,1	51,2	40,9	44,4

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

ISP : indice de saturation en phosphore.

CEC : capacité d'échange cationique.

M3 : extrait Mehlich-3.

Niveau d'interprétation (sauf Fe, B, ISP et (K+Na)/(Ca+Mg))

Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
-------------	--------	-------	-------	------------

Synthèse de l'état de santé des sols du groupe 22 (Amqui, Quisibis et Comis).

Problèmes de dégradation observés dans les sols cultivés

- Les sols sont légèrement plus compacts dans l'horizon Ap1.
- L'aération et les conditions pour les échanges gazeux ne sont pas limitantes.
- La capacité de rétention en eau n'est pas limitée.
- La structure n'est pas dégradée.
- L'érosion des sols dépassent le seuil de 6 t/ha/an.
- La teneur en matière organique est élevée et la teneur en C dépasse le seuil critique de 2 % dans les horizons Ap1 et Ap2.
- La respiration et la quantité d'azote minéralisable sont plus faibles dans l'horizon Ap1.
- La teneur en K est plus faible dans l'horizon Ap1.

Sols organiques

Groupe 9 : Séries Nobel, Saint-Dominique et Verchères

Les sols organiques contiennent plus de 17 % de carbone organique (> 30 % de M.O.). Le degré de décomposition de la fibre (estimé par le pourcentage de fibres frottées) permet de qualifier le matériau de fibrique ($\geq 40\%$ de fibres frottées), mésique ($\geq 10\%$ - < 40 % de fibres) ou humique (< 10 % de fibres). Les superficies occupées par les sols organiques sont petites, mais leur importance économique est significative. Les sols organiques sont sensibles à l'érosion éolienne et hydrique et se décomposent rapidement lorsqu'ils sont cultivés. On les retrouve principalement dans le sud-ouest du Québec à l'intérieur de la région pédologique de la Plaine de Montréal (A1) (Figure 34).

Les trois séries de sols organiques étudiées forment un seul et unique groupe et représentent les différents degrés de décomposition du matériau organique habituellement retrouvés dans les sols organiques cultivés (Tableau 145). Les séries Nobel et Saint-Dominique sont des sols organiques profonds (Tableau 145). La série Verchères est un sol organique mince sur un matériau argileux.

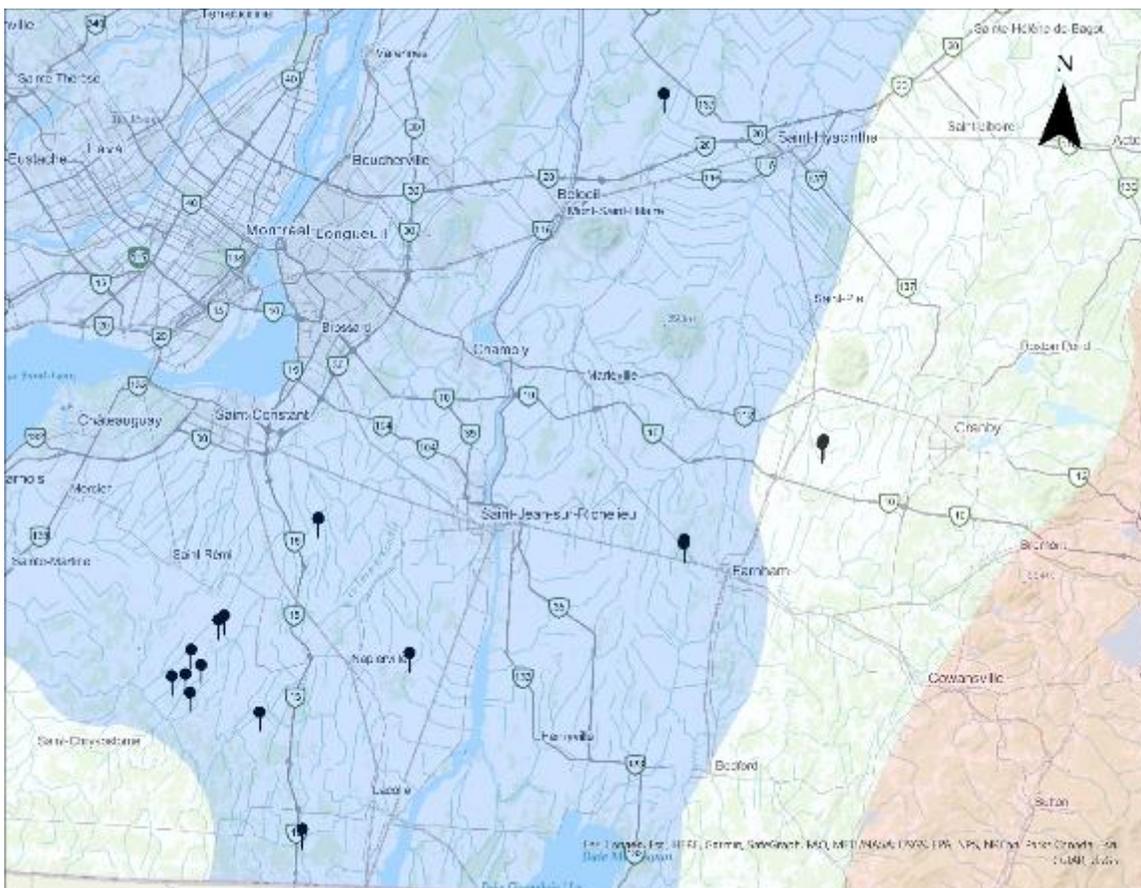


Figure 34 : Situation géographique des sites (sols organiques).

Tableau 144 : Caractéristiques définissant le groupe 9 de séries de sols organiques.

Groupe	Série de sols	Granulométrie du matériau parental	Type de dépôt	Région pédologique dominante
9	Nobel	Humique à mésique	Tourbe forestière	Plaine de Montréal
	Saint-Dominique	Mésique	Tourbe forestière	Plaine de Montréal
	Verchères	Humique / argileux	Tourbe forestière / Marin	Plaine de Montréal

Tableau 145 : Caractéristiques des sols du groupe 9 (Nobel, Saint-Dominique et Verchères).

Caractéristiques	Nobel (NBL)	Saint-Dominique (SDE)	Verchères (VER)
Granulométrie du matériau 1, réaction / Granulométrie du matériau 2, réaction	Humique à mésique, euique	Mésique, euique	Humique, euique / Argileux, neutre
Type de dépôt 1 / Type de dépôt 2	Tourbe forestière	Tourbe forestière	Tourbe forestière / Marin
Classe de drainage	Très mauvais	Très mauvais	Très mauvais
Groupe hydrologique	D	D	D
Taxonomie (sous-groupe)	Humisol mésique	Mésisol typique	Humisol terrique
Superficie cartographiée (ha)	1 417	1 663	3 332

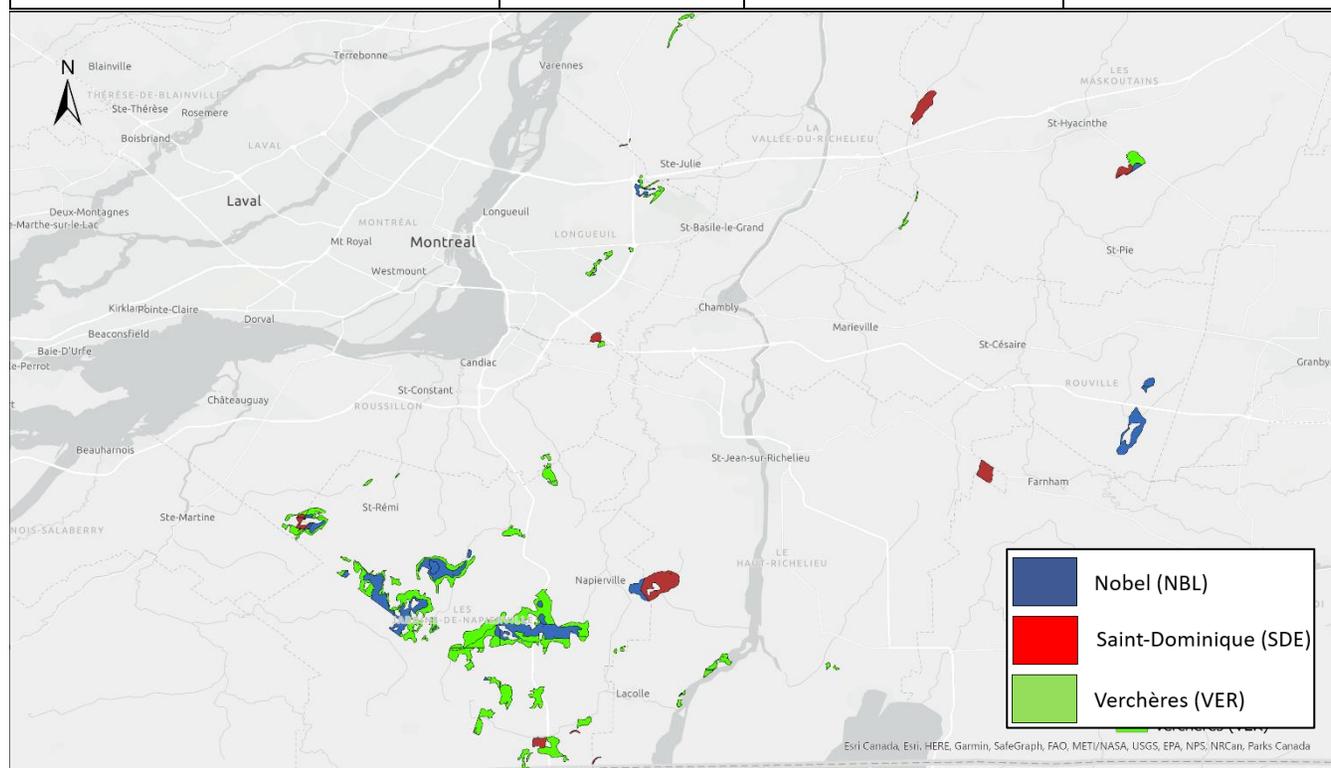


Figure 36 : Répartition géographique du groupe 9 (Nobel, Saint-Dominique et Verchères).

La proportion de particules organiques inférieures à 0,85 mm est deux fois plus élevée dans l'horizon O1 à la surface des sols cultivés par rapport aux sols témoins indiquant un état de pulvérisation avancé conduisant à des risques d'érosion éolienne et hydrique (Tableau 146). La masse volumique apparente plus élevée des horizons O1 et O2 des sols cultivés et supérieure à 0,20 g/cm³, ainsi que la plus faible porosité totale des trois horizons indiquent qu'ils sont plus compacts que les sols témoins. La macroporosité est significativement plus faible dans les trois horizons des sols cultivés, indiquant une réduction de leur aération. La tortuosité des pores significativement plus élevée de même que la diffusivité relative des gaz plus faible et inférieure à 0,005 dans les deux horizons inférieurs O2 et O3 des sols cultivés indiquent aussi des conditions limitantes pour les échanges gazeux par rapport aux sols témoins. La capacité au champ relative plus élevée et supérieure à 0,7 dans les deux horizons inférieurs O2 et O3 des sols cultivés, indique des quantités d'eau en excès favorisant des processus anaérobies. Cette dégradation des propriétés physiques des sols cultivés s'accompagne d'une conductivité hydraulique saturée significativement plus faible et inférieure à 100 cm/j, indiquant une réduction de la circulation de l'eau par rapport aux sols témoins.

Tableau 146 : Indicateurs de l'état physique des sols du groupe 9 (Nobel, Saint-Dominique et Verchères).

Descripteurs	Horizon O1		Horizon O2		Horizon O3	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
Nombre d'observations	48	24	48	21	48	24
Particules tamisées < 0,85 mm (g/g)	0,520	0,269				
Masse volumique apparente (g/cm ³)	0,30	0,20	0,30	0,19	0,16	0,15
Porosité totale (cm ³ /cm ³)	0,809	0,869	0,800	0,868	0,870	0,902
Macroporosité (cm ³ /cm ³)	0,261	0,311	0,126	0,197	0,124	0,232
Teneur en air au champ (cm ³ /cm ³)	0,333	0,344	0,155	0,196	0,090	0,122
Tortuosité des pores τ (—)	1,146	1,111	1,152	1,111	1,110	1,090
Diffusivité relative des gaz D/D0 (—)	0,020	0,032	0,003	0,008	0,003	0,011
Capacité au champ relative (—)	0,677	0,643	0,843	0,771	0,858	0,741
Ksat _{ch} (cm/jour)			55,7	703,1	21,7	76,2
Ksat _{lab} (cm/jour)			64,5	550,5		

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

Ksat_{ch} : Conductivité hydraulique saturée mesurée au champ à 15 cm (O2) et 40 cm de profondeur (O3).

Ksat_{lab} : Conductivité hydraulique saturée mesurée au laboratoire, sur un cylindre prélevé à 30 cm de profondeur.

Le pourcentage de cendres tend à être plus élevé dans les sols cultivés, mais il n'est pas significativement différent des sols témoins (Tableau 147). Il est toutefois supérieur à 20 % dans l'Ap1 posant des risques pour les jeunes plantules lorsque les cendres sont des particules de sables et de silt. Le degré de décomposition du matériau organique est plus élevé dans les sols cultivés par rapport aux témoins, comme l'indique leur teneur en fibres frottées plus faible dans les trois horizons. Les plus faibles pourcentages de fibres frottées inférieures à 40 % dans les horizons O1 et O2 des sols cultivés témoignent d'une évolution de la composition du matériau organique, de fibrique à mésique et de leur dégradation.

Les teneurs en carbone et azote organique ne sont pas significativement différentes entre sols cultivés et témoins. Toutefois, la teneur en C soluble est significativement plus faible dans les horizons O1 et O2 des sols cultivés. À l'inverse, la teneur en N soluble est plus élevée dans l'horizon Ap2 des sols cultivés. Il en résulte un ratio C/N soluble significativement plus faible dans le profil complet des sols cultivés, indiquant une disponibilité réduite du

carbone soluble par rapport à l'azote dans ces sols. À l'inverse, les quantités de CO₂ dégagées dans les horizons O1 et O2 des sols cultivés ainsi que les quantités de N minéralisé dans l'horizon O1 des sols cultivés sont plus faibles, indiquant une diminution des sources de C et N disponibles et de l'activité biologique par rapport aux témoins.

Tableau 147 : Indicateurs liés au carbone et à l'azote des sols du groupe 9 (Nobel, Saint-Dominique et Verchères).

Descripteurs	Horizon O1		Horizon O2		Horizon O3	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
Cendres (%)	22,6	15,8	19,9	12,6	15,8	11,7
Fibres non frottées (%)	55,2	69,7	60,4	67,9	63,5	68,3
Fibres frottées (%)	35,4	45,4	38,0	44,4	41,1	47,5
C total (%)	48,5	50,0	50,2	52,9	52,8	53,3
N organique (mg/kg)	2,01	2,02	2,06	1,94	2,16	1,96
Ratio C/N total	24,2	24,1	24,6	26,4	24,8	27,7
C soluble (mg/kg)	2 078	3 548	2 225	2 997	2 368	2 822
N soluble (mg/kg)	149	139	141	102	120	90
Ratio C/N soluble	16,6	28,9	17,4	32,5	21,5	34,3
CO ₂ dégagé 14 jours (mg/kg)	1 890	3 191	1 844	2 271	1 821	2 098
N minéralisé 14 jours (mg/kg)	101	237	101	141	100	112
Ratio N minéralisé/N org. (mg/g)	5,21	10,27	5,04	7,24	4,54	5,99

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à $P < 0,10$.

M.O. : matière organique du sol estimée avec C total Leco et un facteur de 1,724.

N organique : N total Leco moins N minéral.

Ratio C/N : C total Leco divisé par N total Leco.

Ratio C/N soluble : C soluble Leco divisé par N soluble Leco.

Les sols cultivés ont un pH significativement plus élevé que les témoins dans les trois horizons (Tableau 148). Leurs niveaux d'acidité varient de moyennement acides (horizons O1 et O2) à fortement acides. Quant aux témoins, ils sont extrêmement acides dans les trois horizons. La teneur en P est significativement plus élevée dans les trois horizons des sols cultivés par rapport aux témoins, avec des niveaux très élevés dans les horizons O1 et O2 (Tableau 148). Dans les témoins, la teneur en P est modérée (O1) ou faible (O2). L'indice de saturation en P des sols cultivés est aussi plus élevé par rapport à celui des témoins dans les trois horizons et se trouve très nettement au-dessus de la valeur critique agroenvironnementale de 5% dans les trois horizons (Tableau 148).

Les teneurs des sols cultivés en K, Ca et Mg sont significativement plus élevées par rapport aux témoins dans les trois horizons, avec des niveaux qui varient d'élevés à très élevés (Tableau 148). Dans les témoins, les niveaux des bases échangeables sont élevés pour le Mg dans les trois horizons, alors qu'ils varient de faibles à moyens pour le K et de moyens à élevés pour le Ca selon l'horizon. Les sols cultivés ont aussi des teneurs significativement plus élevées en éléments mineurs par rapport aux témoins (seulement dans les horizons O1 et O2 pour le Zn et le Mn). Les niveaux des éléments mineurs dans les sols cultivés sont élevés pour le Cu et le Zn, et faibles pour le Mn dans les horizons O1 et O2. Dans les témoins, ils sont modérés (O1) ou faibles (O2) pour le Cu, très élevés (O1) ou élevés (O2) pour le Zn, et faible (O1) ou très faible (O2) pour le Mn.

Tableau 148 : Propriétés de chimie-fertilité des sols du groupe 9 (Nobel, Saint-Dominique, Verchères).

Descripteurs	Horizon O1		Horizon O2		Horizon O3	
	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin	Cultivé	Témoin
pH	5,8	4,5	5,6	4,5	5,3	4,5
pH _{SMP}	5,9	4,7	5,8	4,8	5,6	4,8
P _{M3} (mg/kg)	226,6	79,7	183,5	50,1	122,2	34,1
Al _{M3} (mg/kg)	536	703	521	560	448	548
Fe _{M3} (mg/kg)	683	492	667	344	633	345
ISP (%)	8,1	2,1	7,3	1,6	5,3	1,2
Mn _{M3} (mg/kg)	49,8	31,8	48,6	12,6	38,5	10,6
B _{M3} (mg/kg)	3,56	0,68	3,23	0,54	3,02	0,60
Cu _{M3} (mg/kg)	17,41	2,59	13,45	1,29	6,73	1,06
Zn _{M3} (mg/kg)	38,8	27,3	30,1	15,2	16,1	10,8
K _{M3} (cmol/kg)	1,377	0,492	1,039	0,231	0,666	0,158
Na _{M3} (cmol/kg)	0,155	0,097	0,157	0,133	0,176	0,137
Ca _{M3} (cmol/kg)	78,0	25,1	74,2	25,8	69,2	25,9
Mg _{M3} (cmol/kg)	10,27	4,78	10,69	4,51	11,41	5,00
(K+Na)/(Ca+Mg)	0,018	0,022	0,015	0,018	0,013	0,014
CEC (cmol/kg)	101,4	58,5	99,8	57,2	95,7	57,9
Sat. bases (%)	85,8	53,9	85,8	54,7	83,2	53,7

Les valeurs en gras dans un même horizon indiquent des valeurs significativement différentes à P < 0,10.

ISP : indice de saturation en phosphore.

CEC : capacité d'échange cationique.

M3 : extrait Mehlich-3.

Niveau d'interprétation (sauf Fe, B, ISP et (K+Na)/(Ca+Mg))

Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
-------------	--------	-------	-------	------------

Synthèse de l'état de santé des sols du groupe 9 (Nobel, Saint-Dominique, Verchères).

Problèmes de dégradation observés dans les sols cultivés

- La proportion de particules < 0,85 mm est deux fois plus élevée dans l'horizon O1 des sols cultivés.
- Les sols sont plus compacts dans les trois horizons.
- L'aération et les conditions pour les échanges gazeux sont limitantes dans les horizons O2 et B.
- Les quantités d'eau en excès favorisent des processus anaérobies dans les horizons O2 et B.
- La circulation de l'eau est ralentie à 15 et 40 cm de profondeur.
- La respiration et la quantité d'azote minéralisable sont faibles dans les trois horizons.
- Les teneurs en Mn sont plus élevées dans les horizons Ap2 et B.
- Les bilans de masse indiquent un enrichissement en P, Cu et Zn dans le profil.

SYNTHÈSE DES PHÉNOMÈNES DE DÉGRADATION OBSERVÉS

Le comportement de chaque indicateur est présenté ici en fonction de la granulométrie des matériaux parentaux et des horizons pour interpréter l'ampleur des phénomènes de dégradation des sols observés en fonction de ces matériaux et des gradients climatiques régionaux. À l'intérieur des matériaux parentaux, les premiers groupes de séries sols (Groupes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8-A, 8-B) proviennent des régions méridionales des Basses terres du Saint-Laurent de la Montérégie et du Centre-du-Québec. Ces sols sont généralement plus fréquemment sous cultures annuelles et plus intensivement cultivés.

Condition physique des sols

La compaction, la diminution de la macroporosité (ou de l'aération) et de la circulation de l'eau, la détérioration de la structure et l'érosion des sols sont les phénomènes de dégradation qui ont été mesurés dans le cadre de l'EESSAQ pour qualifier la condition physique des sols. La masse volumique apparente (MVA) significativement plus élevée et la porosité totale plus faible dans les horizons de surface Ap1 et Ap2 de plusieurs sols cultivés par rapport aux sols témoins témoignent de problèmes fréquents de compaction de surface (Figure 35 et Figure 36). Par rapport aux sols témoins, les sols cultivés de 18 des 25 groupes de séries de sol à l'étude ont une MVA plus élevée et une porosité totale plus faible dans l'horizon Ap1 (Figure 35 et Figure 36).

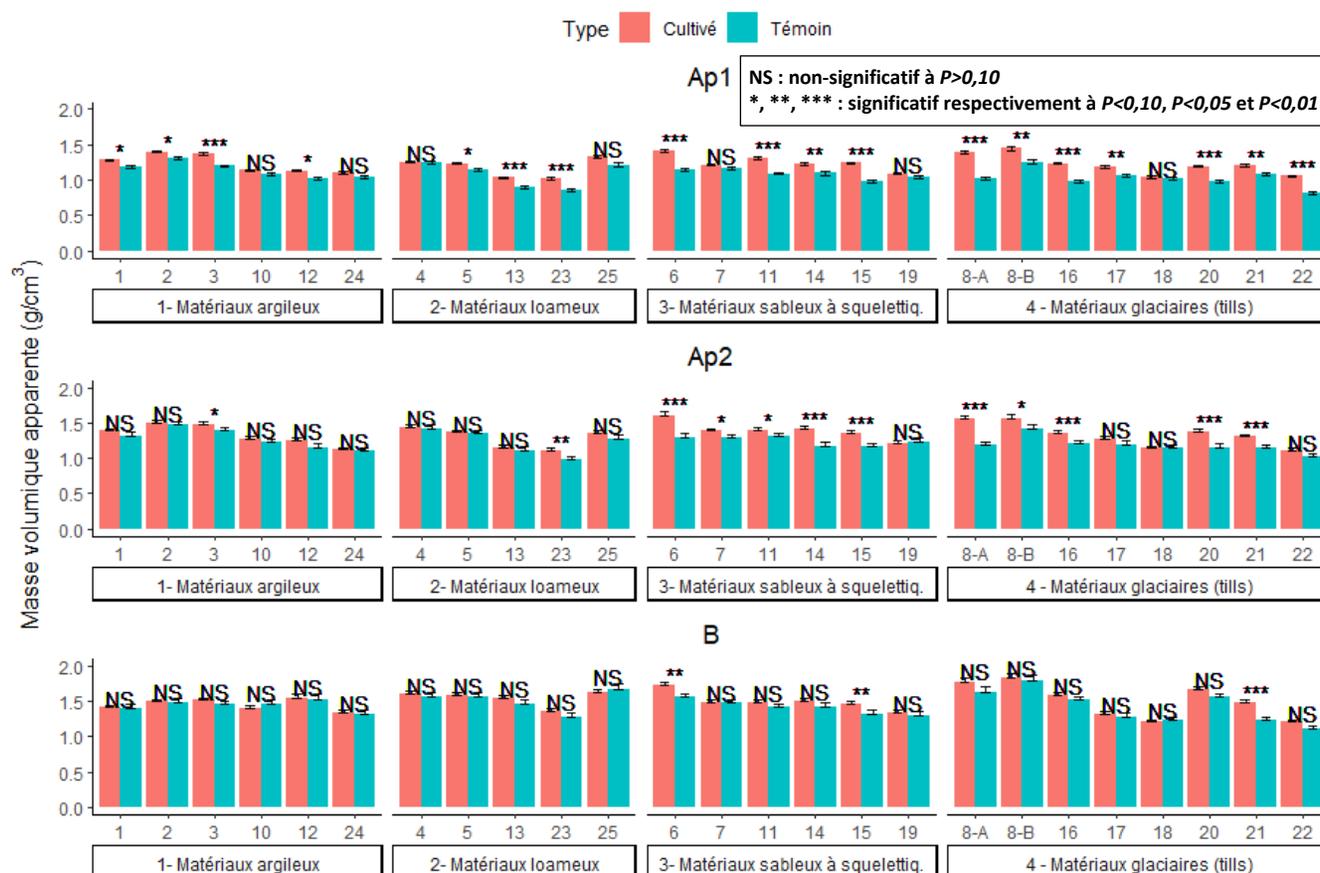


Figure 35 : Comparaison de la masse volumique apparente entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.

Les problèmes de compaction apparaissent moins fréquents en profondeur dans les horizons Ap2 et B des sols cultivés, mais ils sont plus fréquents dans les sols sableux à squelettiques et les tills que dans les sols loameux et argileux. La MVA plus élevée et la porosité totale plus faible de l'horizon B témoignent de compaction profonde de certains sols cultivés en sols sableux à squelettiques et sur tills. La compaction tend aussi à augmenter dans l'horizon Ap2 dans l'ensemble des groupes de séries de sols cultivés de la plaine de Montréal et du Centre du Québec (groupes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8-A, 8-B), plus souvent sous cultures annuelles, en particulier par rapport aux sols témoins dans les régions du Bas-Saint-Laurent, Saguenay-Lac-Saint-Jean et Abitibi-Témiscamingue (groupes 10, 12, 13, 19, 22, 23 et 24). Certains groupes de séries de sols en régions périphériques semblent présenter en revanche un état naturel plus compact en profondeur comme les séries de sols Baby et Duhamel du groupe 25 dans les sols loameux en Abitibi-Témiscamingue et les séries Magog, Calais et Dufferin du groupe 20 dans les tills.

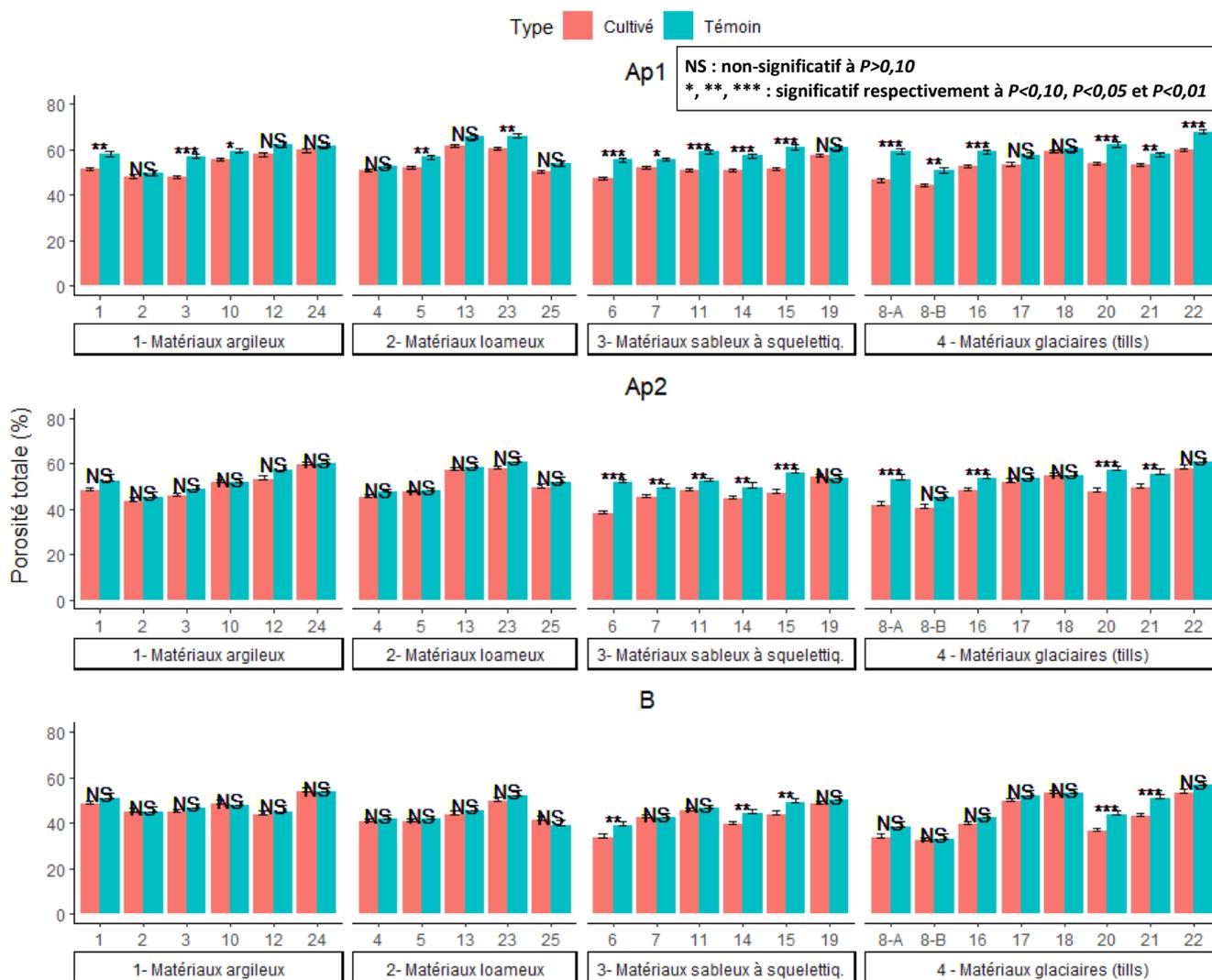


Figure 36 : Comparaison de la porosité totale entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.

La macroporosité ou la porosité d'air (équivalant à la porosité totale moins la teneur en eau à 10 kPa) est significativement plus faible; 9 fois sur 25 dans l'horizon Ap1 des sols cultivés et 11 fois sur 25 dans l'Ap2 peu importe le type de matériaux, mais avec une tendance plus fréquente dans les groupes de séries en régions plus méridionales (par exemple, groupes 1, 2, 3, 4, 6, 8-A, 8-B) (Figure 37). La macroporosité de l'horizon B des sols cultivés est plus souvent affectée (6 fois) que la masse volumique apparente (3 fois) ou la porosité totale (5 fois). Par ailleurs, la macroporosité est presque toujours inférieure à 10 % dans l'horizon B des sols argileux, loameux et de certains tills cultivés et plus souvent significativement plus faible dans les groupes de sols cultivés en régions plus méridionales (groupes 1, 2, 3, 4, 8 et 8-B notamment). Dans les sols sableux à squelettiques, la macroporosité est seulement plus faible dans l'horizon B du groupe 14, mais demeure relativement élevée et n'est pas un enjeu dans ces sols. La macroporosité dans l'horizon B des sols témoins de plusieurs groupes de séries de sols argileux et loameux ainsi que des tills du groupe 20 est plus souvent inférieure à 10 % reflétant une porosité d'air naturellement réduite dans ces sols.

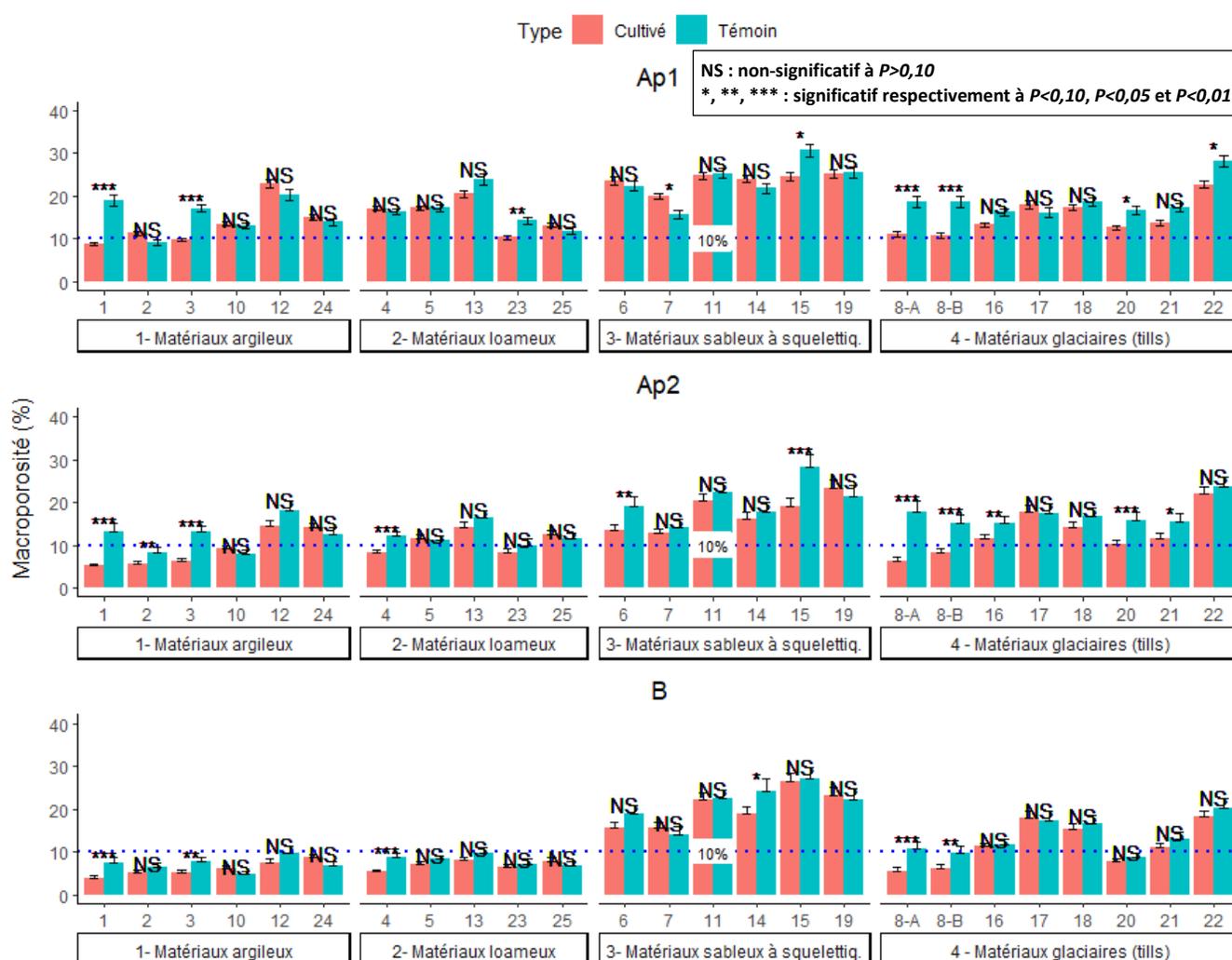


Figure 37 : Comparaison de la macroporosité entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.

La capacité au champ relative (la porosité totale occupée par l'eau à capacité au champ ou 10 kPa de tension (WFPS)) est significativement plus faible 7 fois sur 25 à la fois dans l'horizon Ap1 et Ap2 des sols cultivés peu importe le type de matériaux, mais avec une tendance plus fréquente dans les groupes de séries en régions plus méridionales (groupes 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8-A, 8-B, notamment) (Figure 38). La capacité au champ relative est presque toujours supérieure au seuil de 0,7 dans l'horizon B de tous les sols sauf les sols sableux à squelettiques et significativement plus élevées dans certains groupes de sols cultivés en régions plus méridionales (groupes 1, 3, 4, 8 et 8-B), notamment en sols argileux loameux et sur tills. Dans les sols sableux, une valeur plus faible de la capacité au champ relative dans les sols cultivés par rapport aux sols témoins sous le seuil de 0,6 plus particulièrement, indique un manque de capacité de rétention en eau. Dans les autres sols cultivés, une augmentation significative de la capacité au champ relative, supérieure au seuil de 0,7 dans l'horizon B en particulier, indique une diminution de l'aération nuisant au développement racinaire des plantes et favorisant potentiellement la dénitrification. Dans les sols témoins argileux et loameux, une capacité au champ relative plus souvent supérieure à 0,7 dans l'horizon B indique toutefois un état naturellement plus saturé en eau ou encore une fois un état moins aéré de ces sols en profondeur.

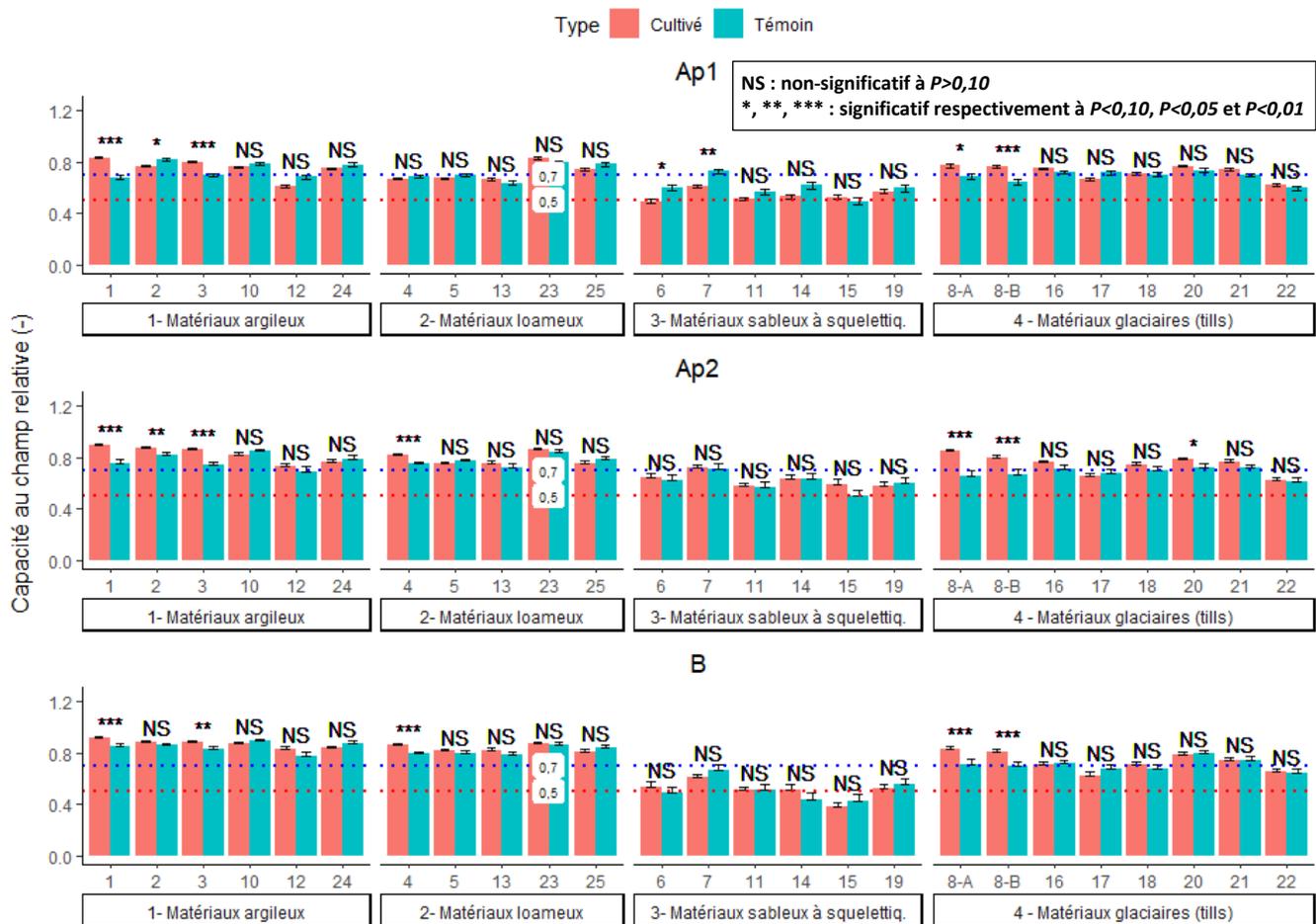


Figure 38 : Comparaison de la capacité au champ relative (WFPS) entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.

La diffusivité relative des gaz calculée avec la macroporosité et la porosité totale suit les mêmes tendances que la macroporosité et la capacité au champ relative (Figure 39). Sur 25 groupes de séries de sols, elle est significativement plus faible dans l'horizon Ap1 de 7 groupes de séries de sols cultivés, dans l'horizon Ap2 de 10 groupes et dans l'horizon B de 6 groupes. Ces différences sont plus fréquentes dans les tills. Par rapport aux seuils au-dessous desquels la dénitrification est favorisée dans un premier temps (0,03) et la croissance racinaire est limitée dans un deuxième temps (0,005), tous les sols cultivés ou témoins peu importe l'horizon, sauf les sols issus de matériaux sableux à squelettiques présentent une diffusivité relative des gaz inférieure au seuil critique de 0,03, donc à risque de générer de la dénitrification. La plupart des sols argileux, loameux ou des tills présentent aussi dans les horizons Ap2 et B une diffusivité relative des gaz inférieure au seuil de 0,005. Les valeurs les plus faibles sont mesurées dans les horizons B des sols cultivés en régions plus méridionales (Groupes 1, 2, 3, 4, 8A et 8B), mais aussi dans certains sols argileux en région plus périphériques (Groupe 10 du Bas-Saint-Laurent et Groupe 24 de l'Abitibi-Témiscamingue), ainsi que dans les sols loameux du Saguenay-Lac-Saint-Jean (Groupe 23) de l'Abitibi-Témiscamingue (Groupe 25).



Figure 39 : Comparaison de la diffusivité relative des gaz D/D_0 entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.

La conductivité hydraulique (CH) saturée est 6 fois sur 25 significativement inférieure dans l'horizon Ap2 des sols cultivés par rapport aux témoins et 4 fois dans l'horizon B (Figure 40). Les sols sableux sont les seuls à atteindre une CH saturée supérieure à 1 m/jour dans l'horizon B; une valeur considérée idéale dans les sols organiques pour la production agricole (Lévesque et Mathur, 1988), mais ce seuil est rarement atteint dans les autres sols minéraux cultivés de cet inventaire. Certains sols témoins argileux et des tills (groupes 1, 3 et 22) peuvent toutefois présenter des CH saturées naturellement très élevées (> 1 m/jour) à 15 cm de profondeur dans l'horizon Ap2.

Par rapport au critère de 10 cm/jour utilisé en Allemagne pour statuer sur la compaction des sols, tous les sols argileux et loameux cultivés, de même que trois groupes de tills (Groupes 8-A, 8-B et 20) présentent des valeurs inférieures à ce critère dans l'horizon B. À noter cependant que la conductivité hydraulique des sols témoins dans ces matériaux n'est pas toujours supérieure à ce critère, mais elle tend à être plus souvent supérieure à celle des sols cultivés. De fait, certains sols témoins argileux, loameux et de tills des régions de la plaine de Montréal, du Bas-Saint-Laurent, du Saguenay-Lac-Saint-Jean et de l'Abitibi-Témiscamingue (Groupes 8-A, 10, 23, 24 et 25) semblent présenter une conductivité hydraulique naturellement plus faible.

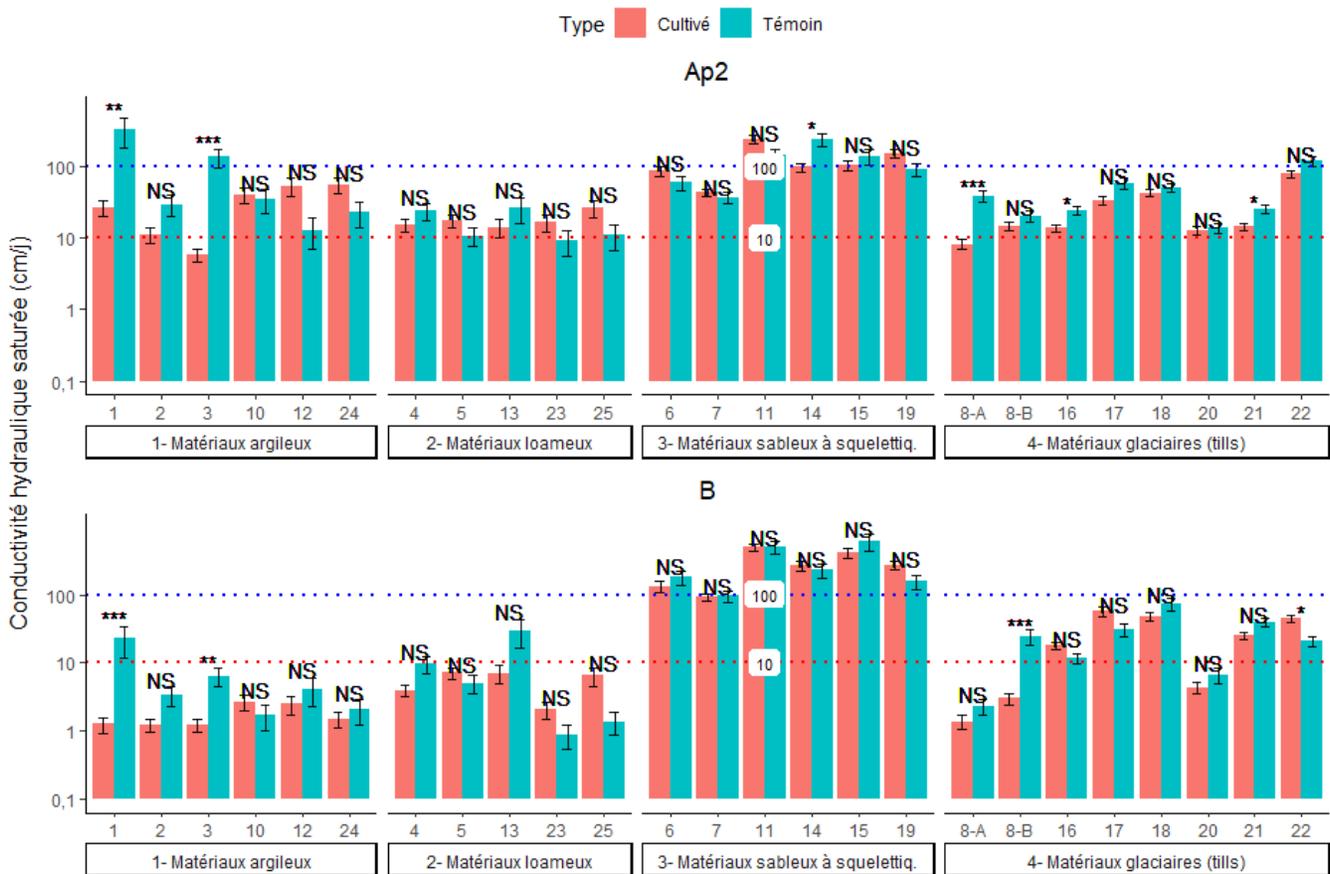


Figure 40 : Comparaison de la conductivité hydraulique saturée entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.

La structure du sol est détériorée lorsqu'il y a une diminution significative du diamètre moyen pondéré des agrégats stables (DMP) ou de la proportion d'agrégats stables de taille millimétrique dans les sols cultivés par rapport aux témoins. Les sols cultivés sur matériaux argileux, loameux et sableux présentent plus fréquemment

des signes de détérioration de leur structure à ce niveau et les sols des groupes 1, 4, 6 et 7 en régions plus méridionales sont significativement affectés (Figure 41).

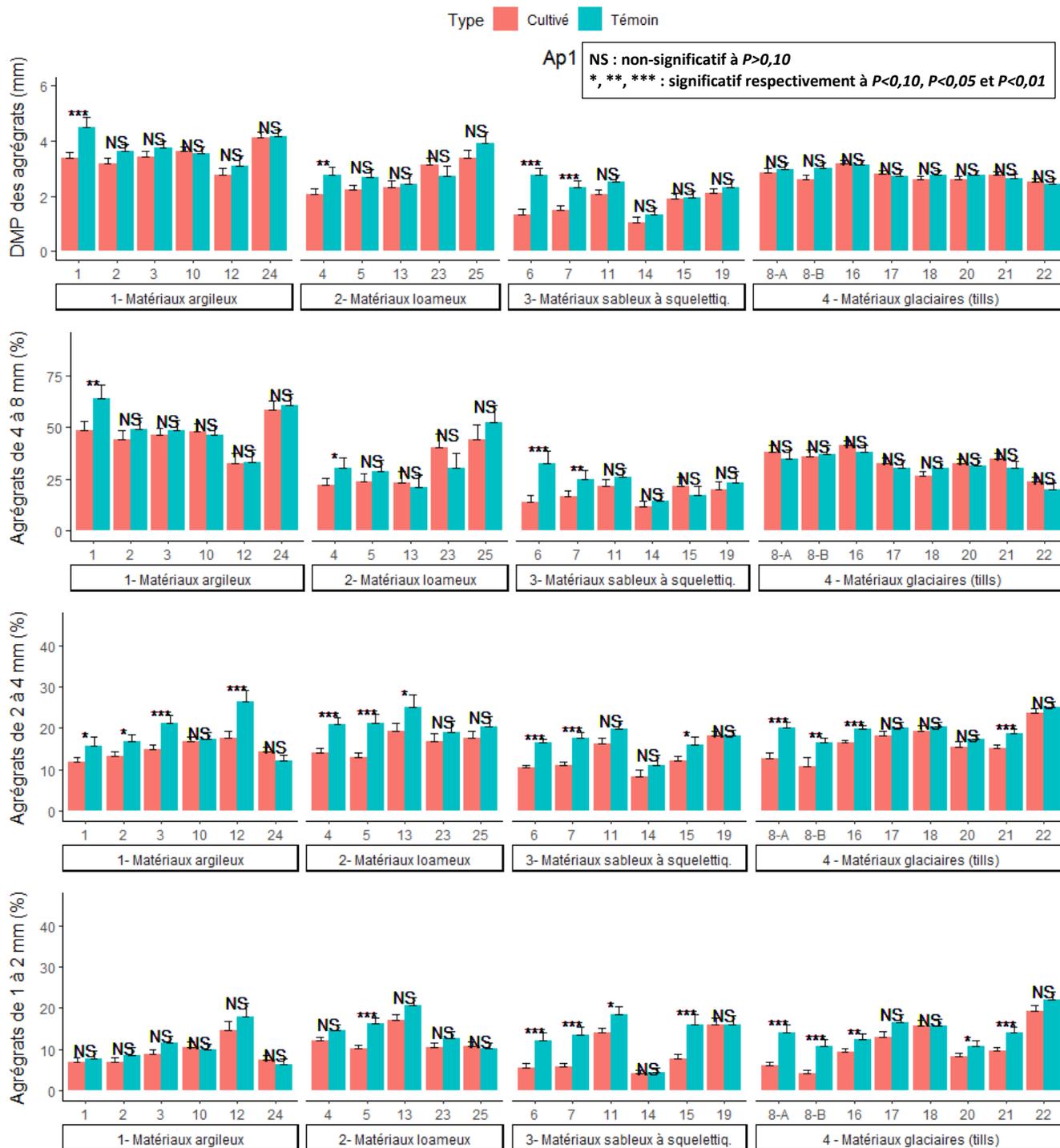


Figure 41 : Comparaison du diamètre moyen pondéré des agrégats (DMP) et des pourcentages d'agrégats stables (de 1 à 8 mm) entre sols cultivés et témoins dans l'horizon Ap1 de 25 groupes de séries de sols minéraux.

Les sols cultivés développés sur tills des groupes 8-A, 8-B, 16 et 21 semblent toutefois présenter des problèmes de détérioration de leur structure par rapport aux sols témoins dans les agrégats de plus petites tailles entre 1 et 4 mm (Figure 41). Il en va de même pour les sols des groupes 5 et 15 en matériaux loameux et sableux respectivement. En conclusion, les groupes de sols en régions plus méridionales et sous l'influence de pratiques culturales et agricoles plus intensives (groupes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8-A, 8-B, 15, 16 et 21 notamment) présentent plus souvent des problèmes de détérioration de leur structure dans l'horizon Ap1.

Érosion des sols

L'érosion des sols, indiquée par un mouvement net de sol négatif à la Figure 42, est significativement différente entre sols cultivés et sols témoins pour 4 groupes de sols sur 25. Toutefois, comme il en est discuté dans le rapport 5 sur la *Sévérité de l'érosion des sols évaluée à l'aide du ¹³⁷Cs* (Bernard, 2022), les sols dans les sites témoins n'étaient pas nécessairement appropriés pour estimer ces mouvements de sols dans des conditions non perturbées, car l'inventaire de Cs-137 utilisé pour calculer ces mouvements de sols a pu être affecté par toute perturbation du sol (nivellement, remblaiement, etc.) ayant eu lieu durant les 60 dernières années. Néanmoins, la plupart des groupes et types de sols affichent une perte de sol (mouvement négatif), sauf les sites témoins sur sols argileux du groupe 12 (séries Hébertville et Normandin) et sur sols loameux du groupe 5 (séries Chaloupe, Saint-Aimé, Des Saults et Le Bras). Les sols loameux, qu'ils soient cultivés ou témoins, affichent les plus bas taux d'érosion et ces derniers demeurent inférieurs au seuil d'érosion de 6 t/ha/an tolérable pour la plupart des sols au Canada. À l'inverse, les sols cultivés sur matériaux sableux à squelettique et ceux sur tills présentent les plus hauts niveaux d'érosion, dépassant significativement, 8 fois sur 14, le seuil d'érosion de 6 t/ha/an.

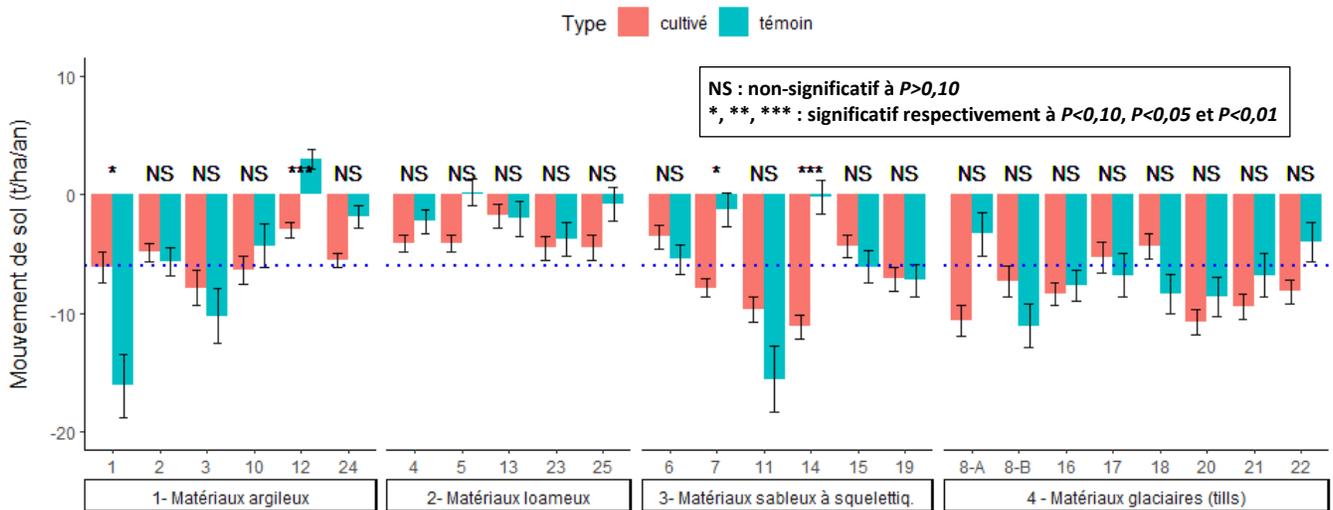


Figure 42 : Comparaison du mouvement de sol (érosion) entre profils de sols cultivés et témoins de 25 groupes de séries de sols minéraux.

Dans les sols cultivés sur matériaux argileux, seul le groupe 3 (séries Providence, Rideau, Chambly et Saint-Blaise) présente un taux d'érosion dépassant significativement le seuil de 6 t/ha/an. Dans le rapport 5 sur la *Sévérité de l'érosion des sols*, les conditions topographiques expliquent une faible part de l'érosion des sols, tandis que leur association aux régions pédologiques en expliquerait une part plus importante, du fait qu'elles intègrent les effets

du type de matériau parental, des conditions topographiques et de l'intensité des pratiques agricoles (Bernard, 2022).

Matière organique et potentiel de minéralisation

La baisse de la teneur en matière organique (M.O.) est un autre phénomène de dégradation important observé dans les sols cultivés. Elle concerne 12 groupes de séries de sol sur 25 dans l'horizon Ap1 (Figure 43). Les sols sableux et les tills sont les plus affectés par ce phénomène avec respectivement 4 fois sur 6 et 6 fois sur 8 groupes de séries de sol présentant une baisse de la teneur en M.O. entre sols cultivés et témoins. Cependant, les sols sableux cultivés de même que les autres sols cultivés en régions plus méridionales (groupes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8-A, 8-B, 11, 14) sont plus souvent sous le niveau de 4 % de M.O. (ou 2,3 % de C organique) jugés acceptables pour fournir les fonctionnalités attendues du sol. Les groupes de sols argileux 2 et 3 présentent aussi des baisses de M.O. dans l'horizon Ap1. Les sols cultivés dans les matériaux loameux ne montrent pas de diminution significativement différente de la teneur en matière organique par rapport aux sols témoins, mais des tendances à la baisse dans l'horizon Ap1.

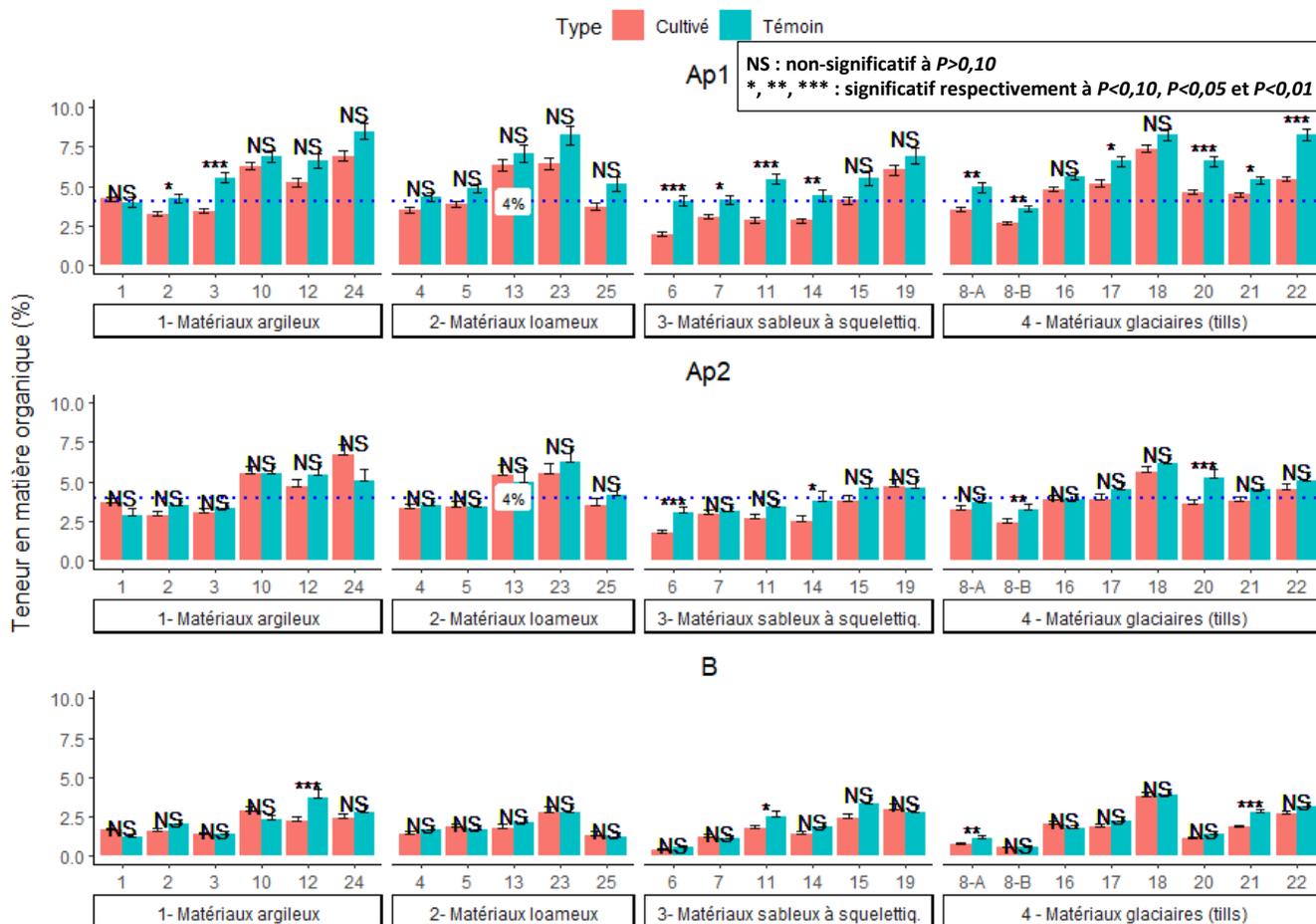


Figure 43 : Comparaison de la teneur en matière organique (M.O.) entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.

Un gradient climatique conduisant à des teneurs plus faibles en M.O. est toutefois perceptible entre les groupes de séries de sols argileux et loameux situés en régions plus méridionales dans la plaine de Montréal et au Centre-du-Québec (groupes 1, 2, 3, 4, 5) par rapport aux autres groupes en climat plus frais (groupes 10, 12, 13, 23, 24) comme dans les autres matériaux.

La capacité du sol à minéraliser de l'azote suit les mêmes tendances que la teneur en M.O. (Figure 44), mais les différences entre sols cultivés et témoins sont plus marquées. La plupart des sols sableux cultivés présentent de faibles valeurs de N minéralisable dans les horizons Ap1 et Ap2, sauf les sols sableux et squelettiques du groupe 19 plus marginalement cultivés. De surcroît, les sols argileux, loameux et les tills cultivés en régions plus méridionales (groupes 1, 2, 3, 4, 5, 8 et 8-B) présentent de plus faibles valeurs de N minéralisable.

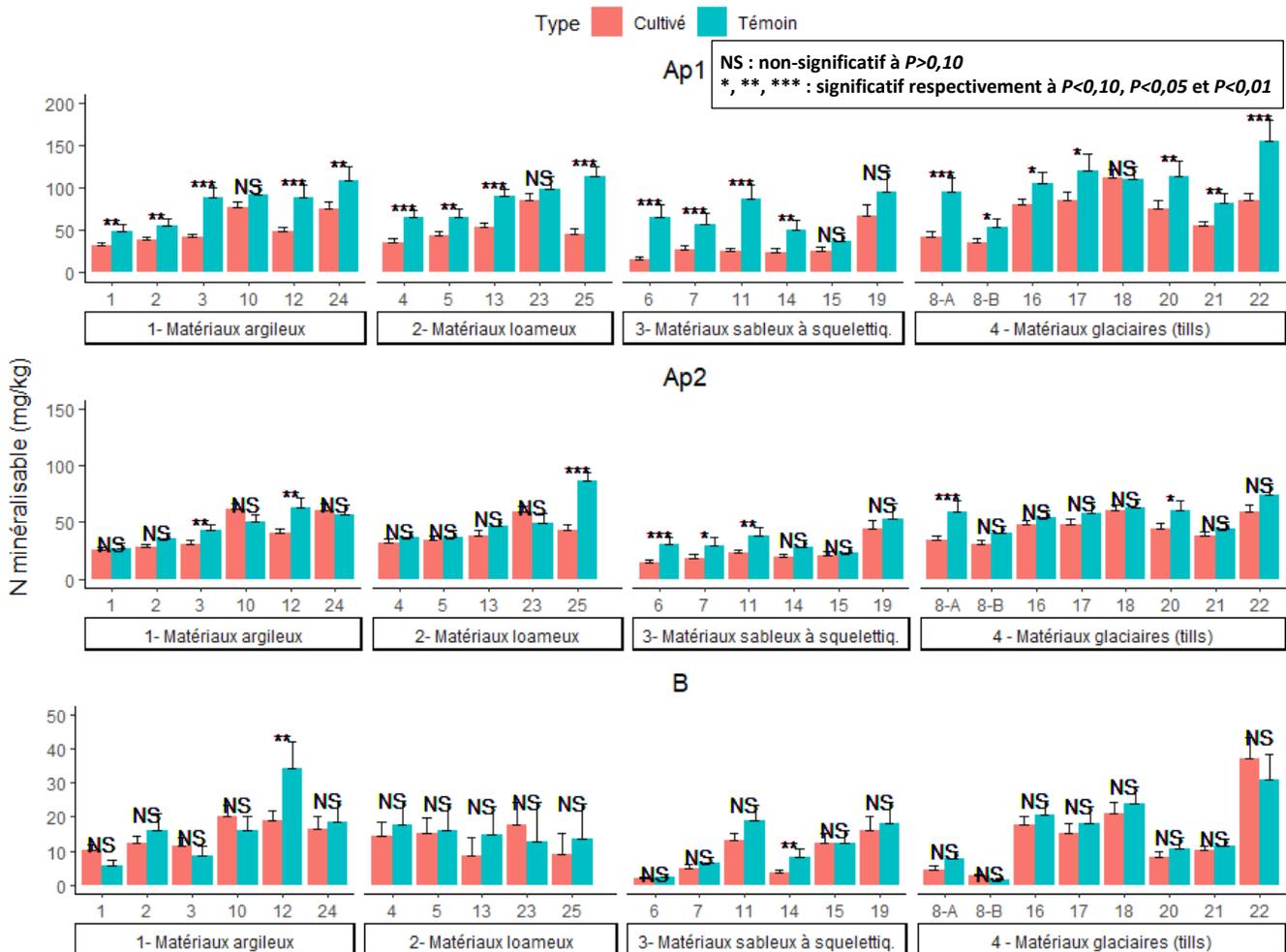


Figure 44 : Comparaison de l'azote minéralisable entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.

Les différences entre sols cultivés et sols témoins sont moins perceptibles dans l'horizon B, toutefois certains groupes de sols en régions plus méridionales (groupes 6, 7 et 14 en sols sableux à squelettiques et groupes 8 et 8-B sur tills) présentent une plus faible capacité de minéraliser de l'azote dans cet horizon.

La capacité du sol à dégager du CO₂ en incubation est significativement plus faible dans l'horizon Ap1 des sols cultivés de 22 des 25 groupes de séries de sols à l'étude (Figure 45). Dans l'horizon Ap2, elle est significativement différente entre sols cultivés et témoins dans 13 des 25 groupes de séries de sol et dans l'horizon B, 11 fois sur 25. Les sols sableux cultivés semblent présenter les plus faibles capacités de dégager du CO₂ dans l'horizon Ap1, tandis que certains sols argileux et tills cultivés présentent les plus hauts taux de dégagement en CO₂ potentiel dans l'horizon B. En général, tous les sols cultivés semblent présenter un déficit de dégagement en CO₂ par rapports aux sols témoins, mais celui-ci semble plus particulièrement important en termes relatifs dans l'horizon Ap1 et de certains sols sableux en particulier.

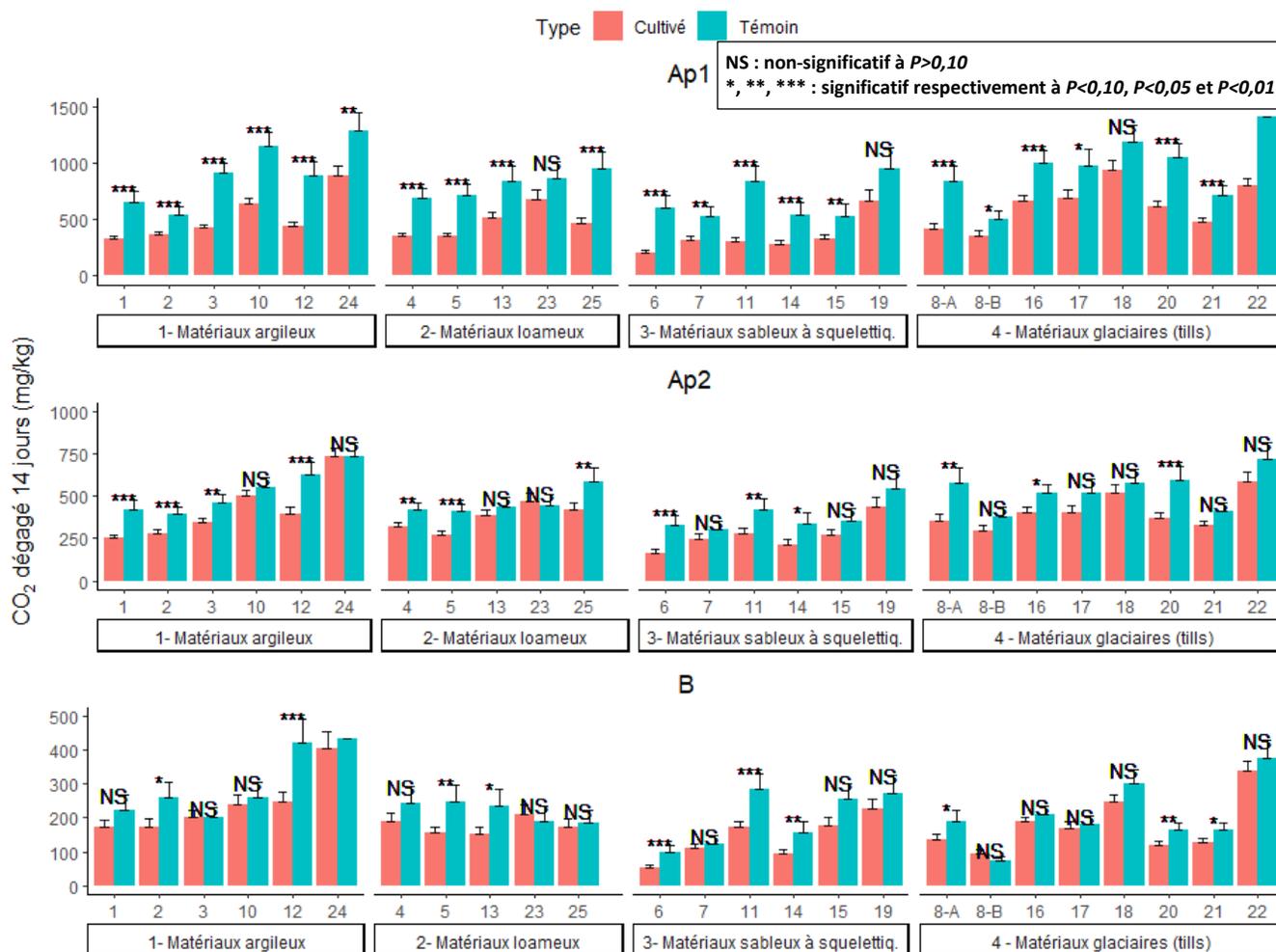


Figure 45 : Comparaison du CO₂ dégagé entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.

Comme pour la matière organique, l'effet du gradient climatique est aussi perceptible sur la respiration hétérotrophe pour un matériau donné et semble plus important entre sols témoins qu'entre sols cultivés des différents groupes. Le climat dicte le choix des cultures et l'intensité des pratiques agricoles; ce qui conditionne les niveaux de matière organique obtenus à l'état d'équilibre. Cependant, la capacité du sol à minéraliser de l'azote et du carbone est diminuée en général par les pratiques agricoles. La respiration hétérotrophe est plus faible dans les sols cultivés même en régions plus froides, alors qu'en conditions de sols témoins non-cultivés, la respiration hétérotrophe et la capacité du sol à minéraliser de l'azote seraient nettement plus élevées qu'en climat plus chaud

et que sous culture. En conditions froides, la minéralisation est plus lente et il y a accumulation de C et N potentiellement minéralisable dans les sols non perturbés, plus particulièrement dans les sols argileux (Groupes 10, 12 et 24) et certains tills (Groupes 18 et 22). À l'inverse, les sols sableux cultivés dans les régions plus méridionales (Groupe 6) accusent les plus faibles capacités de minéraliser C et N.

Acidité des sols

Les sols cultivés ont généralement un pH à l'eau plus élevé que les sols témoins en raison principalement du choix des sols témoins effectué sur des terres en friche, des bords de champ ou de clôture, des haies brise-vents, des prairies en bon état, etc. (Figure 47). Rappelons que ces sols témoins devaient être sous plantes pérennes et en meilleure condition physique, mais pour la plupart n'ont pas été entretenus ou chaulés récemment, expliquant les pH plus acides observés. Quelques sols cultivés, principalement des sols sableux (groupes 7, 11, 15 et 19) et des tills (groupes 17, 18 et 22), présentent néanmoins des pH eau inférieurs sinon à la limite de la valeur critique de 6 pour qualifier un sol de pH acide.

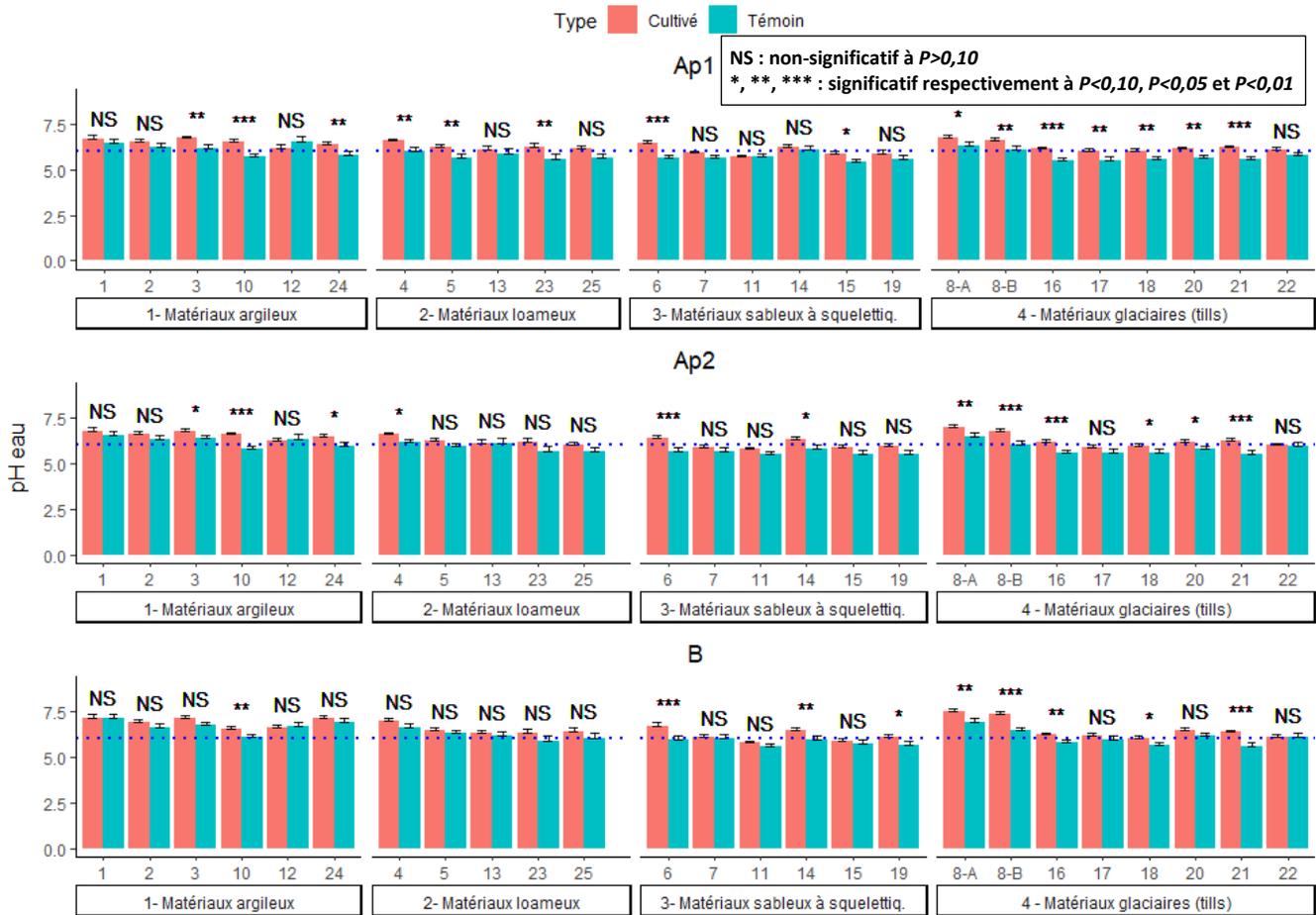


Figure 46 : Comparaisons des valeurs de pH eau entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.

Saturation des sols en phosphore

Les sols cultivés sont généralement plus saturés en P que les témoins, tels qu'en témoigne l'indice de saturation en P dans les différents matériaux (Figure 47). Dans certains cas, le niveau de saturation en P est supérieur à la valeur critique agroenvironnementale au-delà de laquelle les apports en P ne devraient pas dépasser les exportations de P liés à la récolte des cultures. Dans l'horizon Ap1, il s'agit du groupe 1 des sols argileux, du groupe 5 des sols loameux, des groupes 6, 11 et 14 des sols sableux et du groupe 8-B des tills. L'écart d'ISP entre sols cultivés et sols témoins, de même que les IPS atteints dans l'horizon B (groupes 11 et 15 par exemple), démontrent d'autres formes d'enrichissement en P atteints, plus fréquents dans les matériaux sableux à squelettiques et les tills.

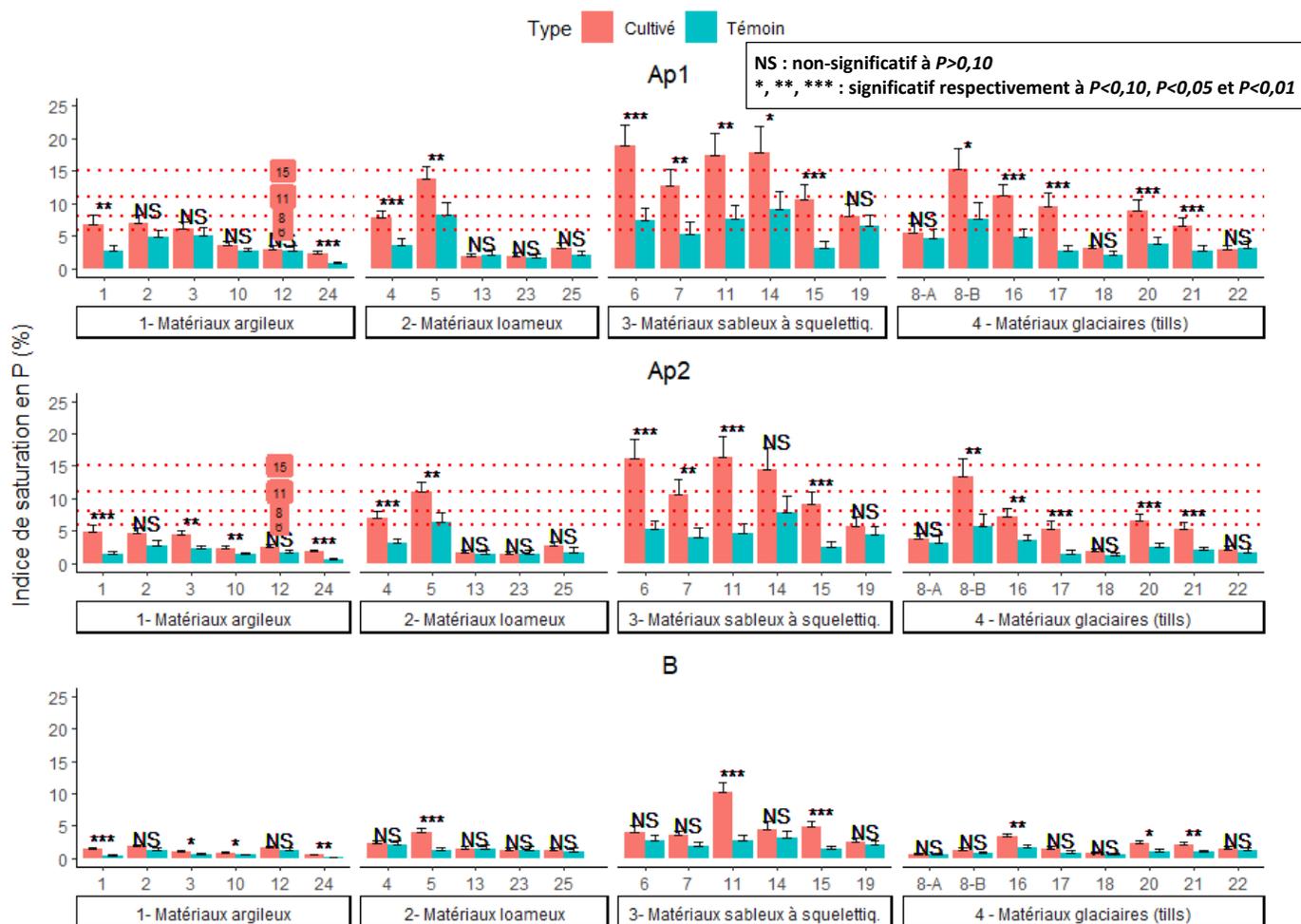


Figure 47 : Comparaison de l'indice de saturation en phosphore (ISP) entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.

Les sols sableux cultivés contiennent en moyenne plus de P_{M3} que les autres sols dans les horizons Ap1 et Ap2, et même dans l'horizon B de certains groupes, suggérant soit qu'ils reçoivent des apports de P plus importants que les autres sols ou que le P_{M3} s'accumule davantage dans ces sols par rapport aux autres sols, comme les sols

argileux, par exemple (Figure 48). L'accumulation significative de P_{M3} en profondeur dans l'horizon B des sols sableux des groupes 11 et 15 témoigne également d'apport important de P.

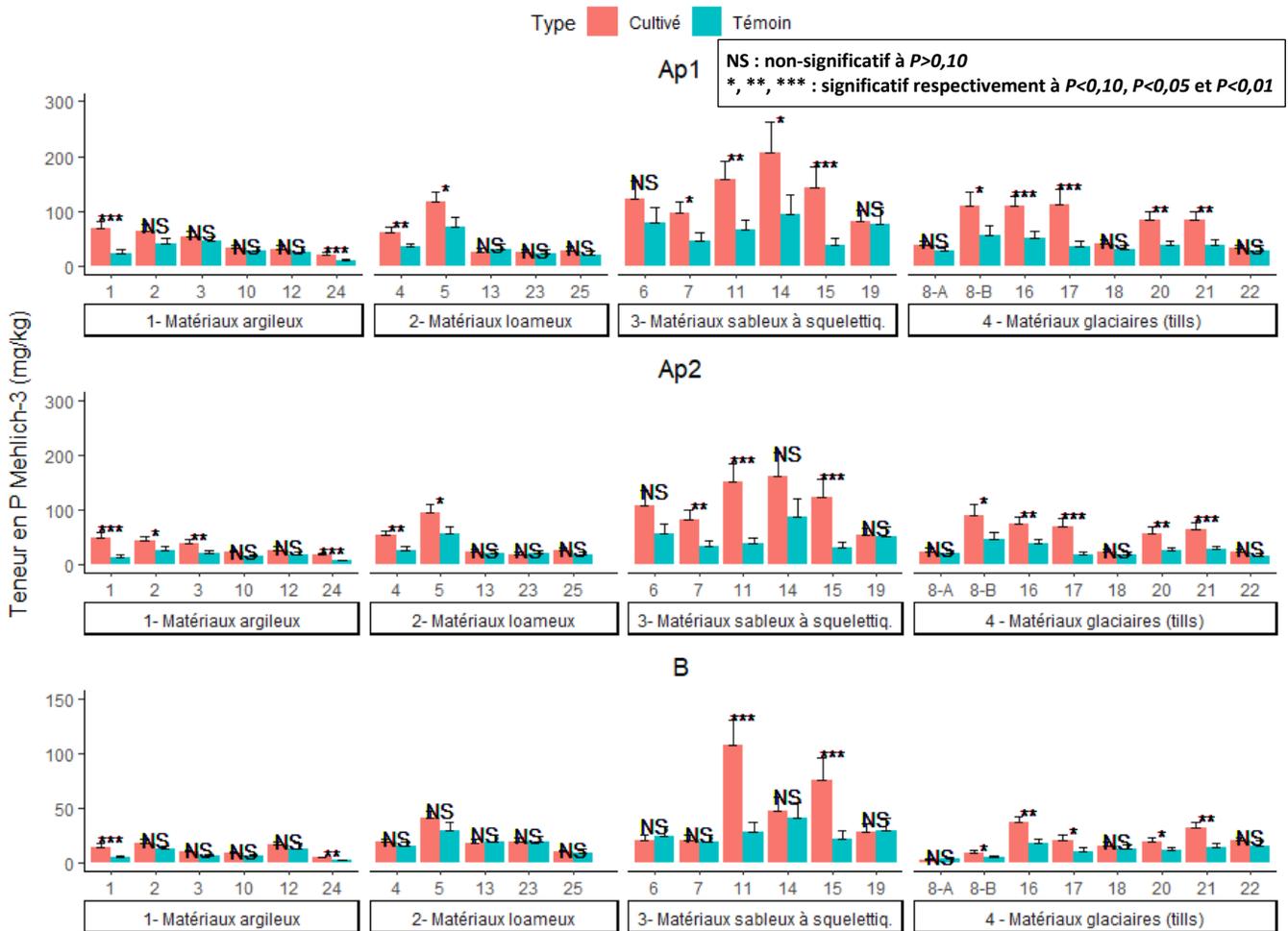


Figure 48 : Comparaisons des teneurs en P Mehlich-3 entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.

Accumulations de cuivre et de zinc

Les sols argileux et les tills cultivés ont plus fréquemment des teneurs plus élevées en Cu dans les horizons Ap1 et Ap2 par rapport aux sols témoins (Figure 49). Les sols sableux cultivés du groupe 15 (séries Morin et Beurivage) ont aussi des teneurs plus élevées en Cu dans les trois horizons. Les groupes de séries de sols 1, 8-B, 10, 15, 16, 17 et 20 présentent à cet effet des niveaux élevés de Cu, supérieurs à 2,8 mg/kg dans leur horizon Ap1.

Pour ce qui est du Zn, les teneurs sont plus souvent de niveau élevé et supérieures à 3,0 mg/kg dans les horizons Ap1 et Ap2 des tills et des sols sableux cultivés ou témoins (Figure 50). Elles sont aussi plus élevées et supérieures à 3,0 mg/kg dans l'Ap2 des groupes 4 et 5 en sols loameux cultivés, tandis que dans les sols argileux les différences entre sols cultivés et témoins sont pratiquement inexistantes. Les plus faibles teneurs dans les sols argileux cultivés

du Saguenay-Lac-Saint-Jean (groupe 12) et l’Abitibi-Témiscamingue (groupe 24) pourraient même indiquer des carences en Zn.

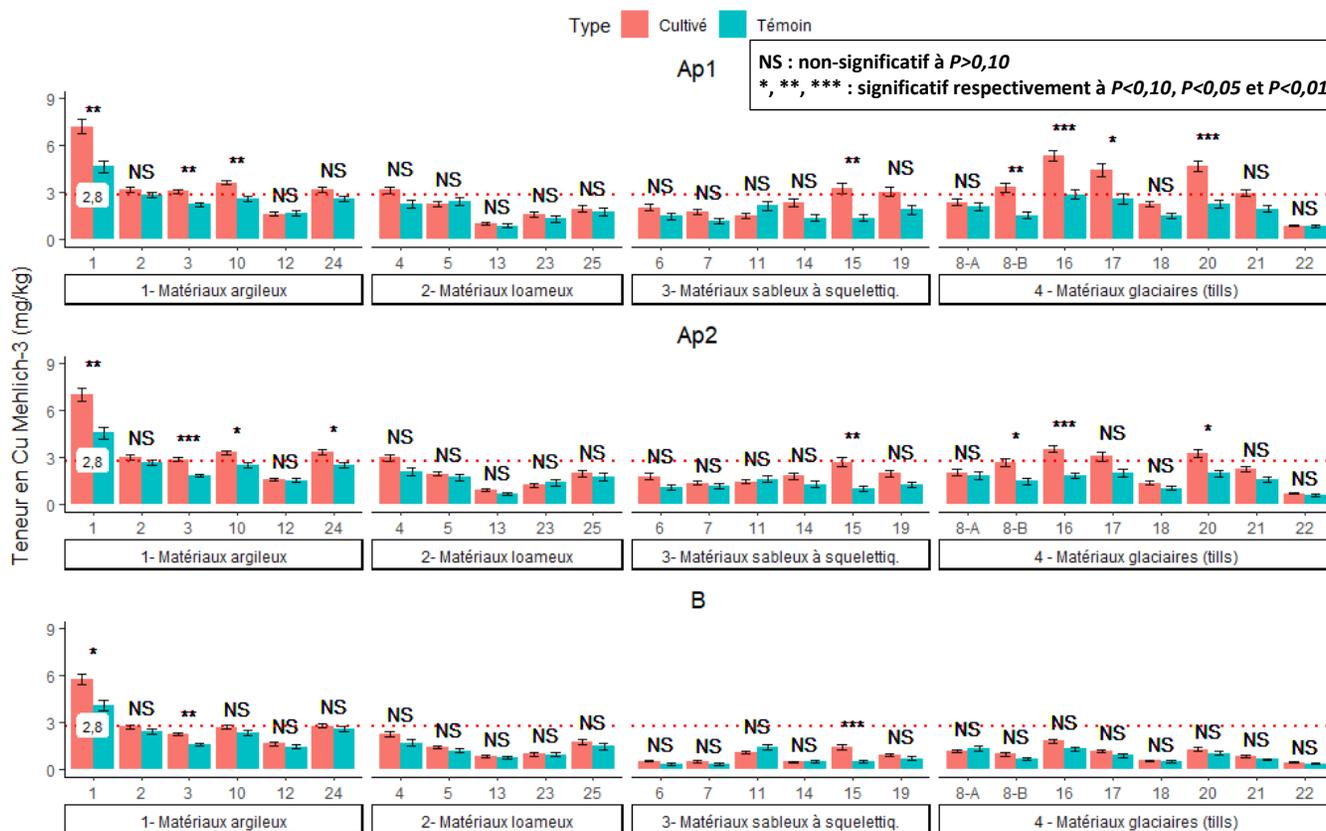


Figure 49 : Comparaisons des teneurs en Cu Mehlich-3 entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.

Les engrais et amendements organiques, notamment les effluents d’élevage constituent des sources et des apports importants de P, Cu et Zn aux sols. Les groupes de sols en régions plus méridionales allant jusqu’en Estrie et Chaudière-Appalaches présentent plus fréquemment des teneurs élevées en P, Cu, Zn reliées à des apports plus fréquents dans ces régions où les productions animales se concentrent, mais les niveaux d’enrichissements de ces différents éléments varient en fonction des types de sols ou des matériaux. Ainsi le P et Zn extraits en solution Mehlich-3 s’accumulent davantage dans les sols plus sableux, tandis que le Cu Mehlich-3 s’accumulent davantage dans les sols argileux. Les tills et les sols de texture intermédiaire (loameux) réagissent de façon intermédiaire.

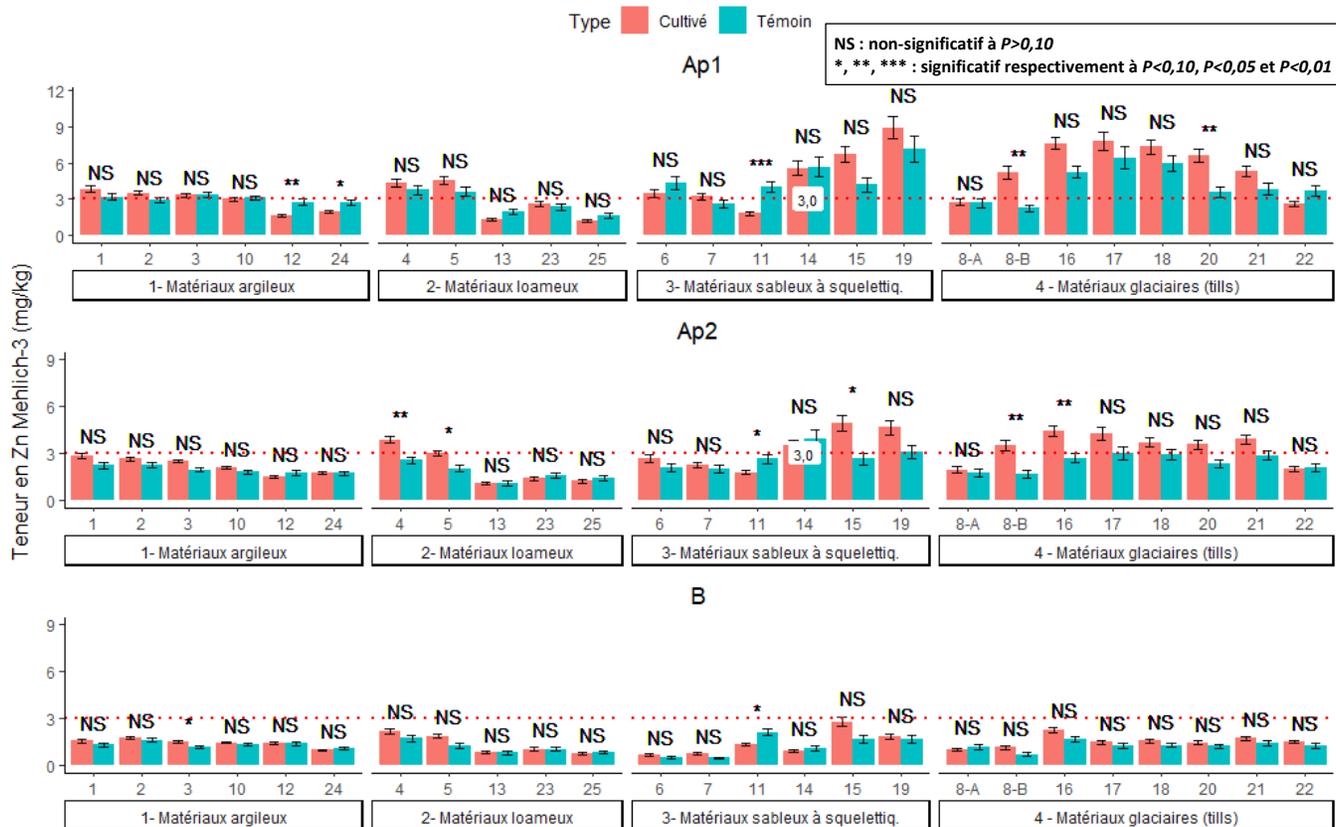


Figure 50 : Comparaisons des teneurs en Zn Mehlich-3 entre sols cultivés et témoins dans les horizons Ap1, Ap2 et B de 25 groupes de séries de sols minéraux.

Conclusion sur les phénomènes de dégradation observés

Les phénomènes de compaction profonde observés sur la **masse volumique apparente** et la **porosité totale** de l'horizon B sont plus fréquents dans les sols sableux et les tills. Cette compaction semble toutefois augmenter dans l'horizon Ap2 des sols argileux et loameux dans les groupes de séries de sols en régions plus méridionales, plus fréquemment sous cultures annuelles.

La compaction profonde dans l'horizon B se manifeste aussi dans les sols argileux, loameux et sur tills cultivés dans les régions plus méridionales sous forme de diminution de la **macroporosité** et de l'aération à un niveau inférieur au seuil critique de 10 %. À l'inverse, dans l'horizon B des sols sableux à squelettiques, la **macroporosité** n'est pas significativement différente entre sols cultivés et témoins. Elle demeure relativement plus élevée et dans un état moins critique.

Les mêmes conclusions peuvent être tirées à partir de la **capacité au champ relative**. Elle est presque toujours supérieure au seuil critique de 0,7 dans l'horizon B de tous les sols sauf les sols sableux à squelettiques et significativement plus élevées dans certains groupes de sols argileux et loameux cultivés en régions plus méridionales, indiquant un manque d'aération et de capacité de diffusion des gaz. À l'inverse dans les sols sableux plus intensivement cultivés, lorsque la **capacité au champ relative** est inférieure au seuil de 0,6 dans l'horizon Ap1, elle indique un manque de capacité de rétention en eau.

Les effets sur la **diffusivité relative des gaz** sont aussi similaires à ceux sur la macroporosité et la capacité au champ relative, mais permettent d'observer des effets plus spécifiques sur les risques de dénitrification et les conditions limitant la croissance racinaire, dont les sols argileux, loameux et fois les tills sont plus souvent sujets.

Tous les sols argileux et loameux cultivés, de même que trois groupes de tills cultivés présentent des valeurs de **conductivité hydraulique saturée** inférieures à 10 cm/jour dans l'horizon B qui pourraient nous amener à conclure qu'ils souffrent tous de compaction, mais certains sols témoins présentent aussi naturellement de faibles conductivités hydrauliques.

Tous les groupes de sols en régions plus méridionales présentent des signes de dégradation de la **stabilité structurale** dans l'horizon Ap1, cependant la grosseur des agrégats affectée varie selon les matériaux.

L'**érosion** des sols cultivés est moins importante dans les sols organiques et les sols loameux. Elle est un peu plus élevée dans les sols argileux et plus importante dans les sols sableux et les tills. Dans ces derniers, la perte moyenne de sols est supérieure à la limite de 6 t/ha/an. Les conditions topographiques expliquent une faible part de l'érosion des sols, tandis que leur association aux régions pédologiques en expliquerait une part plus importante, du fait qu'elles intègrent les effets du type de matériau parental, des conditions topographiques et de l'intensité des pratiques agricoles.

Pour ce qui est de la **matière organique (M.O.)** et de la **capacité du sol à minéraliser de l'azote ou du carbone**, il semble y avoir un fort gradient climatique entre les groupes de sols d'un même matériau. Les différences entre sols cultivés et témoins sont aussi plus marquées dans les horizons Ap1 et Ap2.

Les sols sableux à squelettiques cultivés ont généralement de plus faibles teneurs en **M.O.**, une plus faible **capacité à minéraliser de l'azote** et ces effets se manifestent aussi en profondeur dans l'horizon B. Ce phénomène se constate aussi dans les tills cultivés en régions plus méridionales. Les sols cultivés se différencient plus particulièrement des sols témoins sélectionnés pour la plupart sous friches, bandes enherbées ou plantes pérennes, par un plus faible potentiel de dégager du CO₂ ou de minéraliser de l'azote sous incubation.

Les sols sableux cultivés possèdent une plus grande **macroporosité** et aération en surface dans l'horizon Ap1, mais dégagent moins de CO₂ en incubation car **leur réserve en C assimilable** est plus faible alors que les sols argileux présentent une plus faible macroporosité ou aération en profondeur dans l'horizon B, mais une plus grande capacité de respiration en incubation démontrant des réserves de C assimilable plus élevées.

Les sols des régions où les élevages se concentrent présentent plus souvent des teneurs plus élevées en **P, Cu et Zn Mehlich-3**, approchant et parfois dépassant les valeurs critiques retenues comme seuils de saturation en P. Les accumulations de P, de Cu et Zn Mehlich-3 semblent toutefois varier en fonction des types de sols ou de matériaux et une analyse plus approfondie serait nécessaire pour vérifier sous quelles autres formes se retrouvent ces éléments accumulés, s'ils migrent en profondeur dans le profil ou s'ils sont plutôt exportés vers les eaux de surface.

Faits saillants

- Les phénomènes de dégradation des propriétés physiques et celles reliées à la matière organique des sols cultivés sont plus fréquemment observés dans les régions plus méridionales du Québec, dans la plaine de Montréal et le Centre du Québec où les cultures annuelles sont plus présentes et intensives.
- La dégradation des propriétés physiques dans l'horizon B est plus critique, car elle est plus difficile à corriger. Les processus d'échanges d'air et l'écoulement de l'eau sont plus fréquemment affectés à cette profondeur et limitant dans les sols argileux, loameux et certains tills, surtout en régions plus méridionales.
- Les sols sableux à squelettiques et certains tills peuvent être plus compacts en profondeur, mais ne devraient pas rencontrer les mêmes limitations. Ces sols démontrent plutôt une plus faible capacité de rétention en eau en profondeur inhérente au matériau.
- En surface, la structure du sol est aussi plus souvent dégradée dans les sols des régions plus méridionales sous cultures intensives, mais la grosseur des agrégats affectée varie selon le type de matériaux.
- L'intensité des pratiques agricoles et du travail de sol de même que la compaction engendrée par le passage de la machinerie de plus en plus lourde sont certainement responsables des problèmes plus importants remarqués en profondeur dans le sol au niveau des processus d'aération et d'infiltration de l'eau dans les sols plus lourds, de même que de rétention en eau dans les sols plus légers.
- Ces pratiques plus intensives conditionnent aussi l'érosion des sols en interaction avec les conditions topographiques et le type de matériau parental.
- La teneur en matière organique du sol et sa capacité à se minéraliser est affectée à la baisse par l'intensité des pratiques en lien avec le climat et atteint des niveaux plus critiques dans les sols sableux à squelettiques.
- Les phénomènes d'accumulation de P, Cu et Zn Mehlich-3 dans les sols sont davantage reliés à la gestion des engrais de ferme et aux régions où se concentrent les élevages.

ÉVOLUTION DES PHÉNOMÈNES DE DÉGRADATION DES SOLS DEPUIS 1990

À partir des constats réalisés ci-haut sur certains groupes de séries de sols à l'orée de 2020, les principales formes de dégradation des sols ont été résumées et comparées à la synthèse élaborée dans l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols de 1990 (Tabi et al., 1990), afin d'évaluer comment ces phénomènes ont évolué depuis les trente dernières années. Dans une deuxième étape, une comparaison a été réalisée à partir de données relevées sur un nombre plus restreint de sites échantillonnés à la fois en 1990 et en 2020.

Comparaison des constats réalisés dans les deux études

Dans l'Inventaire de 1990, les sols sous monocultures ont été comparés à des sols sous prairies. Les principales formes de dégradation observées à l'époque étaient la détérioration de la structure, la surfertilisation, la diminution de la matière organique (M.O.), l'acidification et la compaction. La surfertilisation n'a pas été comparée avec les résultats de l'EESSAQ dans ce constat général, car la méthodologie différait d'un inventaire à l'autre. L'Inventaire de 1990 utilisait un seuil de signification de la probabilité inférieur à 0,05; par conséquent les données de l'EESSAQ ont été ici réanalysées et comparées sur une même base de $P < 0,05$.

Dans l'Inventaire de 1990, la compaction a seulement été évaluée dans les sols du groupe G1 dont la texture variait d'argile à loam argileux, avec des mesures de masse volumique apparente (MVA) et de macroporosité. Seuls les sols de ce groupe peuvent être comparés aux sols de l'EESSAQ. Pour la détérioration de la structure, les mesures prises au laboratoire pour déterminer le diamètre moyen pondéré (DMP) des agrégats diffèrent légèrement entre les deux inventaires, les grosseurs de tamis n'étant pas les mêmes. Une comparaison quantitative de l'évolution du DMP et de la proportion d'agrégats stables à l'eau sur les trente dernières années n'est pas possible, mais la comparaison de l'évolution des différences significatives entre sols cultivés et sols témoins a été tentée. Sur les 25 groupes de séries de sols échantillonnés dans la présente étude, 23 groupes ont fait partie, en tout ou en partie, de l'Inventaire de 1990 (Tableau 149).

Compaction

Le phénomène de compaction semble vraisemblablement s'estomper dans l'ensemble des sols argileux du Québec depuis 1990, avec seulement trois groupes de séries de sol déclarés compacts dans l'EESSAQ, dont deux l'étaient également il y a 30 ans (Tableau 149). On remarque une amélioration de la situation pour trois groupes de sols argileux situés en régions plus nordiques. Le constat est légèrement différent pour les sols loameux, où trois groupes sont toujours à ce jour compacts, soit les groupes 4, 5 et 23. Les groupes 13 et 25 respectivement au Saguenay-Lac-Saint-Jean et Abitibi-Témiscamingue semblent toutefois en meilleur état que dans l'Inventaire de 1990.

Fait intéressant à souligner, les sols sableux à squelettiques ainsi que les sols glaciaires (tills) sont pour la plupart tous plus compacts que les sols témoins en 2020, à l'exception de deux groupes, les groupes 19 (sableux) et 18 (glaciaires). Cependant, il n'a pas été possible d'évaluer s'il s'agit d'une progression de ce phénomène depuis les trente dernières années, puisque la MVA n'a pas été évaluée dans la majorité de ces sols en 1990. Bien que tous les sols soient susceptibles à la compaction, les sols à texture plus grossière, surtout lorsqu'ils ont de plus faibles teneurs en matière organique, sont généralement plus enclins à former une matrice dense avec une faible macroporosité sous l'effet des passages de la machinerie ou du travail intensif de sol (Batey, 2009; Huang et Hartemink, 2020).

Tableau 149 : Évolution des phénomènes de dégradation observés par groupe de séries de sol.

Phénomènes de dégradation			Compaction	Détérioration de la structure	Acidification	pH faible (<6)	Diminution de la matière organique
Matériaux	Groupe-série	Série					
Argileux	1	Sainte-Rosalie*, Saint-Urbain*					
	2	Dalhousie*, Saint-Laurent*, Kierkoski					
	3	Providence*, Rideau*, Saint-Blaise*, Chambly					
	10	De l'Anse*, Kamouraska*, La Pocatière*, Saint-Pascal*					
	12	Hébertville*, Normandin*					
	24	Guérin*, Palmarolle*, Roquemaure*					
Loameux	4	Beaudette*, Lévrard*, Sainte-Barbe*, Saint-Hyacinthe*					
	5	Chaloupe*, Des Sauteurs*, Saint-Aimé*, Le Bras					
	13	Alma*, Taillon*					
	23	Bouchette*, Montcerf					
	25	Baby*, Duhamel*					
Sableux à squelettique	6	Aston*, Saint-Damase	X**				
	7	Achigan*, Valère*, Joseph	X			X	
	11	Orléans*, Saint-Nicolas*, Saint-André*	X			X	
	14	Saint-Jude*, Uplands*	X				
	15	Beaurivage*, Morin*	X			X	
	19	Danby*, Saint-Bruno*				X	
Glaciaires (Tills)	8-A	Boucherville*, Bedford*					
	8-B	Rimbault*, Sainte-Brigide*					
	16	Mawcook*, Sainte-Marie*, Woodbridge*, Norbertville	X				
	17	Shefford*, Blandford	X			X	
	18	Chapais, Charlevoix, Leeds				X	
	20	Calais*, Dufferin*, Magog*	X				
	21	Ascot*, Greensboro*, Sherbrooke*	X				
	22	Amqui, Comis, Quisibis	X			X	X

*Série de sols évaluée dans le cadre de l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec (Tabi et al., 1990).

** Les cases blanches munies d'un X représentent un phénomène observé en 2020 mais sans données en 1990.

*** Les phénomènes sont rapportés lorsqu'ils sont significatifs à $P < 0,05$.

Légende :

Phénomène observé en 1990 et 2020	Phénomène observé en 2020 seulement	Phénomène non observé en 1990 et 2020	Phénomène observé en 1990 seulement	Pas de données en 1990
-----------------------------------	-------------------------------------	---------------------------------------	-------------------------------------	------------------------

Détérioration de la structure

Onze des 23 groupes de sols comparés présentaient en 2020 des diamètres moyens pondérés des agrégats (DMP) ou des fractions d'agrégats > 2 mm plus faibles dans les sols cultivés par rapport aux sols témoins. La détérioration de la structure se poursuit depuis les 30 dernières années dans les sols des régions plus méridionales (groupes 1, 3, 4, 6, 7, 8-A, 8-B, 11, 15, 16 et 21, mais semble moins importante dans les autres régions.

En 1990, la détérioration de la structure des sols avait été considérée comme le problème de dégradation le plus répandu au Québec, arrivant en tête de tous les phénomènes et ce dans toutes les régions agricoles à l'exception du Saguenay – Lac Saint-Jean – Côte-Nord, où il arrivait deuxième. Les auteurs affirmaient que jusqu'à 90% des sols sous monoculture étaient affectés par ce phénomène, principalement causé par la fréquence du travail de sol et la baisse de matière organique (Tabi et al., 1990).

Or, bien que le phénomène reste assez préoccupant pour la santé des sols de la province, il se dégage une tendance à l'amélioration, avec 11 groupes où il n'existe plus de différence significative entre les sols cultivés et témoins. Il y aurait intérêt à vérifier si les changements des pratiques agricoles des dernières années, notamment l'essor du travail réduit, pourrait avoir un effet sur cette légère tendance qu'on pourrait qualifier de ralentissement de la progression de la détérioration de la structure des sols.

Acidification

L'acidification des sols avait été observée dans 18 groupes de séries de sols en 1990, mais aucun groupe n'a présenté de diminution significative de pH dans le présent inventaire. Cependant, avant de conclure que ce phénomène n'est plus présent dans les sols québécois, il importe de nuancer que les sols témoins du présent inventaire sont difficilement comparables aux sols témoins échantillonnés en 1990. Certains sols témoins de l'EESAAQ comme ceux sous friches ou boisés ne sont plus chaulés et sont pour cette raison plus acides que les sols témoins sous prairie de l'Inventaire de 1990, ce qui pourrait biaiser légèrement l'interprétation.

Pour cette raison, les groupes de sols échantillonnés dans le cadre de l'EESAAQ présentant un pH acide inférieur à 6,1 ont été identifiés et ajoutés au tableau pour fin de comparaison et à titre exploratoire. Quatre groupes de sols sur matériaux sableux à squelettiques ont un pH inférieur à 6,1 et de ces quatre groupes, un seul, le groupe 7, n'a pas été considéré comme étant en processus d'acidification dans l'Inventaire de 1990. Même à l'époque, l'acidification n'avait pas été considérée comme un phénomène d'envergure sur l'ensemble des sols agricoles québécois, et bien que la prudence soit de mise surtout lorsqu'il est question d'application d'engrais acidifiants, le même constat s'applique aujourd'hui.

Diminution de la matière organique

Dans la présente étude, neuf groupes sur 23 ont une teneur en matière organique (M.O.) plus faible dans les sols cultivés par rapports aux témoins, alors qu'ils étaient 16 il y a trente ans dans les sols sous monocultures par rapport aux prairies. Dans les sols sableux/squelettiques et les tills, la baisse de M.O. semble se poursuivre comme en 1990 dans les régions plus méridionales (Montérégie, Centre du Québec, Estrie, Chaudière-Appalaches, Capitale-Nationale). Dans les sols argileux, les diminutions des teneurs en M.O. se poursuivent autant dans le groupe 3 en Montérégie que dans le groupe 12 au Saguenay-Lac-Saint-Jean, mais les diminutions de M.O. ne sont plus aussi importantes dans les autres sols argileux.

Les sols loameux sont ceux où ce phénomène de dégradation semble avoir diminué. Sur les cinq groupes de séries de sols loameux étudiés, on ne note plus de baisse de M.O. entre sols cultivés et témoins dans trois groupes (4, 5

et 25) où le phénomène avait été identifié en 1990, mais leurs teneurs en M.O. demeurent plus faibles en moyenne par rapport aux deux autres groupes (13 et 23). Cette amélioration récente est notable aussi pour trois des six groupes de sols argileux (groupes 1, 10 et 24) et deux groupes de sols sableux à squelettiques (groupes 15 et 19).

Cependant, le constat semble différent pour les sols glaciaires (tills), la diminution de M.O. se poursuit dans les groupes 8-A, 20 et 21, alors qu'une diminution plus récente est observée dans le groupe 8-B. Dans les sols sableux, la baisse de M.O. est observée dans trois des six groupes. Les sols à texture plus grossière semblent donc comme il y a 30 ans, plus susceptibles à cette forme de dégradation que les sols argileux et loameux.

Comparaison sur des sites rééchantillonnés

Au moment de la sélection des sites dans le cadre de l'EESSAQ, certains sites de l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols (Tabi et al., 1990) ont été sélectionnés pour faire partie de l'échantillon et/ou valider le concept de la série par les pédologues sur le terrain. La géolocalisation exacte des sites échantillonnés en 1990 étant imprécise dans certains cas, une validation de la série de sol, de la profondeur de l'horizon perturbé et finalement du numéro de lot a été menée. À l'étape de l'analyse des données, une dernière validation a été effectuée en vérifiant que les paramètres texturaux des sols (teneurs en argile, en limon et en sable) concordaient entre les deux inventaires. Les sites présentant une trop grande variabilité intra-site et inter-inventaires dénotant une possible erreur de géolocalisation en 1990, ont été retirés afin d'éviter de fausses comparaisons. Sur les 425 sites de sols minéraux échantillonnés dans le cadre de la présente étude, 63 ont finalement été sélectionnés pour faire partie de cette analyse comparative. Les indicateurs de santé des sols déterminés en 1990 et retenus pour fins de comparaison sont :

- La masse volumique apparente (MVA), mesurée en g/cm^3 ;
- La macroporosité, mesurée en cm^3/cm^3 ;
- Le pH eau (1 :1);
- La teneur en M.O., calculé par multiplication du C organique (méthode Walkley-Black) par 1,724;
- Azote total, déterminé par la méthode Kjeldahl (Carter et Gregorich, 2008);
- Indice de saturation en phosphore (ISP), calculé à l'aide de P et Al extrait Mehlich-3, en mg/kg;
- Le cuivre extrait Mehlich-3, en mg/kg;
- Le zinc extrait Mehlich-3, en mg/kg.

Analyse statistique

Les trois horizons diagnostiques de la présente étude ont été regroupés en deux horizons, Ap et B, pour mieux refléter l'échantillonnage réalisé par les équipes de Tabi et al. (1990). La moyenne des horizons Ap1 (0-10 cm) et Ap2 (10-25 ou 15-30 cm) de l'EESSAQ a été utilisée pour comparer les résultats à la couche 1 de l'Inventaire de 1990 (0-20 cm de profondeur). L'horizon B (profondeur inférieure de l'Ap +15 cm) a été comparé directement à la couche 2 de 1990 (20-40 cm de profondeur).

Les protocoles d'échantillonnage diffèrent d'un inventaire à l'autre, chaque site (champ) étant composé de sept points d'échantillonnage (PE) dans l'Inventaire de 1990 et de quatre PE dans l'EESSAQ. L'analyse statistique a donc été réalisée en comparant la moyenne des observations obtenues sur chaque PE des deux inventaires et en pondérant chaque moyenne avec la différence de la variance intra-sites, selon la formule suivante :

$$\text{Pondération du modèle} = \frac{1}{\sigma^2(Y_{2020}) + \sigma^2(Y_{1990})}$$

où : $\sigma^2(Y_{2020})$: La variance entre PE du présent inventaire.

$\sigma^2(Y_{1990})$: La variance entre PE de l'Inventaire de 1990 (Tabi et al., 1990).

Résultats

La comparaison des champs rééchantillonnés révèle une relativement faible évolution des indicateurs de santé des sols depuis les 30 dernières années (Tableau 150). On dénote une tendance à l'augmentation de la masse volumique apparente (MVA) et de la compaction des sols, mais elle n'est pas statistiquement significative. Il faut cependant rappeler que l'analyse des propriétés physiques des sols se base sur un nombre restreint de sites (n = 30), puisque l'analyse de ces propriétés n'a été réalisée que dans les sols argileux et loameux sans fragments grossiers (Groupe 1) dans l'Inventaire de 1990. Il serait peu prudent d'interpoler ces résultats à l'ensemble des sols argileux et loameux de la province, étant donné que les valeurs moyennes des champs sont assez dispersées autour de la droite du modèle (Figure 51 et Figure 52) et que ces résultats vont à l'encontre de la tendance observée à l'échelle des groupes de séries de sol mentionnée au Tableau 149.

Tableau 150 : Évolution des indicateurs physiques et de chimie-fertilité des sols obtenue entre 2020 et 1990 dans l'horizon Ap (0-20 cm) et B (20-40 cm).

Descripteurs	Horizon Ap			Horizon B		
	Nombre de sites	Variation absolue	Variation relative (%)	Nombre de sites	Variation absolue	Variation relative (%)
MVA (g/cm ³)	30	+ 0,022	+ 1,7	31	+ 0,018	+ 1,2
Macroporosité (cm ³ /cm ³)	30	+ 0,01	+ 9,7	31	+ 0,006	+ 8,3
M.O. (%)	63	- 0,304	- 6,1	63	- 0,125	- 5, 6
pH	63	+ 0,038	+ 0,5	63	+ 0,162	+ 2,5
ISP (%)	63	+ 1,000	+ 12,4	63	+ 0,215	+ 7,7
N total (%)	63	- 0,021	- 9,8	63	- 0,005	- 5,1
Cu _{M3} (mg/kg)	63	- 0,002	- 0,1	63	+ 0,006	+ 0,3
Zn _{M3} (mg/kg)	63	+ 0,443	+ 14,9	63	+ 0,300	+ 22,8

Les valeurs en gras indiquent des valeurs significativement différentes entre les deux inventaires à P < 0,10.

La teneur en matière organique et la teneur en N total tend à diminuer significativement dans l'horizon Ap, mais pas dans l'horizon B. Le taux de diminution de la M.O de 0,3% dans l'horizon Ap en surface n'est toutefois pas négligeable. Rapporté sur une base annuelle de pertes de C organique cette diminution équivaut à 0,006 % C/an soit de l'ordre de grandeur de la diminution de 0,008 % C/an rapporté par Warren et al. (2020) pour décrire l'évolution des teneurs en C dans l'horizon de surface Ap des études pédologiques de l'Ontario entre 1950 et 2020. On note également une augmentation significative, mais négligeable, des valeurs de pH dans l'horizon B, ce qui permet de valider l'absence de tendance à l'acidification mentionnée préalablement.

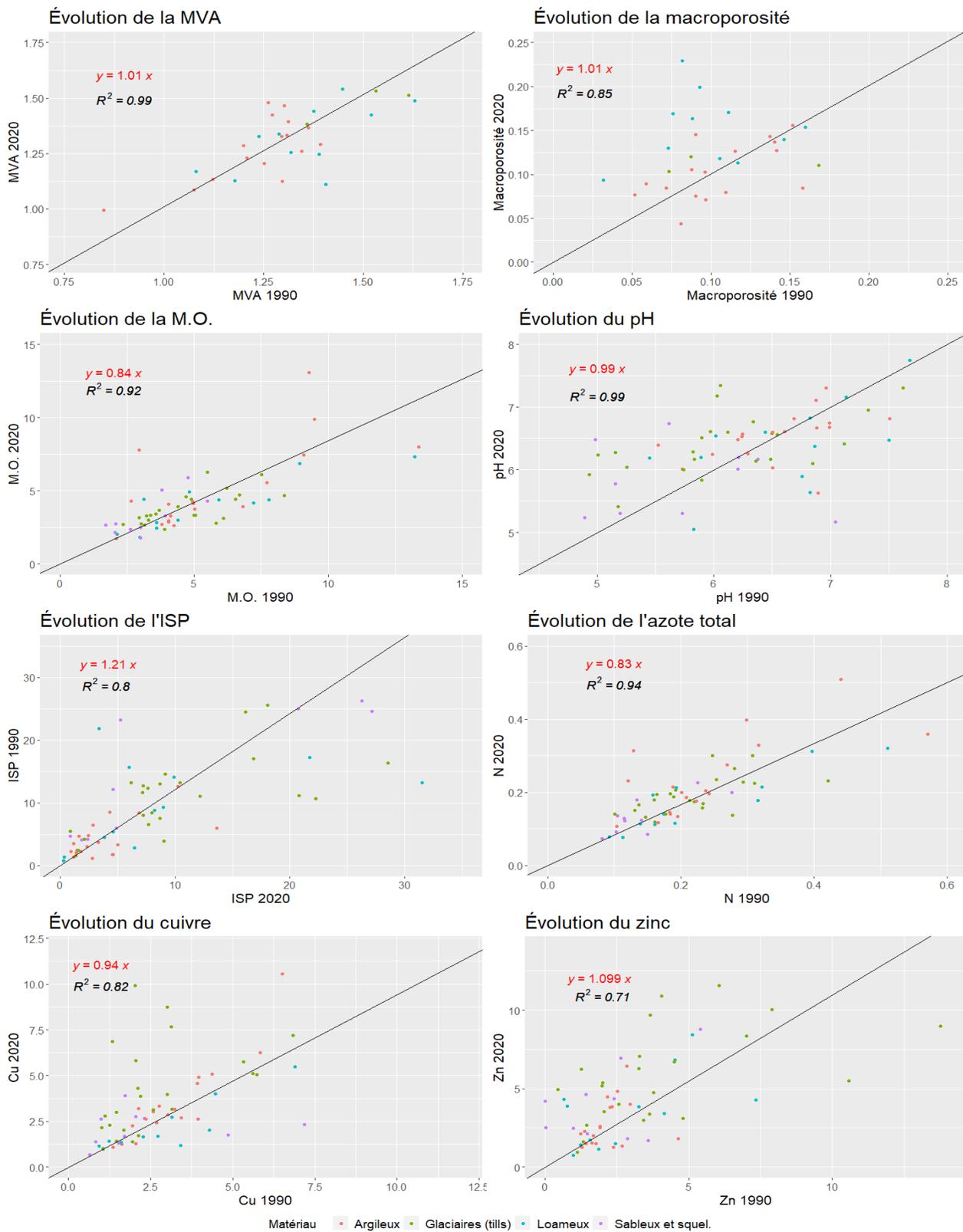


Figure 51 : Évolution des indicateurs de santé des sols dans l'horizon Ap.

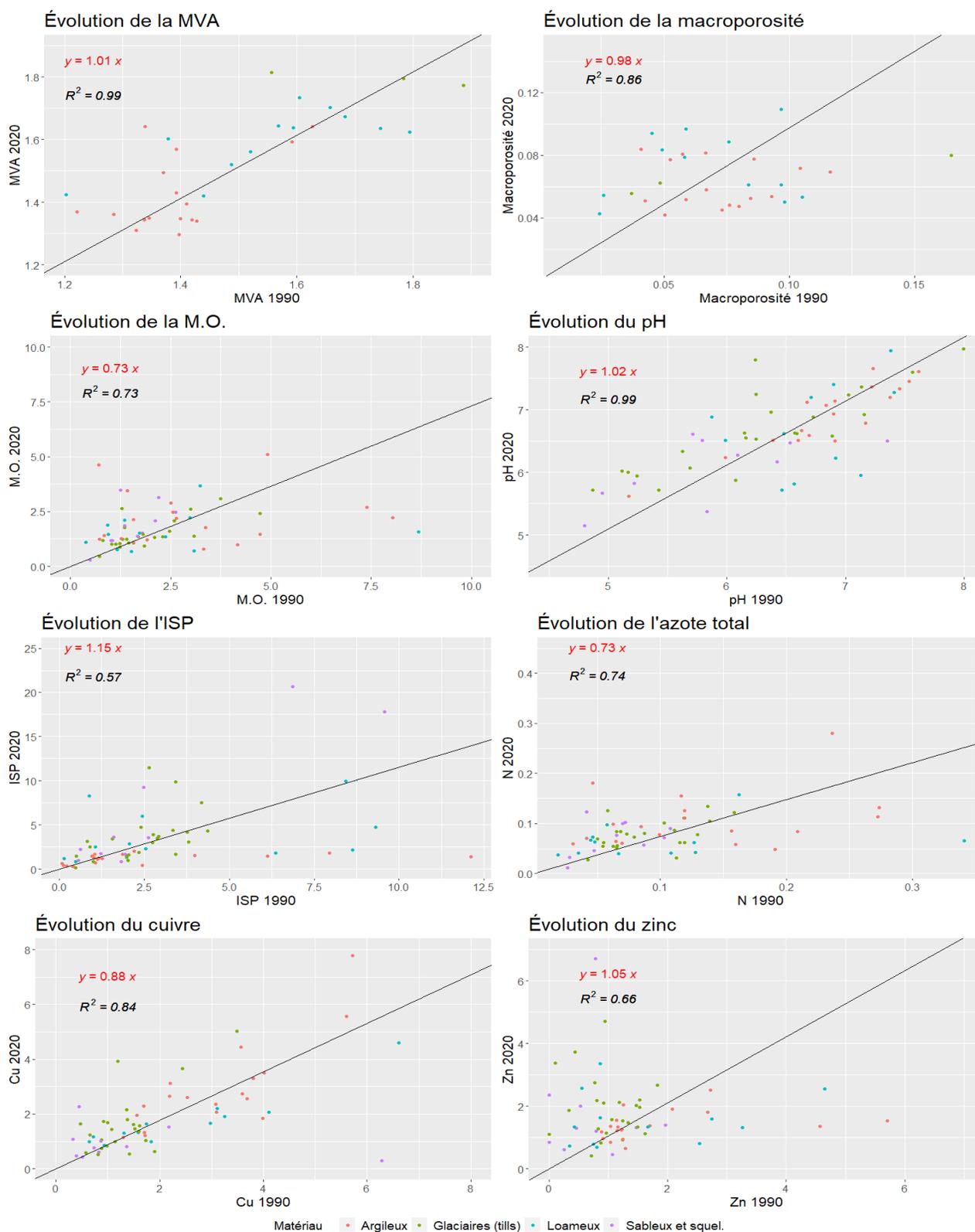


Figure 52: Évolution des indicateurs de santé des sols dans l'horizon B.

Conclusion sur l'évolution des phénomènes de dégradation

La comparaison des constats généraux entre les deux études n'indique pas de grande tendance de détérioration de la santé des sols, mais plutôt des tendances à l'amélioration. La comparaison de certains indicateurs sur un nombre restreint de sites n'indique pas non plus de grand changement sauf une légère baisse en matière organique et une augmentation de la saturation des sols en phosphore.

Pour ce qui est de la compaction des sols, on pourrait conclure à une légère amélioration dans les sols argileux et loameux en régions plus nordiques. Les sols cultivés sur matériaux sableux à squelettiques et sur tills apparaissent tous plus compacts en 2020 par rapport aux sols témoins, mais le niveau de compaction de la plupart de ces sols n'avait pas été évaluée en 1990. La masse volumique apparente ne semble pas avoir évolué non plus sur les quelques 30 sites rééchantillonnés, ni en surface dans l'horizon Ap, ni en profondeur dans l'horizon B. La détérioration de la structure est toujours existante dans les régions plus méridionales, mais elle n'est plus aussi préoccupante qu'en 1990, puisque 11 sur 25 groupes de séries de sols ne manifestent plus de signe de détérioration de la structure. Les pratiques de conservation des sols et le travail réduit mis de l'avant durant ces 30 dernières années peuvent avoir contribué à améliorer la structure des sols en régions plus nordiques.

Le phénomène d'acidification des sols n'a pas été évalué de la même manière et donc les tendances à l'évolution ne peuvent être évaluées. On note toutefois que certains sols sableux à squelettiques et sur tills demeurent acides en 2020 et qu'ils l'étaient en 1990. Sur les 63 sites rééchantillonnés, une légère augmentation du pH dans l'horizon B semble indiquer une amélioration du pH.

La diminution de la matière organique semblait plus préoccupante entre monocultures annuelles et prairies en 1990 qu'elle ne semble entre sols cultivés et sols témoins en 2020. Du moins, le nombre de groupes de séries de sols affecté par le phénomène était plus élevé en 1990. Le phénomène est toutefois plus persistant dans les sols sableux à squelettiques et les tills, moins fréquent dans les sols argileux et ne semble plus présent dans les sols loameux. On note toutefois sur les 63 sites rééchantillonnés, une baisse de la M.O. dans l'horizon Ap de l'ordre de grandeur de ce qui a été estimé en Ontario à partir d'études pédologiques réalisées entre 1950 et 2020.

La surfertilisation des sols, en termes de P et/ou de K accumulés, avait été rapportée en 1990 comme étant le deuxième plus important phénomène de dégradation à l'échelle du Québec. La comparaison de ce constat entre 1990 et 2020 n'a pu être réalisée sur l'ensemble des séries de sols en raison des différences méthodologiques utilisées. Les résultats de l'EESSAQ font toutefois bien ressortir des niveaux de saturation plus élevés en P Mehlich-3 dans certaines régions à plus fortes densités d'élevages, souvent accompagnés de niveaux plus élevés de Cu et/ou de Zn Mehlich-3. En revanche, les teneurs en K Mehlich-3 sont très peu souvent plus élevées dans les sols cultivés par rapport aux sols témoins en 2020, mais les différences entre matériaux sont importantes, étant plus élevées dans les sols argileux, notamment.

Sur les 63 sites rééchantillonnés, on note aussi une tendance à l'augmentation de l'indice de saturation en P de 1 % dans l'horizon Ap et une augmentation significative de 0,2 % dans l'horizon B, de même que des augmentations significatives de Zn Mehlich-3 à ces deux profondeurs. Ces résultats démontrent que la surfertilisation en P et autres éléments liés à la gestion des effluents d'élevage est toujours préoccupante et demeure un enjeu, de même qu'elle soulève encore des interrogations sur la façon que les éléments sont accumulés ou exportés dans les différents types de sols.

Faits saillants

- Comparativement à 1990, la compaction semble moins problématique dans les sols argileux et loameux situés en régions plus nordiques.
- Les sols sableux à squelettiques et les tills cultivés apparaissent tous plus compacts en 2020 par rapport aux sols témoins, mais la compaction de la plupart de ces sols n'a pas été évaluée en 1990.
- La détérioration de la structure est toujours existante dans les régions plus méridionales, mais elle n'est plus aussi préoccupante qu'en 1990.
- La diminution de la matière organique affectait un plus grand nombre de groupes de séries de sols en 1990 entre monocultures annuelles et prairies en 1990, mais la situation semble moins préoccupante entre sols cultivés et sols témoins en 2020, malgré une tendance à la baisse observée sur un nombre plus restreint de sites. Le phénomène est toutefois plus persistant dans les sols sableux à squelettiques et les tills, moins fréquent dans les sols argileux et ne semble plus présent dans les sols loameux.
- La surfertilisation en P et autres éléments liés à la gestion des effluents d'élevage est toujours préoccupante et demeure un enjeu à contrôler.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce premier rapport de l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec présente le cadre de l'analyse, la méthode d'échantillonnage et les indicateurs retenus pour comparer l'état de santé de sols cultivés à celui de sols témoins sélectionnés pour leur meilleur état physique. D'emblée, il importe de rappeler que les sols cultivés d'un même groupe de série de sols sont soumis à divers modes de production qui dépendent des cultures et des pratiques agricoles de chaque exploitation. L'analyse par groupe de séries de sols a tout de même révélé des signes de dégradation des sols cultivés similaires à ceux présentés dans l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols du Québec par Tabi et al. (1990). On observe au niveau de la condition physique des problèmes de compaction, de manque d'aération et de capacité de diffusion des gaz et des problèmes de détérioration de la structure. Les sols sableux à squelettiques et les sols issus de tills sont plus souvent compacts en termes de masse volumique apparente ou de diminution de la porosité totale, mais les sols argileux, loameux et les tills souffrent plus souvent de problèmes d'aération et de capacité de diffusion des gaz en profondeur en régions plus méridionales et en considérant les seuils critiques dépassés. La comparaison de ces résultats avec ceux de l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols de Tabi et al. (1990) ne permet pas de conclure à une augmentation de ces phénomènes. À l'orée de 2020, les sols en régions plus méridionales (Montérégie, Centre-du-Québec) demeurent plus compacts ou manquent d'aération comme en 1990, mais ceux en régions périphériques apparaissent aujourd'hui moins dégradés au niveau physique.

À l'échelle de la province, le climat influence l'intensité des activités agricoles et la prépondérance des cultures annuelles dans les régions plus méridionales. L'influence de ce gradient climatique et de l'intensité des pratiques est perceptible au niveau des propriétés physiques des sols à l'intérieur de certains matériaux, comme la diminution de macroporosité dans les sols argileux et les tills. Mais tous les groupes de séries de sols cultivés en régions plus méridionales dans les basses-terres du Saint-Laurent (groupes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8-A 8-B) souffrent plus fréquemment d'une forme ou d'une autre de compaction ou de dégradation de la structure par rapport aux sols des autres régions.

Cette influence du climat est encore plus importante au niveau de la matière organique et de l'activité biochimique qu'elle régule. Les sols cultivés en régions plus froides ont généralement des teneurs en matière organique plus élevées qu'en régions plus chaudes. Toutefois, les écarts entre sols cultivés et témoins sont plus élevés dans l'horizon Ap1 en termes de capacité de minéralisation du carbone et de l'azote en incubation, peu importe la région. Même si les niveaux de matière organique demeurent plus élevés dans les sols cultivés en climat plus froid, leur plus faible capacité de minéraliser de l'azote ou du carbone sous-tend que le travail du sol et l'activité agricole amenuisent quelque peu ces réserves du sol liées à la matière organique. Les sols en régions plus méridionales et sous l'influence de pratiques culturales et agricoles plus intensives présentent aussi plus souvent des problèmes de détérioration de leur structure dans l'horizon Ap1 en lien avec la diminution des teneurs en matière organique.

L'érosion des sols cultivés est moins importante dans les sols organiques et les sols loameux, un peu plus élevée dans les sols argileux et plus importante dans les sols sableux et les tills. Dans ces derniers, la perte moyenne de sols est supérieure à la limite de 6 t/ha/an. Les conditions topographiques expliquent une faible part de l'érosion des sols, tandis que leur association aux régions pédologiques en expliquerait une part plus importante, du fait qu'elles intègrent les effets du type de matériau parental, des conditions topographiques et de l'intensité des pratiques agricoles (Bernard, 2022).

Les propriétés comme celles de la chimie-fertilité sont davantage affectées par les activités agricoles comme le chaulage et la gestion des engrais et des effluents d'élevage, ainsi que par le type de matériau ou le type de sols que par les conditions climatiques. Le niveau de saturation en P dépasse plus souvent le seuil critique dans l'horizon Ap1 des sols sableux à squelettiques. Les écarts entre indices de saturation en phosphore en sols cultivés et témoins, de même que les niveaux de saturation atteints dans l'horizon B sont souvent plus importants dans les matériaux sableux à squelettiques et les tills, témoignant de l'importance de la gestion des effluents d'élevages dans ces sols. Les teneurs en Cu et Zn augmentent aussi dans les sols cultivés en lien avec la gestion des effluents d'élevages, mais les effets sont différents selon l'élément et les types de sols. Les sols argileux et les tills cultivés ont plus souvent des teneurs plus élevées en Cu, tandis que les sols sableux et les tills ont plus souvent des teneurs plus élevées en Zn.

Le rapport 2 de l'EESSAQ fait état de l'effet des pratiques agricoles sur la santé des sols en considérant aussi les conditions pédoclimatiques. Plusieurs indicateurs de pression des pratiques agricoles sont reliés aux phénomènes observés sur l'état de santé des sols dans le présent rapport. L'indice de risques de compaction des sols est relié à plusieurs indicateurs liés à l'état physique et à la teneur en matière organique, tandis que les apports fréquents en engrais organiques sont reliés aux teneurs en éléments fertilisants comme P, Cu et Zn. L'analyse englobant l'ensemble des conditions pédoclimatiques et des indicateurs de pression des pratiques soulignent de façon plus générale l'influence du climat sur l'intensité des pratiques agricoles et la dégradation de l'état du sol en termes de baisse de matière organique, de sols plus compacts, de perte de structure et de niveaux plus élevés de phosphore. Les résultats présentés dans la synthèse du présent rapport vont dans le même sens. On observe des gradients dans les indicateurs de santé des sols, particulièrement au niveau de la matière organique, qui sont liés au climat qui dicte en bonne partie le choix des cultures et l'intensité des pratiques agricoles sur le territoire.

Plusieurs phénomènes ou processus de dégradation menaçant la santé des sols n'ont pas été mesurés dans le cadre de cette étude. À titre d'exemple, la présence de métaux lourds, de pesticides, de produits antibiotiques, de contaminants éternels (PFAS) et autres contaminants d'intérêt émergent n'a pas été évaluée. L'analyse de la plupart de ces contaminants aurait nécessité des protocoles beaucoup plus complexes et coûteux que ce que cette étude permettait de réaliser. Toutefois, une analyse exploratoire du microbiome par des analyses biologiques et génomiques a été réalisée sur une partie des échantillons de sols et a permis d'analyser les effets des pratiques agricoles sur les fonctionnalités et la diversité des espèces microbiennes identifiées, et donc la santé biologique des sols (Hogue et al., 2022).

D'autres projets se sont également greffés à l'EESSAQ. Au moment de la caractérisation des profils de sol, les caractéristiques pédomorphologiques ainsi que des images de sols révélant le niveau d'agrégation des sols ont été relevées permettant d'évaluer la qualité de la structure des profils de sols au champ à partir d'une interprétation visuelle et tactile ou à partir de l'analyse d'images par intelligence artificielle. Des travaux sont aussi en cours pour intégrer ces deux techniques dans une application mobile. De 2020 à 2022, des essais sur la réponse du maïs et des prairies de graminées à l'apport d'azote ont été réalisés sur certaines sites de l'EESSAQ (118 sites-années), dans le but d'identifier les paramètres du sol et du climat qui influencent la réponse des cultures aux engrais et d'intéresser les producteurs à mettre en place de tels essais pour évaluer la santé de leurs sols. La réalisation de cette Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec aura donc permis d'amasser et de mettre à jour une importante somme de connaissances sur les sols, dont plusieurs résultats pratiques restent à transférer auprès de la communauté agricole.

RÉFÉRENCES

- Acton D.F. et Gregorich, L.J. 1995. La santé de nos sols : vers une agriculture durable au Canada. Agriculture et agro-alimentaire Canada. Publication 1906/F. <https://archive.org/details/lasantdenossolsv00greg>.
- Andrews, S.S., Karlen, D.L. et Cambardella, C.A. 2004. The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of American Journal*, 68: 1945-1962. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945>.
- Angers, D.A., Bullock, M.S. et Mehuys, G.R. 2007. Aggregate stability to water. Chapitre 62. pp. 811-819. dans Carter, M.R. et Gregorich, E.G. Éd. 2007. *Soil sampling and methods of analysis*. Canadian Society of Soil Science. CRC Press Taylor & Francis, Boca Raton, FL. 1224 p.
- Ball, B.C., Batey, T. et Munkholm, L.J. 2007. Field assessment of soil structural quality - a development of the Peerlkamp test. *Soil Use and Management*, 23:329-337. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2007.00102.x>.
- Batey, T. 2009. Soil compaction and soil management - A review. *Soil Use and Management*, 25:335-345. [10.1111/j.1475-2743.2009.00236.x](https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00236.x).
- Bernard, C. 2022. Rapport 5 de l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec : Sévérité de l'érosion des sols évaluée à l'aide du ¹³⁷Cs. IRDA. 37 p.
- Bernard, C. et Laverdière, M.R. 1992. Spatial redistribution of Cs-137 and soil erosion on Orléans Island, Québec. *Canadian Journal of Soil Science*, 72:543-554. <https://doi.org/10.4141/cjss92-045>.
- Bipfubusa, M., Angers, D. A., N'Dayegamiye, A. et Antoun, H. 2008. Soil Aggregation and Biochemical Properties following the Application of Fresh and Composted Organic Amendments. *Soil Science Society of America Journal*, 72: 160-166. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ2007.0055>
- Blanco, H. et Lal, R. 2010. *Principles of soil conservation and management*. Springer. 617 p.
- Boudache, M., Esselami, D. et Grenon, L. 2014. Évolution des sols organiques cultivés sur 30 ans en Montérégie Ouest. Sommaire du Projet MAPAQ Prime-Vert #N 13-1S-12. 3 p.
- Bronick C.J. et Lal, R. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124: 3-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>.
- Bui, E., Hancock, G. et Wilkinson, S. 2011. Tolerable hillslope soil erosion rates in Australia: Linking science and policy. *Agriculture, Ecosystems, and Environment*, 144: 136-149. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.07.022>.
- Carter, M.R. et Gregorich, E.G. 2007. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science. CRC Press. 1224 p.
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2010. Guide de référence en fertilisation, 2^e édition. 473 p.
- Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ). 1997. Analyse granulométrique des sols (méthode hydromètre) GR-1. *In Méthodes d'analyse des sols, des fumiers et des tissus végétaux*. Commission des sols. Agdex 533. 10 p.

- Cotrufo, M. F. et Lavellee, J. M. 2022. Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration. *Advances in Agronomy*, 172: 1–66. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.11.002>.
- Culman, S.W., Snapp, S.S., Freeman, M.A., Schipanski, M.E., Beniston, J., Lal, R., Drinkwater, L.E., Franzluebbers, A.J., Glover, J.D., Grandy, A.S., Lee, J., Six, J., Maul, J.E., Mirsky, S.B., Spargo, J.T. et Wander, M.M. 2012. Permanganate Oxidizable Carbon Reflects a Processed Soil Fraction that is Sensitive to Management. *Soil Science Society of America Journal*, 76: 494-504. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0286>.
- Curran Cournane, F., Fraser, S., Hicks, D.I., Houlbrooke, D. et Cox, N. 2013. Changes in soil quality and land use in grazed pasture within rural Auckland. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 56: 102-116. <https://doi.org/10.1080/00288233.2013.772525>.
- Curtin, D. et Campbell, C.A. 2007. Mineralizable nitrogen. *In*. Carter, M.R. et Gregorich, E.G. (Éd.), *Soil sampling and methods of analysis*. 2^e éd. Canadian Society of Soil Science. CRC Press. Boca Raton, FL, pp. 599-606.
- Congreves, K.A., Hayes, A., Verhallen, E.A. et Van Eerd, L.L. 2015. Long-term impact of tillage and crop rotation on soil health at four temperate agroecosystems. *Soil and Tillage Research*, 152: 17-28. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.03.012>.
- Doran, J.W. et Parkin, T.B. 1994. Defining and assessing soil quality. *In* Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., Stewart, B.A. (Éd.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. SSSA, Madison, WI, USA, pp. 3–21.
- Doran, J.W. et Parkin, T.B. 1996. Quantitative indicators of soil quality: a minimum dataset. *In*: Doran, J.W., Smith, D. (Éd.), *Methods for Assessing Soil Quality*. SSSA, Madison, WI, USA, pp. 25–37.
- Doran, J.W., Mielke, L.N. et Power, J.F., 1990. Microbial activity as regulated by soil waterfilled pore space. Symposium III-3, Ecology of Soil Microorganisms in the Microhabitat Environments III. *Transactions of the 14th International Congress of Soil Science*, August 12–18, Kyoto, Japan, pp. 94–99.
- Doran, J.W. et Safley, M. 1997. Defining and assessing soil health and sustainable productivity. *In* Pankhurst C., Doube B.M. and Gupta V.V.S.R. (Éd.), *Biological indicators of soil health*. Wallingford, New York. CAB International. pp. 1-28.
- Duval, M., Angers, D.A. et Laverdière, M.R. 1993. Revue de quelques facteurs régissant l'état et la stabilité de la structure du sol. *Agrosol*, VI: 44-:51.
- Drinkwater, L. E., Cambardella, C. A., Reeder, J. D., et 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.
- Eaton, A. D. et Franson, M. A. H. 2005. *Standard methods for the examination of water & wastewater*. 21st ed. 2005, Centennial ed. / Washington, DC, American Public Health Association.
- FAO. 1995. Les sols sont une ressource non renouvelable. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Feuille technique 2p. https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/soils-2015/docs/FR/IYS_fact_sheets_preservation_fr_PRINT.pdf

- Fine, A., van Es, H. et Schindelbeck, R. 2017. Statistics, Scoring Functions, and Regional Analysis of a Comprehensive Soil Health Database. *Soil Science Society of America Journal*, 81: 589-601. <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.09.0286>.
- Farzadfar, S., Knight, J. et Congreves, K. 2021. Soil organic nitrogen: an overlooked but potentially significant contribution to crop nutrition. *Plant and Soil*, 462: 1-17. 10.1007/s11104-021-04860-w.
- Garrigues, E., Corson, M. S., Angers, D. A., van der Werf, H. M. G. et Walter, C. 2012. Soil quality in Life Cycle Assessment: Towards development of an indicator. *Ecological Indicators*, 18:434–442. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2011.12.014>
- Gasser, M.-O., Allard, F., Bernard, C., Bossé, C. et Tremblay, M.-E. 2019. Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec – Protocole pour l'échantillonnage des sols. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA). 35 p.
- Gee, G.W. et Bauder, J.W. 1986. Particle-size analysis. *In* Methods of soil analysis, A. Klute (Éd.) Part 1. 2e éd., Agron. Monogr. 9. ASA-SSSA, Madison, WI. p. 383-411.
- Gobat J.-M., Aragno M. et Matthey, W. 2010. Le sol vivant : bases de pédologie - biologie des sols. 3^e édition revue et augmentée. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 820 p. Consulté en ligne : <https://books.google.ca/books?id=zctE3re2NloC&pg=PA59&lpg=PA59&dq=d%C3%A9finition+microporosité%C3%A9&source=bl&ots=s8GmyhzipnL&sig=pGiZHTI3SoQJYx0aTmlrq56cMIA&hl=fr&sa=X&ved=0CEcQ6AEwCTgKahUKEwionLqw8vbHAhWMWj4KHUX5Ajs#v=onepage&q&f=true>
- Grable, A.R. et Siemer, E.G. 1968 Effects of bulk density, aggregate size, and water suction on oxygen diffusion, redox potentials, and elongation of corn roots. *Soil Science Society of America Proceedings*, 32: 180- 186. <https://doi.org/10.2136/sssaj1968.03615995003200020011x>.
- Greenberg A.E., Clesceri L.S. et Eaton A.D. 1992. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 18th Edition. Washington DC: Publication Office American Public Health Association. 541 p.
- Gyawali, A. et Stewart, R. 2019. An Improved Method for Quantifying Soil Aggregate Stability. *Soil Science Society of America Proceedings*, 83: 27-36. <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.06.0235>.
- Guimarães, R.M.L., Ball, B.C. et Tormena, C.A., 2011. Improvements in the visual evaluation of soil structure. *Soil Use Management*, 27: 395–403. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00354.x>.
- Håkansson, I. et Reeder, R.C. 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load—extent, persistence and crop response. *Soil Tillage Research*, 29: 277–304.
- Hamza, M.A. et Anderson, W.K. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 82: 121–145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>.
- Hoffland, E., Kuyper, T.W., Comans, R.N.J. et Creamer, R.E.. 2020. Eco-functionality of organic matter in soils. *Plant and Soil*, 455 :1–22. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04651-9>.
- Hogue, R., Jeanne, T., D'Astous-Pagé J. et Iquira, E. 2022. Analyses de référence du microbiome des sols agricoles du Québec. Rapport final soumis au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. IRDA. 22 décembre. 57 pages.

- Holatko, J. Brtnický, M., Kucerik, J., Kotianová, M., Elbl, J., Kintl, A., Kynický, J., Benada, O., Datta, R., et Jansa, J. 2020. Glomalin – Truths, myths, and the future of this elusive soil glycoprotein. *Soil Biology and Biochemistry*, 153. 108116. [10.1016/j.soilbio.2020.108116](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108116).
- Huang, J. et Hartemink, A.E. 2020. Soil and environmental issues in sandy soils. *Earth-Science Reviews*, 208. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103295>.
- Karlen, D.L., Ditzler, C.A. et Andrews, S.S. 2003. Soil Quality: Why and How? *Geoderma*, 114:145-156. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00039-9).
- Kenimer, A.L., Mostaghimi, S., Young, R.W., Dillaha, T. A. et Shanholtz, V.O. 1987. Effects of residue cover on pesticide losses from conventional and no-tillage systems. *Transactions of the ASAE*, 30:953-959. doi: 10.13031/2013.30505.
- Kroetsch, D. et Wang, C. 2017. Particle Size Distribution. Chapitre 55. pp. 713-726. In Carter, M.R. et Gregorich, E.G. (Éd.). *Soil sampling and methods of analysis*. Canadian Society of Soil Science. CRC Press Taylor & Francis, Boca Raton, FL. 1224 p.
- Kruse, J.S. 2007. Framework for sustainable soil management literature review and synthesis. *Soil and Water Conservation Society (SWCS), Special Publication 2007-001*.
- Laberge, D., Beaulieu, R., Blond, E., Brochu, Y., Duschene, D. Lamarre, G., Laroche, R., et Masson, J. Guide de référence technique en drainage souterrain et travaux accessoires. 68 p. ISBN : 978-2-7649-0303-2.
- Lajoie, P.G. 1975. Les terres agricoles du Québec méridional: distribution, étendue et qualité. *Agriculture Canada, Publ. No. 1556*. 62 p.
- Lavoie, S., Nolin, M.C, Lamontagne, L. et Cossette, J.-M. 1999. Atlas agropédologique du sud-est de la plaine de Montréal, Québec. Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, Agriculture et Agroalimentaire Canada (Sainte-Foy). <https://sis.agr.gc.ca/siscan/publications/surveys/pq/index.html>
- Lemerrier, B. et Walter C. 2011. L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 188 p. <https://hal-agrocampus-ouest.archives-ouvertes.fr/hal-00729367>.
- Lévesque, M. et Mathur, S.P. 1988. Critères de qualité des sols organiques. Dans Mathur, S.P. et Wang, C. (Eds). *Qualité des sols dans le contexte canadien - 1988 document d'examen*. Bulletin technique 1991 -1 F. 51 pp.
- Lilburne, L., Sparling, G. et Schipper, L. 2004. Soil Quality Monitoring in New Zealand: development of an interpretative framework. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 104: 535–544. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.020>.
- Loveland, P. et Webb, J. 2003. Is There a Critical Level of Organic Matter in the Agricultural Soils of Temperate Regions: A Review. *Soil and Tillage Research*, 70: 1-18. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00139-3](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00139-3).
- Marshall, C. B., Burton, D. L., Heung, B. et Lynch, D. H. 2021. Influence of cropping system and soil type on soil health. *Canadian Journal of Soil Science*, 101: 626–640. <https://doi.org/10.1139/cjss-2020-0150>.
- Matus, F. J. 2021. Fine silt and clay content is the main factor defining maximal C and N accumulations in soils: a meta-analysis. *Scientific Reports*, 11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84821-6>.

- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). 2020. Agir, pour une agriculture durable Plan 2020-2030. Direction générale de l'appui à l'agriculture durable. ISBN 978-2-550-87792-9.
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). 2020. Rapport sur l'état des ressources en eau et des écosystèmes aquatiques du Québec, 2020, 480 pages. ISBN : 978-2-550-87855-1. 38 p. wHoThefuck0!
- Moebius-Clune, B.N., D.J. Moebius-Clune, B.K. Gugino, O.J. Idowu, R.R. Schindelbeck, A.J. Ristow, H.M. van Es, J.E. Thies, H. A. Shayler, M. B. McBride, D.W. Wolfe et G.S. Abawi, 2016. Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework Manual, Edition 3.1, Cornell University, Geneva, NY. 134 p.
- Montgomery, D.R. 2007. Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 104:13268-13272. <https://doi.org/10.1073/pnas.0611508104>.
- Natural Resources Conservation Service. 2019. Soil Health - Bulk Density/Moisture/Aeration. Guides for educators. United States Department of Agriculture. 11 p.
- Newell-Price, J.P., Whittingham, M.J., Chambers, B.J. et Peel, S. 2013. Visual soil evaluation in relation to measured soil physical properties in a survey of grassland soil compaction in England and Wales. *Soil and Tillage Research*, 127 : 65-73. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.03.003>.
- Nimmo, J.R. et Perkins, K.S. 2002. Aggregate Stability and Size Distribution. *In SSSA Book Series*. Dane, J.H. et Topp, C (Eds.) John & Perkins, 10.2136/sssabookser5.4.c14. pp 317-328.
- Nunes, M.R., van Es, H.M., Veum, K.S., Amsili, J.P. et Karlen, D.L. 2020. Anthropogenic and Inherent Effects on Soil Organic Carbon across the U.S. *Sustainability* 12: 5695. <https://doi.org/10.3390/su12145695>.
- Pankhurst C., Doube B.M. et Gupta V.V.S.R., 1997 - Biological indicators of soil health. Wallingford ; New York. CAB International. 451 p.
- Poirier, V., Angers, D. A., Rochette, P., Chantigny, M. H., Ziadi, N., Tremblay, G. et Fortin, J. 2009. Interactive Effects of Tillage and Mineral Fertilization on Soil Carbon Profiles. *Soil Science Society of America Journal*, 73: 255–261. <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0006>.
- R Core Team, 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <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.
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Tan, C.S. Fox, C.A. et Yang, X.M. 2009. Use of indicators of pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152 : 252-263. [10.1016/j.geoderma.2009.06.009](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009).
- Sinukaban, N. 1981. Erosion selectivity as affected by tillage-planting systems. Ph. D. Thesis. Univ. of Wisconsin-Madison. 107 p.
- Schertz, D.L. 1983. The basis for soil loss tolerances. *Journal of Soil and Water Conservation*, 38:10-14.
- Soil Science Society of America, 1996. Glossary of soil science terms. Madison, WI, USA. DOI:10.2136/2008.glossarysoilscienceterms.

- Schjøning, P. Lamandé, M., Keller, T. Perdesen J. et Stettler, M. 2012. Rules of thumb for minimizing subsoil compaction. *Soil Use and Management*, 28. DOI :10.1111/j.1475-2743.2012.00411.x.
- Soutter, M., Mermoud, A. et Musy, A. 2007. *Ingénierie des eaux et du sol. Processus et aménagements*. Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes. 294 p.
- Sparling, G. et Schipper, L. 2004. Soil Quality Monitoring in New Zealand: trends and issues arising from a broad-scale survey. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 104: 545–552. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.11.014>.
- Sparling, G., Schipper, L., Bettjeman, et W. et Hill, R. 2004. Soil Quality Monitoring in New Zealand: Practical Lessons from a 6-Year Trial. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 104: 523-534. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.021>.
- Stolte, J., Tesfai, M., Øygarden, L., Kværnø, S., Keizer, J., Verheijen, F., Panagos, P., Ballabio, C., et Hessel, R. 2015. Soil threats in Europe. Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Publications Office, <https://data.europa.eu/doi/10.2788/828742>
- Tabi M., Tardif, L., Carrier, P., Laflamme, G. et Rompré, M. 1990. Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec. Rapport Synthèse. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. Publication no 90-130156. 65 p.
- Tisdall, J. M. et Oades, J. M. 1982. Organic Matter and Water-Stable Aggregates in Soils. *European Journal of Soil Science*, 33: 141-163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>.
- van Beek, C. et Tóth, G. (Eds.) 2012. *Risk Assessment Methodologies of Soil Threats in Europe*. Publications Office of the European Union. EUR – Scientific and Technical Research series. 84 p. doi: 10.2788/47096
- Verheijen, F. G. A., Jones, R. J. A., Rickson, R. J., Smith, C. J. 2009. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Science Reviews*, 94: 23-38. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.02.003>.
- Vizioli, B. Cavalieri-Polizeli, K.M.V., Tormena, C.A., et Barth, G. 2021. Effects of long-term tillage systems on soil physical quality and crop yield in a Brazilian Ferralsol. *Soil and Tillage Research*, 209: 104935. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104935>.
- von Lützw, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Flessa, H., Guggenberger, G., Matzner, E. et Marschner, B. 2007. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biology and Biochemistry*, 39: 2183–2207. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.03.007>.
- Wall, G.J., Coote, D.R., Pringle, E.A., Shelton, I.J. (Eds.) 2002. *RUSLEFAC-Revised universal soil loss equation for application in Canada: A handbook for estimating soil loss from water erosion in Canada*. Res. Branch, AAFC. Ottawa. Contribution 02-92. 117 p.
- Warren, C.J., Saurette, D.D. et Gillespie, A.W. 2020. Soil organic carbon content: decreases partly attributed to dilution by increased depth of cultivation in southern Ontario. *Canadian Journal of Soil Science*, 101: 335-338. <https://doi.org/10.1139/cjss-2020-0092>.
- Weil, R., Islam, K.R., Stine, M.A., Gruver, J.B. et 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: 3 - 17. <https://doi.org/10.1079/AJAA200228>.

- Wienhold, B.J., Andrews, S.S. et Karlen, D.L. 2004. Soil Quality: A Review of the Science and Experiences in the USA. *Environmental Geochemistry and Health*, 26: 89-95. <https://doi.org/10.1023/B:EGAH.0000039571.59640.3c>.
- Wischmeier, W.H. et Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 537. 60 p.
- Ziadi, N., et T.S. Tran. 2007a. Lime requirement. *In* Carter, M.R. et Gregorich, E.G. (Eds). Soil sampling and methods of analysis. 2e éd. Canadian Society of Soil Science. CRC Press, Boca Raton, FL. pp. 129-134.
- Ziadi, N. et Tran, T.S. 2007b. Mehlich 3 extractable elements. *In* Carter, M.R. et Gregorich, E.G. (Eds). Soil sampling and methods of analysis. 2e éd. Canadian Society of Soil Science. CRC Press. Boca Raton, FL. pp. 81-88.
- Zou, C., Penfold, C., Sands, R., Misra, R. K. et I. Hudson. 2001. Effects of soil air-filled porosity, soil matric potential and soil strength on primary root growth of radiata pine seedlings. *Plant and Soil*, 236: 105-115. <https://doi.org/10.1023/A:1011994615014>.

ANNEXE A

Tableau 151 : Principales caractéristiques ayant servi à sélectionner les séries de sols et former des groupes de séries de sols apparentés.

Groupe	Série de sol	Matériau parental	Granulométrie du matériau parental, réaction	Type de dépôt	Classe de drainage	Sous-groupe pédologique	Région pédologique
1	Sainte-Rosalie	1- Argileux	Argileux-très fin, neutre	Marin	Mauvais	Gleysol humique orthique (GH.O)	A1- Plaine de Montréal
1	Saint-Urbain	1- Argileux	Argileux-très fin, alcalin	Marin	Mauvais	GH.O	A1- Plaine de Montréal
2	Saint-Laurent	1- Argileux	Argileux-fin (lité), alcalin	Fluvatile	Mauvais	GH.O	A1- Plaine de Montréal
2	Kierkoski	1- Argileux	Argileux-fin (stratifié), alcalin	Lacustre	Mauvais	GH.O	A1- Plaine de Montréal
2	Dalhousie	1- Argileux	Argileux-fin, neutre	Glacio-lacustre	Mauvais	GH.O	A4- Hautes-terrasses du St-Laurent
3	Providence	1- Argileux	Argileux-très fin, neutre	Fluvatile	Mauvais	GH.O	A1- Plaine de Montréal
3	Rideau	1- Argileux	Argileux-très fin, neutre	Fluvatile	Mauvais à imparfait	Gleysol orthique (G.O)	A1- Plaine de Montréal
3	Chambly	1- Argileux	Argileux-fin, alcalin	Glacio-lacustre	Mauvais	GH.O	A1- Plaine de Montréal
3	Saint-Blaise	1- Argileux	Argileux-fin, neutre / Loameux-fin alcalin	Fluvatile / Glaciaire (till)	Mauvais	GH.O	A1- Plaine de Montréal
4	Beaudette	2- Loameux	Limoneux-fin à loameux-fin, neutre	Alluvion récente	Mauvais	GH.O	A1- Plaine de Montréal
4	Sainte-Barbe	2- Loameux	Limoneux-fin, alcalin	Lacustre	Mauvais	GH.O	A1- Plaine de Montréal
4	Saint-Hyacinthe	2- Loameux	Limoneux-fin (stratifié), neutre	Lacustre	Mauvais	G.O	A1- Plaine de Montréal
4	Lévrard	2- Loameux	Limoneux-fin à loameux-fin, neutre	Lacustre	Mauvais	GH.O	A4- Hautes-terrasses du St-Laurent
5	Chaloupe	2- Loameux	Loameux-fin, neutre	Alluvion récente	Mauvais	G.O	A1- Plaine de Montréal
5	Saint-Aimé	2- Loameux	Loameux (stratifié), alcalin	Fluvio-lacustre	Mal drainé	GH.O	A1- Plaine de Montréal
5	Des Saults	2- Loameux	Loameux, neutre	Fluvio-lacustre	Mauvais	Gleysol orthique (G.O)	A4- Hautes-terrasses du St-Laurent
5	Le Bras	2- Loameux	Loameux, neutre / Limoneux-fin à loameux-fin, neutre	Fluvio-lacustre / Lacustre	Mal drainé	Gleysol humique orthique (GH.O)	A4- Hautes-terrasses du St-Laurent
6	Aston	3- Sableux à squelettique	Sableux à loameux-grossier, neutre/Argileux, neutre	Fluvatile/Marin	Mauvais	GH.O	A1- Plaine de Montréal
6	Saint-Damase	3- Sableux à squelettique	Sableux à loameux-grossier, neutre/Argileux, neutre	Fluvatile/Marin	Imparfait	GH.O	A1- Plaine de Montréal

Groupe	Série de sol	Matériau parental	Granulométrie du matériau parental, réaction	Type de dépôt	Classe de drainage	Sous-groupe pédologique	Région pédologique
7	Achigan	3- Sableux à squelettique	Sableux-fin à loameux-grossier, acide	Fluviale	Imparfait	Podzol humo-ferrique à orstein gleyfié	A1- Plaine de Montréal
7	Joseph	3- Sableux à squelettique	Sableux-fin à loameux-grossier, neutre	Fluviale	Mauvais	GH.O	A1- Plaine de Montréal
7	Valère	3- Sableux à squelettique	Sableux-fin à loameux-grossier, acide	Fluviale	Imparfait à modéré	PHF.GL	A4- Hautes-terrasses du St-Laurent
8-A	Boucherville	4- Till	Loameux-fin, alcalin	Till (morainique)	Mauvais	GH.O	A1- Plaine de Montréal
8-A	Bedford	4- Till	Loameux-fin à loameux-grossier, alcalin	Till (morainique)	Mauvais	GH.O	A4- Hautes-terrasses du St-Laurent
8-B	Sainte-Brigide	4- Till	Loameux-grossier, alcalin	Till (morainique)	Mauvais	GH.O	A1- Plaine de Montréal
8-B	Raimbault	4- Till	Loameux-grossier, alcalin	Till (morainique)	Mauvais à imparfait	GH.O	A4- Hautes-terrasses du St-Laurent
9	Nobel	5- Organique	Organique humique	Tourbe de forêt	Très mauvais	Humisol mésique	A1- Plaine de Montréal
9	Saint-Dominique	5- Organique	Organique mésique	Tourbe de forêt	Très mauvais	Mésisol typique	A1- Plaine de Montréal
9	Verchères	5- Organique	Organique humique	Tourbe de forêt	Très mauvais	Humisol terrique	A1- Plaine de Montréal
10	De l'Anse	1- Argileux	Argileux-fin, neutre	Alluvion récente	Mauvais	Gleysol régosolique	A2- Plaine littorale et les îles du St-Laurent
10	Kamouraska	1- Argileux	Argileux-fin, alcalin	Estuarien	Mauvais	GH.O	A2- Plaine littorale et les îles du St-Laurent
10	La Pocatière	1- Argileux	Argileux-fin, neutre	Estuarien	Mauvais	Gleysol luvique humique	A2- Plaine littorale et les îles du St-Laurent
10	Saint-Pascal	1- Argileux	Argileux-fin, alcalin	Estuarien	Mauvais	Gleysol humique orthique	A2- Plaine littorale et les îles du St-Laurent
11	Saint-Nicolas	3- Sableux à squelettique	Squelettique-loameux, acide / Squelettique sableux, acide	Marin / résiduel	Bon	Podzol humo-ferrique orthique (PHF.O)	A2- Plaine littorale et les îles du St-Laurent
11	Saint-André	3- Sableux à squelettique	Squelettique-loameux à squelettique-sableux, acide	Marin	Rapide	Podzol humo-ferrique gleyfié (PHF.GL)	A2- Plaine littorale et les îles du St-Laurent
11	Orléans	3- Sableux à squelettique	Squelettique-loameux, acide	Fluviale	Bon	Brunisol dystrique éluvié (BDY.E)	A4- Hautes-terrasses du St-Laurent
12	Hébertville	1- Argileux	Argileux-fin, alcalin	Marin	Mauvais	Gleysol humique orthique (GH.O)	A3- Plaine du Lac-Saint-Jean
12	Normandin	1- Argileux	Argileux-fin, alcalin	Marin	Mauvais	Gleysol orthique (G.O)	A3- Plaine du Lac-Saint-Jean
13	Alma	2- Loameux	Limoneux-fin, neutre / Argileux, neutre	Lacustre/Marin	Mauvais	G.O	A3- Plaine du Lac-Saint-Jean

Groupe	Série de sol	Matériau parental	Granulométrie du matériau parental, réaction	Type de dépôt	Classe de drainage	Sous-groupe pédologique	Région pédologique
13	Taillon	2- Loameux	Limoneux-fin, neutre / Argileux, neutre	Lacustre/Marin	Imparfait	BDY.E	A3- Plaine du Lac-Saint-Jean
14	Saint-Jude	3- Sableux à squelettique	Sableux, acide	Fluvatile	Imparfait	PHF.GL	A1- Plaine de Montréal
14	Uplands	3- Sableux à squelettique	Sableux, acide	Fluvatile	Rapide (variable)	PHF.O	A1- Plaine de Montréal
15	Beaurivage	3- Sableux à squelettique	Sableux-grossier à loameux-grossier, acide	Fluvatile	Rapide	PHF.O	A4- Hautes-terrasses du St-Laurent
15	Morin	3- Sableux à squelettique	Sableux-grossier, acide	Fluvatile	Très rapide	PHF.O	A4- Hautes-terrasses du St-Laurent
16	Mawcook	4- Till	Loameux-grossier à squelettique-loameux, acide	Till (morainique)	Mauvais	GH.O	A4- Hautes-terrasses du St-Laurent
16	Norbertville	4- Till	Loameux-grossier, acide	Till (morainique)	Mauvais	G.O	A4- Hautes-terrasses du St-Laurent
16	Woodbridge	4- Till	Loameux-grossier à squelettique-loameux, acide	Till (morainique)	Imparfait	Brunisol dystrique éluvié gleyifié	B1- Mont Sutton
16	Sainte-Marie	4- Till	Loameux-grossier à squelettique-loameux, acide	Till (morainique)	Mauvais	G.O	B2- Basses et moyenne collines des Appalaches orientales
17	Shefford	4- Till	Squelettique-loameux, acide	Till (morainique)	Bon	Brunisol dystrique orthique (BD.O)	A4- Hautes-terrasses du St-Laurent
17	Blandford	4- Till	Loameux-grossier à squelettique-loameux, acide	Till (morainique)	Bon à modéré	Brunisol dystrique éluvié (BD.E)	B1- Mont Sutton
18	Leeds	4- Till	Loameux-grossier à squelettique-loameux, acide	Till (morainique)	Bon	Podzol humo-ferrique fragique (PHF.FR)	B2- Basses et moyenne collines des Appalaches orientales
18	Chapais	4- Till	Squelettique-loameux, acide	Till (morainique)	Bon	PHF.FR	B2- Basses et moyenne collines des Appalaches orientales
18	Charlevoix	4- Till	Loameux-grossier à squelettique-loameux, acide	Till (morainique)	Bon	PHF.FR	C1- Hautes-terres des Laurentides
19	Saint-Bruno	3- Sableux à squelettique	Squelettique-loameuse à Squelettique-sableuse, acide	Fluvio-glaciaire	Rapide	Podzol humo-ferrique orthique (PHF.O)	B2- Basses et moyenne collines des Appalaches orientales
19	Danby	3- Sableux à squelettique	Squelettique-loameux à squelettique-sableux, acide	Fluvio-glaciaire	Très rapide	PHF.O	B4- Bas plateau de Compton

Groupe	Série de sol	Matériau parental	Granulométrie du matériau parental, réaction	Type de dépôt	Classe de drainage	Sous-groupe pédologique	Région pédologique
20	Magog	4- Till	Loameux	Till (morainique)	Mauvais	Gleysol humique orthique	B3- Basses et moyennes collines des Appalaches occidentales
20	Calais	4- Till	Loameux	Till (morainique)	Mauvais	Gleysol humo-ferrique fragique (GHF.FR)	B4- Bas plateau de Compton
20	Dufferin	4- Till	Loameux	Till (morainique)	Mauvais	GHF.FR	B4- Bas plateau de Compton
21	Sherbrooke	4- Till	Loameux-fin, acide	Till (morainique)	Imparfait à modéré	BD.E	B3- Basses et moyennes collines des Appalaches occidentales
21	Ascot	4- Till	Loameux-grossier à loameux-fin, acide	Till (morainique)	Bon	Podzol humo-ferrique orthique (PHF.O)	B3- Basses et moyennes collines des Appalaches occidentales
21	Greensboro	4- Till	Loameux-grossier, acide	Till (morainique)	Modéré	Brunisol dystrique orthique (BD.O)	B4- Bas plateau de Compton
22	Amqui	4- Till	Squelettique-loameux, acide	Till (morainique)	Bon	PHF.O	B6- Monts Notre-Dame
22	Quisibis	4- Till	Squelettique-loameux, acide	Till (morainique)	Rapide	PHF.O	B6- Monts Notre-Dame
22	Comis	4- Till	Loameux-fin, acide	Till (morainique)	Modéré	Brunisol mélanique gleyifié	B7- Bas plateau de la baie des Chaleurs
23	Bouchette	2- Loameux	Limoneux-fin, neutre	Lacustre	Imparfait	PHF.O	C1- Hautes-terres des Laurentides
23	Montcerf	2- Matériaux loameux	Limoneux-fin, neutre	Lacustre	Mauvais	Gleysol orthique (G.O)	C1- Hautes-terres des Laurentides
24	Guérin	2- Loameux	Argileux-très fin, alcalin	Glacio-lacustre	Mauvais	Gleysol humique orthique (GH.O)	D1- Plaine de l'Abitibi
24	Palmarolle	1- Argileux	Argileux-très fin, alcalin	Glacio-lacustre	Mauvais	Gleysol luvique humique	D1- Plaine de l'Abitibi
24	Roquemaure	1- Argileux	Argileux-très fin, alcalin	Glacio-lacustre	Mauvais	GH.O	D1- Plaine de l'Abitibi
25	Baby	2- Loameux	Limoneux-fin, alcalin	Glacio-lacustre	Mauvais à imparfait	G.O	D1- Plaine de l'Abitibi
25	Duhamel	2- Loameux	Limoneux-fin, alcalin	Glacio-lacustre	Mauvais	GH.O	D1- Plaine de l'Abitibi