



Rapport de l'activité 1.5.1 du mandat Retombées de l'Étude sur
l'état de santé des sols agricoles du Québec

Cadre d'interprétation de la matière organique par perte au feu et de la présence de carbonates dans les sols de l'ÉEÉSSAQ

Date : Février 2026

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

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



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

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

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

Question ou commentaire

Marc-Olivier Gasser, Ph. D.

Chercheur en conservation des sols et l'eau

Responsable scientifique et auteur principal

T : 418 643-2380 p. 650

marc-o.gasser@irda.qc.ca

Auteurs du rapport

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

Marie-Eve Tremblay, agr., M. Sc., IRDA

Éric Bergeron, tech., IRDA

Bernard Montminy, chim., M. Sc. IRDA

Équipe de réalisation

Marie-Eve Tremblay, agr. M.Sc

Marc-Olivier Gasser, Ph. D.

Éric Bergeron.

Bernard Montminy.

Collaborateurs

Catherine Bossé, agr., IRDA

Richard Hogue, Ph. D., IRDA

Merci à notre partenaire financier

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



Ce rapport peut être cité comme suit :

Gasser, M.-O., Tremblay, M.-E., Bergeron, E. Montminy, B. 2026. Cadre d'interprétation de la matière organique par perte au feu et de la présence de carbonates dans les sols. Activité 1.5.1 réalisée dans le cadre du mandat Retombées de l'ÉSSAQ. Rapport final. IRDA. 17 pages.

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

RÉSUMÉ

Par convention, la teneur en matière organique (MO) du sol est estimée avec un facteur de conversion de 1,724 sur la teneur en carbone (C) organique, ou à l'inverse le carbone constitue 58 % de la MO. Toutefois, plusieurs facteurs peuvent affecter cette proportion, entre autres la présence de carbonates et les différentes formes de matière organique qu'on retrouve dans les différents types de sols du Québec. Quelques 793 échantillons de sols de l'ÉÉSSAQ ont été sélectionnés pour approfondir nos connaissances sur les relations existant entre la matière organique évaluée par perte au feu (MO-paf), la teneur en carbone total (combustion sèche Leco) et la présence de carbonates. L'analyse du rapport C total sur MO-paf a permis de constater qu'en moyenne ce rapport se situe plus près de 0,5 que de 0,58, tels que d'autres l'ont souligné, causant une surestimation des teneurs en C dans le sol, si la MO-paf était utilisée à cette fin avec un facteur de 1,724. Le rapport C total/MOS -paf n'est cependant pas uniforme. Les sols sableux présentent un rapport C total/MO-paf plus faible que les sols argileux et tout type de sols prélevés en profondeur dans l'horizon B présente aussi un rapport C total/MO-paf plus faible que 0,5.

Un essai porté sur 16 échantillons présentant un rapport C total sur MO-paf plus élevés que 0,62 a révélé la présence de carbonates à des niveaux variant entre 0,14 et 2,09 % de C inorganique, représentant pour neuf de ces échantillons, plus de 40 % du C total. La teneur en C inorganique est corrélée à la teneur en Ca Meh-3, mais ne l'est pas avec le Mg Meh-3. L'utilisation d'un pH eau > 7,5 et d'un pH SMP > 7,2 comme critères pour filtrer la présence de carbonates a permis d'estimer à environ 5 %, la proportion de sols dont la présence de carbonates pourrait être mesurée de façon significative dans un horizon ou l'autre parmi les 4781 échantillons de sols de l'ÉÉSSAQ.

Les essais réalisés par perte au feu confirment que les températures de séchage à 150°C et d'incinération à 375°C sont plus appropriées que celles à 450 et 550°C pour estimer la teneur en matière organique des sols, en considérant la corrélation obtenue avec le C total mesuré par combustion sèche. L'utilisation de températures supérieures à 375°C a plutôt conduit à des pertes de masses qui corrélaient positivement avec la teneur en argile et plus spécifiquement en profondeur dans l'horizon B des sols argileux, qui pointent vers des pertes sous formes minérales (mica ou de phyllosilicates). La corrélation entre la teneur en Ca Meh-3 et les pertes au feu à des températures supérieures à 375°C, de même que les teneurs en C mesurées dans les cendres après incinération à 550°C témoignent d'une éventuelle présence de carbonates qui peuvent être incinérées, mêmes à des températures entre 375 et 550°C. Les essais ont aussi révélé un certain biais lié à la préparation et à la reprise d'échantillons pour réaliser des analyses sur des fractions de sol à différentes moutures, soit de 2 mm pour la perte au feu ou 150 µm pour la combustion sèche sur LECO.

Les résultats de ces différents essais ont mis en lumière quelques phénomènes importants à considérer lors de l'analyse des carbonates et de la comparaison des ratios entre C organique, C total et matière organique par paf. Au moment de réaliser ces essais, le laboratoire n'était pas encore équipé d'un appareil permettant de doser le C avant et après élimination des carbonates par combustion sèche. La thermogravimétrie couplée à un lecteur des émissions de CO₂ serait aussi plus appropriée pour conduire des essais plus concluants sur les quantités de C émises aux différentes températures. Ainsi, avec l'acquisition de ces nouveaux appareils dans les prochains mois à l'IRDA, une meilleure définition de l'importance des carbonates dans les sols du Québec (que nous estimons encore marginale, à environ 5% des sols), ainsi qu'un meilleur estimé du rapport C organique /MO-paf (que nous estimons plus près de 0,5 que de 0,58) pourront être produits. Ces travaux devraient mener à une meilleure capacité de diagnostiquer la santé des sols et leur évolution à partir de suivis de la matière organique ou de teneurs en C dans les sols, en réduisant les biais dans les analyses et leur interprétation.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé.....	1
Introduction et revue de littérature	1
Incertitudes sur l'estimation du C organique avec la méthode Walkley-Black	1
Incertitudes sur l'estimation de la MO avec la méthode par perte au feu	2
Incertitudes sur l'estimation du C avec la méthode par combustion sèche	2
Objectifs	3
Matériel et méthodes	4
Teneur en MO-paf.....	4
Élimination des carbonates à l'acide.....	4
Effet des températures de séchage et d'incinération des sols sur la perte au feu	4
Résultats.....	6
MO-paf vs C total par combustion sèche.....	6
Présence de carbonates dans les sols	8
Effets des températures et de séchage sur la perte au feu.....	11
Effet de la mouture d'un échantillon de sol à 150 µm en comparaison d'échantillons de sols tamisé à 2 mm sur la perte au feu (%) entre 150 et 375°C.....	13
Dosage du carbone résiduel après incinération à 550°C.....	13
Conclusion.....	15
Références.....	16

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Teneurs en diverses formes de carbone de 16 échantillons de sols présentant les rapports C total/MO-paf les plus élevés parmi 793 échantillons de sols sélectionnés de l'ÉSSAQ.	8
Tableau 2 : Fréquences du nombre d'échantillons de sols minéraux de l'ÉSSAQ qui ont un pH eau supérieur à 7,5, un pH tampon SMP > à 7,2 ou les deux.....	11
Tableau 3 : Statistiques sur les pertes feu mesurées sur 55 échantillons de sols à différentes températures.....	11

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Corrélations simples entre la teneur en carbone total et la matière organique évaluée par perte au feu (MO-paf) par matériaux parentaux dans les trois horizons (Ap1, Ap2, et B).....	6
Figure 2 : Corrélations simples entre le ratio Ctotal sur MO-paf, la teneur en sable et la teneur en Ca-Meh3 dans les trois horizons (Ap1, Ap2, et B).....	6
Figure 3 : Distribution du rapport C total/MO-paf en fonctions des matériaux parentaux et des horizons échantillonnés	7
Figure 4 : Relations entre la teneur en C inorganique (a), le ratio C inorg./C total (b) et le ratio C total / MO-paf comme indicateur de présence de carbonates.	9
Figure 5 : Variations des ratios Ctotal/MO-paf (avant le retrait des carbonates) et C org/MO-paf (après le retrait des carbonates) en fonction de la teneur en C organique calculée par différence et de la MO-paf.	9
Figure 6 : Relation linéaire entre la teneur en C inorganique (carbonates éliminés à l'acide HCl) et la teneur en Ca Meh-3 (a) et relation moins évidente entre la teneur en C inorganique et la teneur en Mg Meh-3 (b).	10
Figure 7 : Relations quadratiques entre le ratio Cinorg./Ctotal et le pH-eau (a) et le pH-tampon SMP du sol (b).	10
Figure 8 : Pertes au feu (%) mesurées à différents paliers de températures entre 150, 375, 450 et 550°C en fonction de la teneur en C total (a), en Ca Me-3(b), en argile (c) et en sable (d).	12
Figure 9 : Proportion des pertes au feu (%) mesurées à différents paliers de températures entre 105, 150, 375, 450 et 550°C en fonction du matériau parental (a) ou de l'horizon de sol échantillonné (b).	13
Figure 10 : Effet de la mouture des échantillons de sol à 150 µm sur la perte au feu (%) entre 150 et 375°C en comparaison d'échantillons tamisés à 2 mm (a et b) et de la reprise analytique d'un même échantillon de 2 mm (c).....	13
Figure 11 : Relation entre le C dosé dans les cendres d'un échantillon de sol incinéré à 550°C et la teneur en C inorganique estimée par différence entre le C total LECO et le C organique LECO dosé après lavage des carbonates à l'acide HCl (a). Relation entre le C dosé dans les cendres d'un échantillon de sol incinéré à 550°C et le ratio C total / MO-paf entre 375 et 550°C (b).	14

INTRODUCTION ET REVUE DE LITTÉRATURE

La matière organique (MO) est généralement considérée comme l'épine dorsale de la santé du sol car elle exerce une influence directe sur la condition physique, la chimie-fertilité et la microbiologie du sol, notamment en favorisant la structure du sol, la capacité de rétention en eau, le cycle des nutriments, l'activité microbiologique, l'infiltration de l'eau, la diffusion de l'oxygène, l'activité et la dégradation des pesticides et la résistance du sol à la compaction. C'est d'ailleurs l'un des six indicateurs généralistes communs aux six (6) fonctions du sol qui a été retenu dans une vaste étude récente sur les indicateurs de santé des sols (Cousin et al., 2025).

La MO du sol peut être analysée au laboratoire de plusieurs façons. À l'IRDA, comme ailleurs, les méthodes les plus couramment utilisées sont par perte au feu ou incinération (MO-paf), par oxydation chimique avec la méthode Walkley-Black (WB) en dosant la teneur en carbone organique et en la convertissant avec un facteur 1,724 (Moreno et al., 2001) et combustion sèche avec un appareil LECO notamment, en dosant la teneur en carbone totale et en la convertissant en MO avec le même facteur de conversion. L'utilisation de la méthode Walkley-Black entraînant des contraintes environnementales et économiques au laboratoire, deux méthodes sont maintenant utilisées en remplacement de la méthode WB, soit les méthodes d'analyse de MO par perte au feu (MO-paf) et de carbone total par combustion sèche au LECO (Ctotal).

- La MO-paf appliquée sur un sol tamisé à 2 mm est estimée avec la différence de poids de l'échantillon séché à 150°C puis incinéré à 375°C. On assume que la totalité du poids perdu correspond à de la MO.
- L'appareil LECO fonctionne sur le principe de la combustion de sols, moulus à < 150 µm, incinérés à haute température en présence d'oxygène. Le CO₂ relâché lors de la combustion est dosé par des détecteurs.

La teneur en MO est estimée par convention en appliquant un facteur de conversion de 1,724 (ou l'inverse de 58 % de C dans la MO) sur la teneur en C organique ou total. Ce facteur a été établi en 1826 et est largement controversé aujourd'hui. La littérature présente des facteurs de conversion variant de 1,35 à 14,1, mais la tendance moyenne semble pointer vers un facteur de 1,9 pour les sols de surface et de 2,2 pour les horizons de sol plus en profondeur (Pribyl, 2010). Le facteur est influencé notamment par le type de sol, l'horizon, la résistance des résidus végétaux à la dégradation, la nature des composés organiques, les pratiques culturales et le climat (Jha et al., 2014). De plus, l'erreur associée aux méthodes utilisées pour mesurer le C et la MO influencent fortement le facteur. Une méthode inefficace pour estimer la MO entraînera un facteur de conversion trop faible. À l'inverse, une surestimation de la MO aura pour effet un facteur de conversion trop élevé (Pribyl, 2010). L'inverse est aussi vrai avec les méthodes permettant d'estimer le C.

Incertitudes sur l'estimation du C organique avec la méthode Walkley-Black

La méthode d'estimation du C organique en oxydation par voie humide ne doserait pas toujours la totalité du C organique et sa performance varierait d'un sol à l'autre (Hoogsteen et al., 2015). Jha et al. (2014) rapporte un pourcentage de récupération du C organique variant de 46 à 77% par la méthode WB, selon les sols. Selon l'auteur, la méthode WB serait efficace pour oxyder les composés facilement disponibles, tels les amidons, hémicelluloses et celluloses. Toutefois, la méthode est moins efficace lorsqu'il est question de composés lignifiés ou lorsque les composés organiques sont liés aux argiles du sol (Jha et al., 2014).

La méthode WB ne permet pas d'extraire le C du sol contenu dans le charbon ou d'autres formes de C élémentaire (Pribyl, 2010). Cette forme de C stable (Black Carbon) a une prévalence variable dans les sols et peut même représenter jusqu'à 60 % du Carbone organique total (TOC) du sol (Lebron et al., 2024).

De plus, lorsque le sol contient des carbonates, le carbone contenu dans ces derniers peut venir fausser les résultats. Sous conditions acides, les méthodes de dosage par oxydation du carbone incluent aussi les carbonates (Skjemstad et Baldock, 2006).

Incertitudes sur l'estimation de la MO avec la méthode par perte au feu

Selon Hoogsteen et al., (2015) et Lebron et al. (2024), les méthodes par perte au feu ou incinération présentent trois facteurs d'incertitude :

- la combustion incomplète de la MOS en raison de températures de combustion trop faibles;
- la perte d'eau structurale contenue dans les argiles;
- la décomposition des carbonates survenant à des températures supérieures à 700°C.

Les essais de Lebron et al. (2024) ont permis de constater que le charbon se décompose à des températures comprises entre 375 et 650°C alors que le biochar serait oxydé à des températures inférieures à 375°C.

La perte d'eau structurale dans les argiles est affectée par la durée et la température de l'incinération et se produit selon une courbe sigmoïdale. Ainsi, la kaolinite subit une déshydroxylation entre 500°C et 600°C, la smectite entre 500 et 1000°C et les micas (illite) entre 350 et 700°C (Lebron et al., 2024, Sleutel et al., 2006). La vermiculite et la chlorite seraient aussi affectées par la perte d'eau structurale (Salehi et al., 2011). Cependant, Lebron et al. (2024) n'ont constaté aucune perte de masse au-delà de 200°C pour la montmorillonite et concluent que l'erreur associée à la déshydroxylation de ce type d'argile est négligeable. Dans des essais au TGA avec des sols contenant des micas, la déshydroxylation des micas n'a pas non plus été constatée (Lebron et al., 2024).

Dans le cas de certains sols, on constate aussi une perte de masse importante entre 105 et 200°C associée à de l'eau liée fortement aux particules de sol. Cette perte de masse peut engendrer une surestimation du contenu en C. L'ordonnée à l'origine de la relation entre la teneur en C organique par WB et la MO-paf est considérée comme un indicateur de la proportion de perte de masse non liée à la MO. Wang et al. (2012) intègre cette valeur à titre de facteur de correction dans son équation de transfert, en plus du facteur de conversion.

D'ailleurs, Moreno et al. (2001) ont obtenu une meilleure corrélation entre le C organique WB et la MO-paf avec des sols pré-séchés à 150°C plutôt qu'à 105°C. Les corrélations entre le C organique WB et la MO-paf les plus performantes ont été obtenues avec une température d'incinération de 375°C pour des sols dont la teneur en MO est inférieure à 8 % (Moreno et al., 2001). Ces températures ont été adoptées par le laboratoire de l'IRDA et font aussi partie de la méthode reconnue par le programme d'accréditation des laboratoires privés exerçant au Québec (CEAEQ, 2003).

Incertitudes sur l'estimation du C avec la méthode par combustion sèche

La présence de diverses formes de carbone inorganique (carbonates, charbon) peut influencer la détermination du C organique dans les sols par combustion sèche (LECO, Elementar, etc.), si ces formes n'ont pas été traitées ou soustraites du contenu en C du sol. La présence de carbonates dans les sols du Québec est relativement peu fréquente dans les sols plus acides du Québec (Voir article en production de M.-E. Samson et C. Bossé), mais vaut la peine d'être considérée dans les sols plus alcalins, dans certains tills ou lorsque certains signes (alcalinité, teneur élevée en Ca, etc.) indiquent leur présence. Divers travaux démontrent que la décomposition des carbonates survient à des températures supérieures à 550°C (Kasozi et al., 2009).

Diverses méthodes sont utilisées pour éliminer ou soustraire la teneur en carbonates de l'analyse en C totale pour mieux estimer la teneur en carbone organique :

1. Méthode par combustion sèche : analyse du C total par combustion sèche et soustraction du C résiduel (inorganique) obtenu par combustion sèche après incinération préalable du carbone organique à 450°C (méthode de Guelph)
2. Dissolution des carbonates dans une solution acide HCl
3. Fumigation des carbonates à l'acide HCl
4. Dosage et soustraction des carbonates

Dans la première méthode, les carbonates sont estimés indirectement en incinérant le sol à 450°C pour retirer le carbone organique (Wang et al., 2012).

Les prétraitements à l'acide chlorhydrique (méthodes 2, 3 et 4) étant corrosifs, demandent des précautions pour protéger les appareils de mesure et l'environnement du laboratoire (Wang et al., 2012). Tous les prétraitements avec HCl sont aussi susceptibles d'affecter le contenu résiduel en carbone organique. Les carbonates peuvent être éliminés du sol par traitement à l'acide HCl (15 à 20% v/v ou ratio 1 :3) (Méthode 2). Cependant, le traitement laisse un résidu acide dans le sol. L'analyse du carbone par combustion sèche à haute température entraîne un dégagement d'halogènes qui peuvent corroder et abîmer les appareils qui ne sont pas prévus à cet effet, comme le LECO CN828 utilisé au laboratoire de l'IRDA.

Certains appareils (Elementar, LECO, etc.) analysant le C en combustion sèche, permettent de prétraiter les échantillons à l'acide chlorhydrique (HCl) avec un meilleur contrôle des effets corrosifs.

OBJECTIFS

L'objectif principal de cette activité consistait à réviser les méthodes analytiques et à développer un cadre d'interprétation de la teneur en MO-paf dans les différentes conditions pédologiques du Québec en considérant les analyses de C total obtenues dans le cadre de l'ÉSSAQ. En sous-objectifs à cette activité, les travaux visaient à :

1. Comparer les résultats d'analyses de MO-paf à celles de C total de sols sélectionnés de l'ÉSSAQ;
 - En comparant le ratio Ctotal/MO obtenu à celui généralement utilisé (58% ou son facteur de conversion inverse 1,724);
 - En analysant quels facteurs (matériaux parentaux, texture, profondeur, présence de carbonates, etc.) peuvent affecter la relation entre la teneur en MO paf et celle obtenue via l'analyse du C total ou organique par combustion sèche;
2. Évaluer la fréquence de la présence de carbonates dans les sols du Québec et leur importance comme source d'erreur dans la conversion du C total en MOS;
 - En sélectionnant un certain nombre d'échantillons de sols de l'ÉSSAQ dont le ratio C/MO dépasse 58% pour les traiter manuellement à l'acide chlorhydrique (HCl) et estimer leurs teneurs en carbonates;
 - En vérifiant quelles séries de sol sont les plus concernées par la présence de carbonates et quels indicateurs (pH eau > 7, Ca M-3 > 10 000 ppm, etc.) permettraient de les pré-détecter;
3. Réviser la méthode d'estimation de la teneur en matière organique par perte au feu :
 - En estimant la proportion de matière incinérée ou de C résiduelle dans les sols après incinération (par perte au feu) à 375°, 450°C et 550°C.
 - Voir si une procédure à plusieurs paliers de températures d'incinération permettrait de mieux caractériser diverses formes de matière organique dans les sols ou quelle(s) température(s) serai(en)t plus pertinente(s) pour déterminer le contenu en matière organique des sols.
 - Vérifier si les carbonates peuvent être évalués après incinération à haute température (550°C) et dosé par combustion sèche;
 - Vérifier la sensibilité et la précision des méthodes de MO-paf et Ctotal par combustion sèche.
4. Vérifier l'effet du tamisage et du broyage des sols sachant que la MO-paf est estimée sur des sols tamisés à 2 mm et que le C total en combustion sèche est obtenu sur des sols moulus à < 150 µm

Le but final étant d'arriver à des recommandations au CEAEQ et aux laboratoires privés, si des résultats probants indiquaient des besoins d'adapter ou de modifier la méthode de dosage de la matière organique par perte au feu ou celle du carbone total pour considérer la présence éventuelle de carbonates.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les essais ont été conduits sur les sols échantillonnés dans le cadre de l'ÉÉSSAQ, représentatifs des sols agricoles du Québec. Les sols provenaient de différentes séries de sols les plus communément cultivées, issus de différents matériaux parentaux (dépôts meubles) et ont été prélevés à différentes profondeurs dans les horizons Ap et B.

Sur les 4671 échantillons de sols minéraux de l'ÉÉSSAQ, 793 ont été sélectionnés pour réaliser des essais plus approfondis entre autres sur le carbone et la matière organique. Sur les 71 séries de sols, 68 séries en sol minéral ont été retenues. Pour chaque série de sol, quatre sites, un site témoin et trois sites cultivés ont été sélectionnés sur les six sites échantillonnés par série. De ces quatre sites sélectionnés, seulement le point d'échantillonnage validé par les pédologues a été conservé pour colliger le plus d'information possible et éviter des erreurs d'identification de la série de sol. Toutes les horizons Ap1, Ap2 (lorsque présent) et B ont été sélectionnés.

Teneur en MO-paf

L'analyse de la teneur en MO-paf a été conduite sur les 793 échantillons de sols sélectionnés, selon la méthode approuvée pour l'accréditation des laboratoires (CEAEQ, 2003a) et validée par Moreno et al. (2001). Brièvement, environ 10 g de sol sont pesés, séchés à l'étuve à 150°C et incinérés à 375°C dans un four à moufle.

Une analyse préliminaire a été conduite sur la relation Ctotal combustion sèche – MO-paf en considérant les différentes distributions et relation avec différentes variables d'intérêt, comme le matériau parental, la profondeur, la teneur en sable et argile, le pH eau et les teneurs en Ca ou Mg-M3. Les coefficients des régressions linéaires sont aussi rapportés.

Élimination des carbonates à l'acide

Une analyse partielle des carbonates a été réalisée sur les 16 sols présentant un rapport C total/MO paf le plus élevé, soit supérieur à 0,62, par rapport aux 793 échantillons de sols sélectionnés de l'ÉÉSSAQ. Brièvement, les carbonates ont été détruits à l'acide (HCl) et le carbone résiduel (organique) du sol a été analysé par combustion sèche sur appareil LECO.

Environ 0,2 g de sol broyé et tamisé à 150 µm a été pesé précisément et placé dans un tube de verre de 15 mm de dia. x 85 mm préalablement pesé. Avec une pipette, 1 mL de HCl 15% v/v a été ajouté au tube et ce dernier a été agité pendant 1 h sur un agitateur rotatif à 2500 rpm. Un 2^e aliquote de 0,5 mL de HCl a été ajouté au tube et agité à nouveau pendant 1 h, en vérifiant si les carbonates réagissaient encore. Si la réaction était encore présente, un 3^e aliquote de 0,5 mL de HCl a été ajouté au tube et agité à nouveau pendant 1 h. Un dernier aliquote de 0,5 mL de HCl a été ajouté et les tubes ont été chauffés à l'étuve à 85°C, jusqu'à ce que le niveau d'acide diminue au niveau de l'échantillon de sol, soit environ 24 heures plus tard. Par la suite, la température de l'étuve a été réduite à 65°C, jusqu'à ce que l'échantillon soit visuellement bien sec, soit environ 24 heures plus tard. Tout l'échantillon de sol a été transféré quantitativement dans une grande cupule (Leco). Le tube de verre a été pesé après le transfert pour évaluer le % de perte de sol résiduel. Les cupules ont été placées à l'étuve à 105°C (16 - 24hres) pour éliminer un maximum de résidus de HCl. Les cupules ont été laissées à refroidir et fermées avant de les administrer au Leco CN828 selon la procédure habituelle, pour doser le C du sol après élimination des carbonates, assumé comme du C organique. Le C inorganique a été calculé par différence entre le C total initialement mesuré et ce C organique.

Effet des températures de séchage et d'incinération des sols sur la perte au feu

Une seconde analyse partielle a été conduite pour vérifier l'effet des températures de séchage (105 et 150°C) et d'incinération (375, 450, 550°C) sur les pertes de masses observées en fonction des teneurs en C total et en carbonates, de

la texture (matériau parental, classe texturales ou groupes texturaux G1, G2, G3) et de la profondeur d'échantillonnage. L'expérience a aussi été conduite pour comparer les pertes de masse engendrée sur les deux types de sous-échantillons de sols qui servent à la détermination de la MO-paf perte au feu (séché à l'air et tamisé à 2 mm) et la teneur en C total par combustion sèche (broyé et tamisé à 150 µm). Finalement, sur une partie des sols présentant des teneurs en carbonates élevées, le carbone des sols incinérés à 550°C a été dosé pour quantifier la présence de ces carbonates.

55 échantillons de sol ont été sélectionnés parmi les 793 échantillons de sols de l'ÉSSAQ, présentant des ratio C total/MO-paf extrêmes par rapport au ratio 0,58 attendu dans les sols soit les 16 sols initialement sélectionnés pour un ratio plus élevés que 0,62. Trois échantillons de sol d'environ 2,5 à 3,0 g de ces sols ont été pesés et soumis au séchage à l'étuve aux températures de 105°C et 150°C pendant 16 heures et à l'incinération au four à moufle à une température de 375°C pendant 16 heures. Deux de ces échantillons ont été incinérés à 450°C pendant 4 heures. Et un échantillon a poursuivi l'incinération à 550°C pendant un autre 4 heures. Des échantillons de sols broyés à 150 µm provenant d'un programme d'analyse inter-laboratoire américain ont servi de contrôle pendant l'incinération.

Les sols récupérés après l'incinération à 550°C et présentant un pH > 7,2 ont été soumis à l'analyse au LECO pour doser les formes résiduelles de C. La limite de détection (LDM) du C total sur l'appareil LECO CN828 dans ce contexte avec des cendres était de 0,06 % de C, ce qui correspond à environ 0,5 % de CaCO₃. Ce qui représente un enjeu pour détecter de très faibles valeurs en carbonates ou C inorganique dans les sols.

RÉSULTATS

MO-paf vs C total par combustion sèche.

Les corrélations simples entre la teneur en carbone total (combustion sèche LECO) et la matière organique évaluée par perte au feu (MO-paf) sont présentées par horizon (Ap1, Ap2 et B) à la Figure 1. Dans les horizons Ap1 et Ap2, les corrélations simples sont les plus élevées dans les sols argileux et les moins élevées dans les sols sableux à squelettiques. Dans les horizons Ap, des observations se trouvent dans les sols sableux (en bleu) de part et d'autre des figures de corrélations entre la MO_paf et le Ctotal. Dans l'horizon B, les corrélations simples sont moins élevées dans les tills suivis des sols sableux à squelettiques.

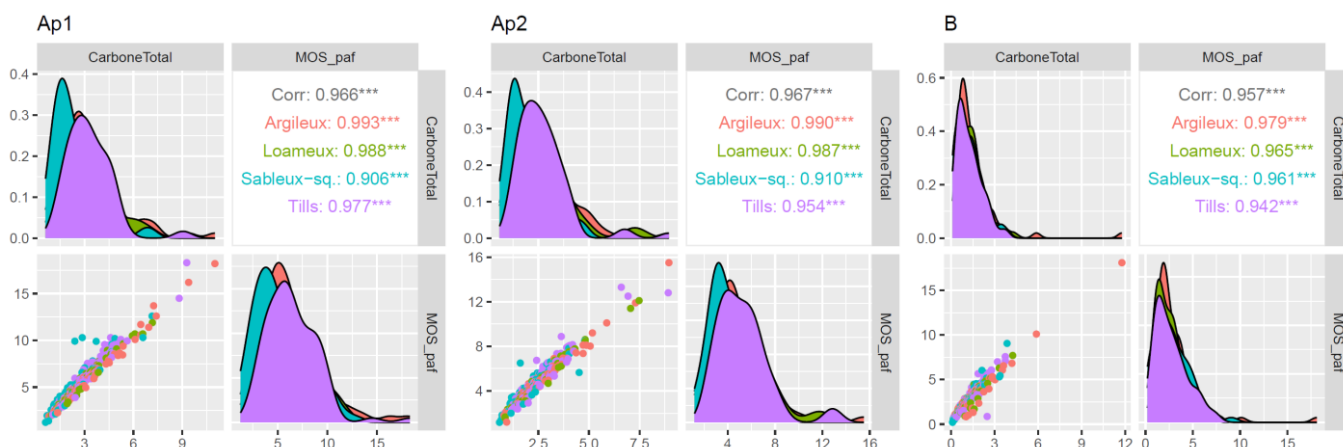


Figure 1 : Corrélations simples entre la teneur en carbone total et la matière organique évaluée par perte au feu (MO-paf) par matériaux parentaux dans les trois horizons (Ap1, Ap2, et B).

Dans les horizons Ap1 et Ap2, le ratio Ctotal sur MO-paf est plus souvent inférieur au ratio attendu de 0,58 dans les sols sableux à squelettiques (visible en bleu à la Figure 2 et Figure 3). Deux sols sableux des séries Uplands et Morin avec plus de 80 % de sable de et plus de 10% MO-paf présentent des ratios inférieurs à 0,3 dans l'horizon Ap2. Le sol du même site de la série Uplands présente aussi dans l'horizon Ap2 un ratio Ctotal /MO-paf inférieur à 0,2, ainsi que des teneurs en sable (>80%) et en MO-paf élevées (6,5 %). La teneur en MO dans ces sols sableux doit être majoritairement particulaire. Il se pourrait qu'elle cause davantage de biais au moment de la prise d'échantillon et plus particulièrement pour le broyage à 150 µm et la mesure du C total LECO, si les quantités prélevées sont plus faibles.



Figure 2 : Corrélations simples entre le ratio Ctotal sur MO-paf, la teneur en sable et la teneur en Ca-Meh3 dans les trois horizons (Ap1, Ap2, et B).

Dans l'horizon Ap2, on retrouve aussi à l'inverse un argileux de la série Saint-Blaise et un sableux de la série Saint-Bruno dont le ratio Ctotal /MO-paf dépasse 0,8, et deux tills dont le ratio dépasse 0,7, ce qui pourrait témoigner d'une présence de carbonates.

Dans l'horizon B, dix sols présentent un ratio de Ctotal /MO-paf inférieur à 0,3 provenant de six sols argileux (2 sites sur série Providence; 3 sur Chambly et 1 sur Kierkosky), de cinq tills (2 Raimbault, 1 Boucherville, 1 Dufferin et 1 Saint-Brigide), de deux sols sableux (Saint-Damase) et d'un sol loameux (Saint-Aimé). Ces sols présentent des teneurs en MO-paf variant d'environ 0,5 à 2%. Le ratio de Ctotal /MO-paf inférieur à 0,3 de ces sols ne témoigne pas de présence de carbonates, mais ils sont relativement alcalins; 4 ont un pH eau > 7,5, sans toutefois présenter des teneurs élevées en Ca-M3, soit inférieure à 3000 mg/kg.

À l'inverse des ratios Ctotal/MO-paf supérieure à 1 témoigne d'une présence importante de carbonates, étant donné qu'il y a plus de carbone que de matière organique et que le carbone organique ne devrait constituer qu'une partie de la matière organique. Un till de la série Bedford, 2 sols argileux de la série Saint-Blaise et un de la série Roquemaure ainsi qu'un sol loameux de la série Sainte-Barbe présente un tel ratio ainsi qu'un pH > 8,0.

Par convention, la matière organique est constituée de 58 % de carbone (ou un facteur inverse de 1,724), toutefois le rapport C total sur MOS -paf est loin d'être uniforme et la médiane des distributions observées par matériaux parentaux et horizon du sol se rapprocherait davantage de 0,5 ou 50 % (Figure 3). Plusieurs facteurs peuvent affecter cette relation, entre autres la présence de carbonates et les différentes formes de matière organique qu'on retrouve dans les différents types de sols et ces effets semblent varier selon les matériaux parentaux et la profondeur d'échantillonnage. Les sols sableux présentent un rapport C total/MO-paf plus faible que les sols argileux, tandis que tout type de sols prélevés en profondeur dans l'horizon B présente un rapport C total/MO-paf plus faible que 0,5. En conclusion, le rapport C total/MO paf est en moyenne inférieur à 0,58, tel que défini par convention.

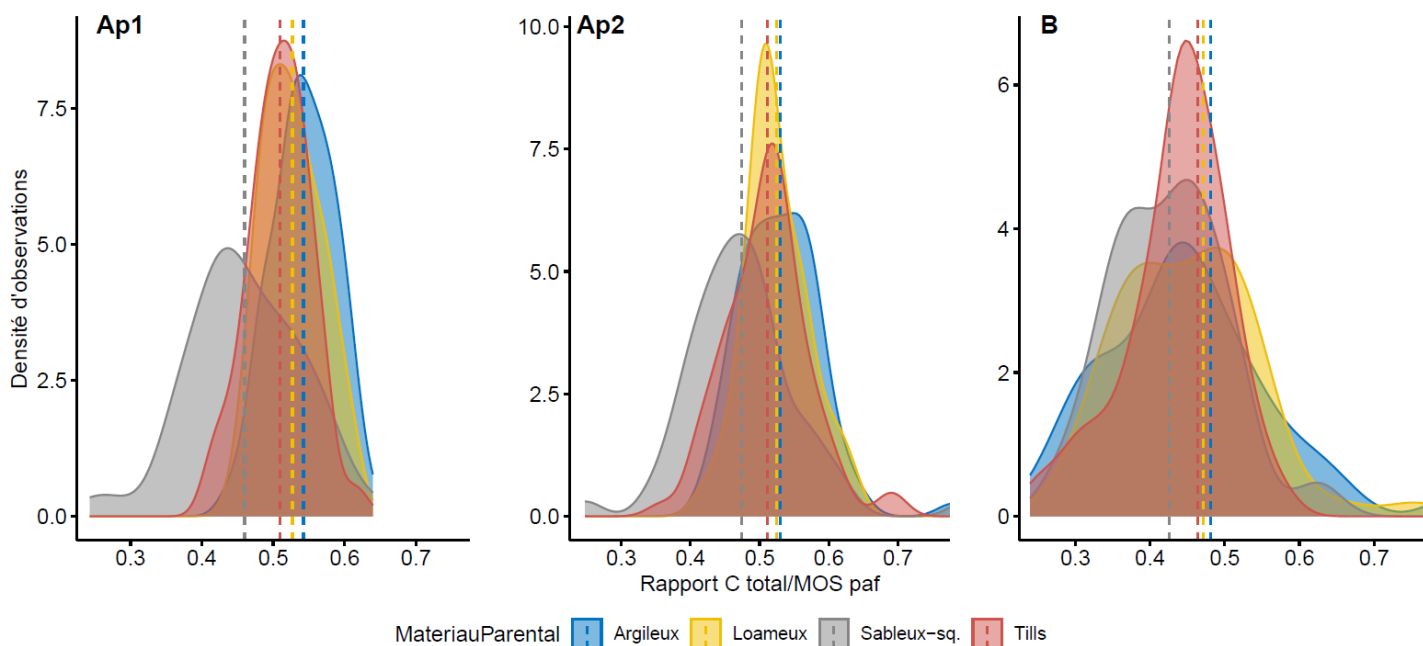


Figure 3 : Distribution du rapport C total/MO-paf en fonctions des matériaux parentaux et des horizons échantillonnés

La présence de carbonates dans les sols augmente le rapport C total/MO paf, car le C total par combustion sèche (LECO) inclut les formes inorganiques. Tel que présentés précédemment, certains échantillons avaient un rapport C total/MO-paf plus élevé, plus fréquemment dans l'horizon B en lien avec des pH et des teneurs en Ca-M3 élevés, soulignant la présence de carbonates dans quelques échantillons de sols. D'autres échantillons présentaient au contraire des rapports C total/MO-

paf inférieurs à 0,50, particulièrement dans les horizons Ap1 et Ap2 de sols très sableux. Des travaux ont été entrepris pour évaluer l'importance des carbonates dans les sols de l'ÉSSAQ présentant un rapport C total/MO-paf élevé et une analyse par perte au feu a été conduite pour comprendre la nature de la matière organique dans les sols sableux qui présentent un plus faible rapport Ctotal/MO-paf.

Présence de carbonates dans les sols

L'élimination des carbonates à l'acide (HCl) sur 16 échantillons de sol dont le rapport C total/MO-paf était plus élevé que 0,62 g/g a confirmé la présence de carbonates dans ces sols (Tableau 1). Des valeurs entre 0,14 et 2,09 % de C inorganique ont été mesurées par différence entre le C total et le C mesuré après élimination des carbonates, soit des proportions de 0,05 à 0,84 de C inorganique par rapport au C total.

Un échantillon avait une teneur en carbone inorganique (sous forme de carbonate) plus élevée de 2,09 % représentant 84 % du carbone total de l'échantillon (2,48 % de C total). Deux autres échantillons présentaient des teneurs en C inorganique de 1,04 et 1,15 % et le reste des échantillons présentaient des teneurs inférieures à 0,94 %. Ce C inorganique mesuré sous forme de carbonates se retrouvaient principalement dans les horizons B et Ap2 de sept sols argileux, trois Tills, cinq sol loameux et un seul sol sableux à squelettique.

Tableau 1 : Teneurs en diverses formes de carbone de 16 échantillons de sols présentant les rapports C total/MO-paf les plus élevés parmi 793 échantillons de sols sélectionnés de l'ÉSSAQ.

Série	Hori zon	Materiau parental	C total %	MO-paf %	C total/ MO-paf g/g	pH	Ca Me-3 Mg/kg	C org./ MO-paf g/g	C org. %	C inorg. %	C inorg. /C total g/g
Bedford	B	Tills	2,48	0,86	2,88	8,24	18163	0,45	0,39	2,09	0,84
Saint-Blaise	B	Argileux	1,05	0,83	1,27	8,19	5552	0,28	0,23	0,82	0,78
Saint-Blaise	B	Argileux	1,23	1,02	1,21	8,16	4724	0,37	0,37	0,86	0,70
Roquemaure	B	Argileux	1,51	1,31	1,15	8,03	10478	0,28	0,36	1,15	0,76
Sainte-Barbe	B	Loameux	0,95	0,90	1,05	8,10	3049	0,40	0,36	0,59	0,62
Sainte-Barbe	B	Loameux	1,58	1,69	0,93	8,02	3408	0,50	0,84	0,74	0,47
Palmarolle	B	Argileux	1,47	1,79	0,82	7,66	12413	0,29	0,53	0,94	0,64
Roquemaure	B	Argileux	1,84	2,35	0,78	7,79	9637	0,46	1,08	0,76	0,41
Saint-Bruno	Ap2	Sableux-sq.	4,41	5,65	0,78	6,43	1822	0,74	4,20	0,21	0,05
Saint-Blaise	Ap2	Argileux	0,92	1,20	0,77	8,09	4755	0,39	0,46	0,46	0,50
Le Bras	B	Loameux	1,32	1,77	0,75	6,99	1363	0,66	1,17	0,15	0,11
Raimbault	Ap2	Tills	1,98	2,92	0,68	6,28	685	0,60	1,76	0,22	0,11
Bedford	Ap2	Tills	8,51	12,8	0,66	7,52	6874	0,58	7,47	1,04	0,12
Normandin	B	Argileux	2,53	3,96	0,64	6,30	1925	0,60	2,39	0,14	0,06
Le Bras	B	Loameux	1,82	2,86	0,64	6,53	1517	0,53	1,51	0,31	0,17
Le Bras	Ap2	Loameux	2,91	4,68	0,62	6,37	1941	0,53	2,48	0,43	0,15

Si le ratio Ctotal/MO-paf indique la possibilité de retrouver des carbonates dans les sols, lorsqu'il dépasse 0,5 ou 0,58 par exemple, la Figure 4a présente la relation entre les teneurs observées en C inorganique et Ctotal/MO-paf et la Figure 4b celle avec le ratio C inorg. /C total. Une équation logarithmique permet d'estimer les ordonnées à l'origine de ces équations, lorsque les teneurs en C inorganiques (Figure 4a) et les ratios C inorganiques/C total sont égales à 0 (Figure 4b), soit des ratios de Ctotal/MO-paf équivalant respectivement à 0,470 et 0,448. Toutefois, ces estimés sont peu probables : toutes les observations supérieures à ces ratios correspondent à plus 50 % des échantillons sélectionnés de l'ÉSSAQ. L'équation logarithmique utilisée et le nombre relativement restreint d'observations sur des échantillons présentant un ratio de Ctotal/MO-paf inférieur à 0,62 en serait la cause.

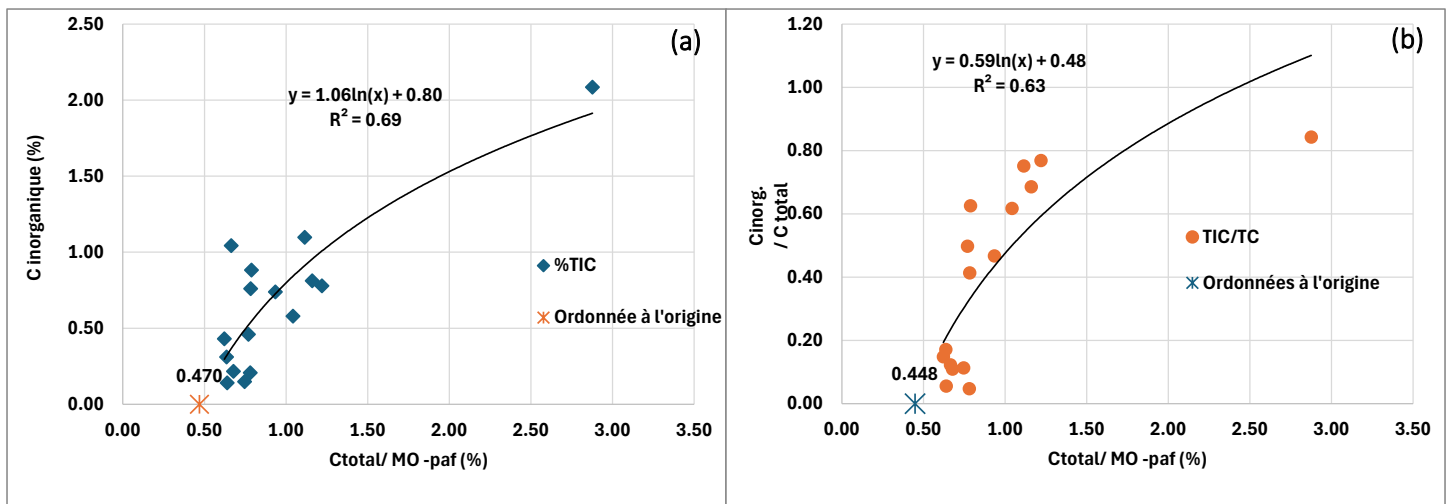


Figure 4 : Relations entre la teneur en C inorganique (a), le ratio C inorg./C total (b) et le ratio C total / MO-paf comme indicateur de présence de carbonates.

En comparant les ratios Cttotal/MO-paf (avant le retrait des carbonates) et C org/MO-paf (après le retrait des carbonates) en fonction de la teneur en C organique obtenue ou de la MO-paf, on observe des ratios plus élevés de Cttotal/MO-paf lorsque les teneurs en C organique ou de MO-paf sont plus faibles et à l'inverse des diminutions plus importantes du ratio Corg./MO à ces mêmes teneurs plus faibles de C organique ou de MO. Ce comportement inattendu pourrait-il s'expliquer par le traitement à l'acide et le chauffage pour évaporer le HCl qui pourrait «bruler» du C organique. Cette hypothèse de pertes serait amplifiée par le fait que le traitement des carbonates aurait été plus intense à faible teneur en C organique. Des essais supplémentaires présentés plus bas ont été réalisés pour tenter d'expliquer ces résultats.

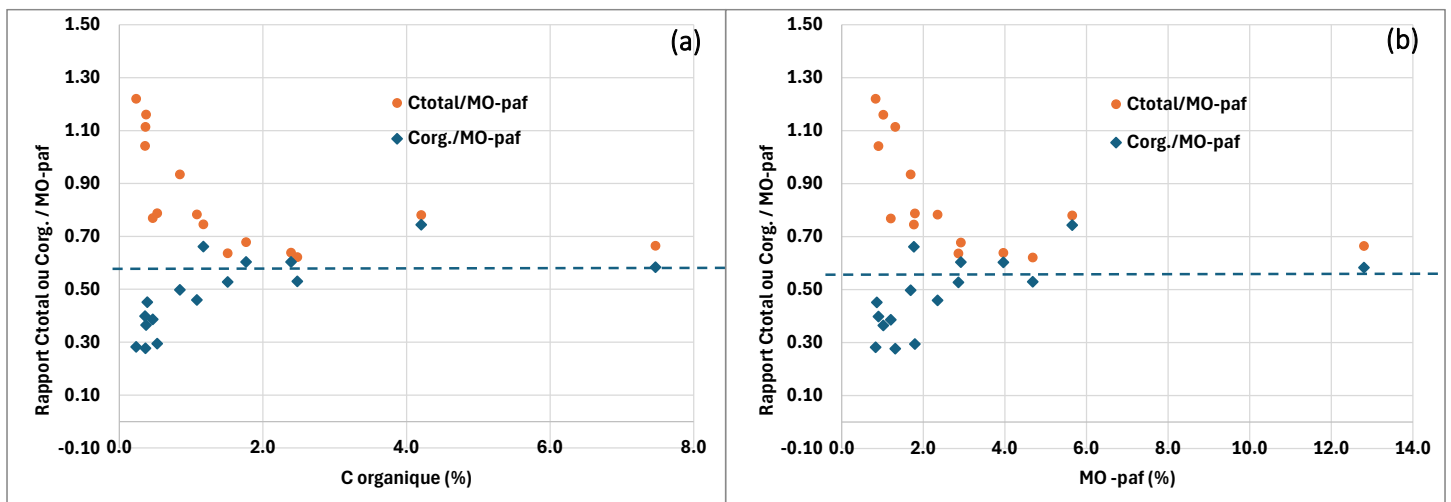


Figure 5 : Variations des ratios Cttotal/MO-paf (avant le retrait des carbonates) et C org/MO-paf (après le retrait des carbonates) en fonction de la teneur en C organique calculée par différence et de la MO-paf.

Dans les 16 échantillons de sols retenus, la teneur en C inorganique (carbonates) est étroitement reliée ($R^2 = 0,89$) à des teneurs élevées en Ca -Mehlich3, mais n'est pas reliée à la teneur en Mg-Melich-3, suggérant que ces carbonates se retrouvent plus souvent sous forme de carbonates de calcium, que de carbonates de magnésium (Figure 6 a et b).

La Figure 7 présente le ratio Cinorg./Ctotal en fonction du pH-eau et du pH SMP des sols. Neuf échantillons présentent un ratio Cinorg./Ctotal supérieur à 40 % avec un pH-eau > 7,6 et un ratio Cinorg./Ctotal inférieur à 20 % avec un pH-eau \leq 7,6 et \leq

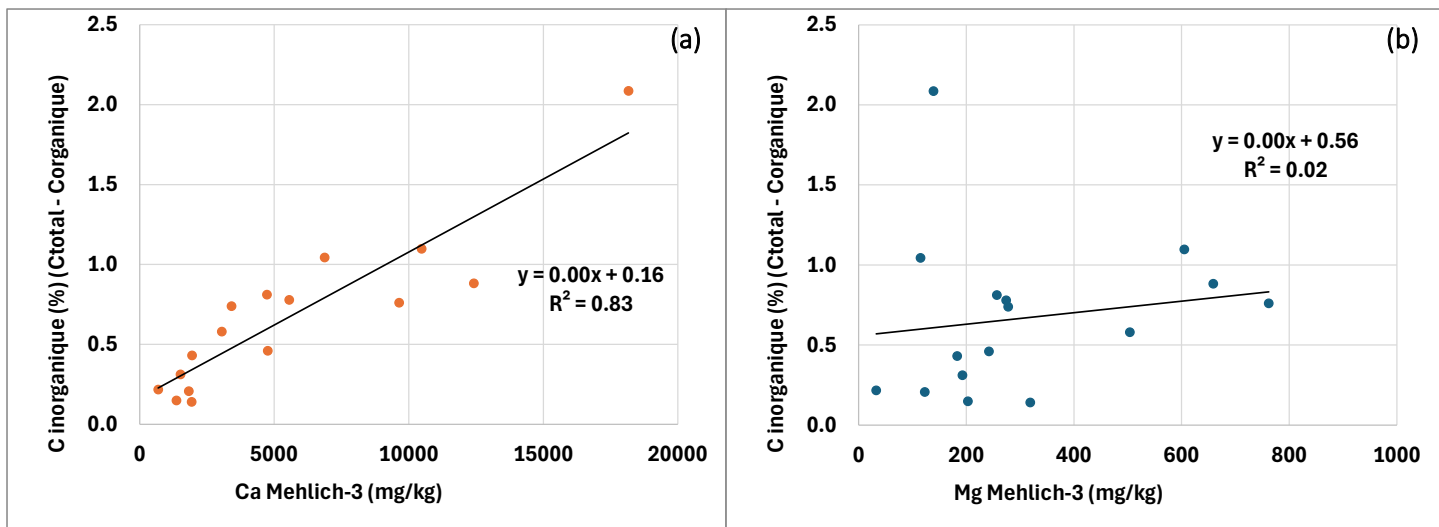


Figure 6 : Relation linéaire entre la teneur en C inorganique (carbonates éliminés à l'acide HCl) et la teneur en Ca Meh-3 (a) et relation moins évidente entre la teneur en C inorganique et la teneur en Mg Meh-3 (b).

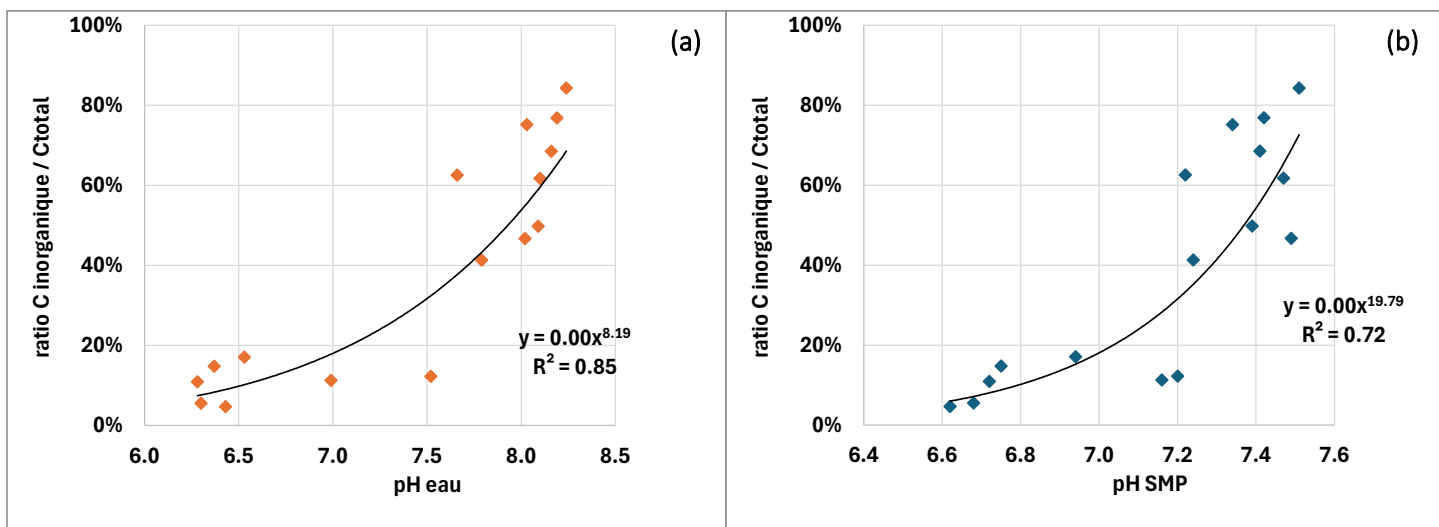


Figure 7 : Relations quadratiques entre le ratio Cinorg./Ctotal et le pH-eau (a) et le pH-tampon SMP du sol (b).

Si un pH-eau supérieur à 7,5 et un pH SMP supérieur à 7,2 étaient utilisés comme indicateur de la présence de carbonates dans les sols de l'ÉÉSSAQ, des carbonates se trouveraient présents dans une proportion variant entre 4,2 % et 7,5 % des échantillons de sols de l'ÉÉSSAQ (Tableau 2). De ces échantillons, près de 1 % des observations ont des teneurs inférieures à 0,5 % de C total provenant de l'horizon B. Dans les sols dont la teneur en C total était supérieure à 0,5 %, la proportion pouvant présenter des carbonates diminueraient entre 3,3 et 5,2 % des sols.

Tableau 2 : Fréquences du nombre d'échantillons de sols minéraux de l'ÉSSAQ qui ont un pH eau supérieur à 7,5, un pH tampon SMP > à 7,2 ou les deux.

	Tout C total		Ctotal > 0,5 %	
	Nb d'éch.	Fréquence	Nb d'éch.	Fréquence
pH eau > 7,5	241	5,1%	197	4,2%
pH-SMP > 7,2	349	7,5%	243	5,2%
pH eau > 7,5 et pH-SMP > 7,2	195	4,2%	154	3,3%
Somme éch ÉSSAQ	4681		4681	

En résumé, une évaluation sommaire de la présence de carbonates dans les sols de l'ÉSSAQ a permis d'observer quelques tendances sans pouvoir conclure de façon définitive sur l'importance de la présence de ces carbonates dans les sols du Québec. L'utilisation du ratio Ctot/MO-paf a été relativement performant pour déceler la présence de carbonates (> 0,15 % de C inorganique) lorsque celui-ci dépassait 0,62, même si dans quelques sols ces carbonates représentaient moins de 20 % du Ctotal. En se basant sur le pH des sols dans lesquels nous avons observé des proportions de carbonates > à 40 % du C total, la présence de carbonates dans les sols de l'ÉSSAQ pourrait se trouver de façon significative dans environ 5 % des sols à l'échelle du Québec. Toutefois, dans les cas où les teneurs initiales en C total ou en MO-paf sont faibles, l'élimination des carbonates à l'acide avec chauffage semble engendrer des biais que nous n'avons pas été en mesure d'expliquer et l'analyse mériterait d'être poussée plus loin.

Effets des températures et de séchage sur la perte au feu

L'incinération des 55 échantillons de sol à différentes températures entre 150, 375, 450 et 550°C a produit des pertes de masses (pertes au feu) en moyenne plus importantes entre 150 et 375°C (3,51 %) comparativement aux autres températures entre 375 et 450°C (0,44 %) et entre 450 et 550°C (0,60 %) (Tableau 3). Ces pertes de masse plus importantes entre 150 et 375°C sont attribuables en bonne partie à l'incinération de la matière organique et de ses constituant comme le carbone organique. Les pertes de masses entre 375 et 550°C représentaient tout de même en moyenne plus de 29% de la perte au feu et peuvent même atteindre jusqu'à 68% de la perte de masse.

Tableau 3 : Statistiques sur les pertes feu mesurées sur 55 échantillons de sols à différentes températures

Horizon	150-375°C	375-450°C	450-550°C	Total 150-550°C	375-550°C / Total
	Masse de sol incinérée (%)				% du total
Moyenne	3,51	0,44	0,60	4,55	29,5
Min	0,46	0,08	0,07	0,68	5,8
Max	19,05	1,62	2,59	22,33	67,7
Écart type	3,92	0,35	0,49	4,23	16,2

Les pertes de masses entre 150 et 375°C, sont beaucoup plus corrélées à la teneur en C total que les pertes entre 375 et 450°C et entre 450 et 550°C (Figure 8a). Des pertes de masses au-delà de 375 sont observées à des plus faibles valeurs de C total et sont plus souvent en lien avec la teneur en Ca Me-3 dans le sol que la perte au feu (paf) entre 150 et 375°C (Figure 8b). Ces liens entre la paf au-delà de 375°C et la teneur en Ca Me-3 s'expliqueraient par des pertes en carbonates, même à des températures aussi faibles. Les pertes à ces températures semblent aussi influencées par la teneur en argile (Figure 8c) et inversement par la teneur en sable (Figure 8d), alors les paf entre 150 et 375°C semblent peu influencées par la granulométrie du sol. Au contraire, les pertes de masses observées entre 150 et 375°C sont beaucoup moins corrélées avec les teneurs en Ca Me-3 ou les teneurs en argiles ou sables.

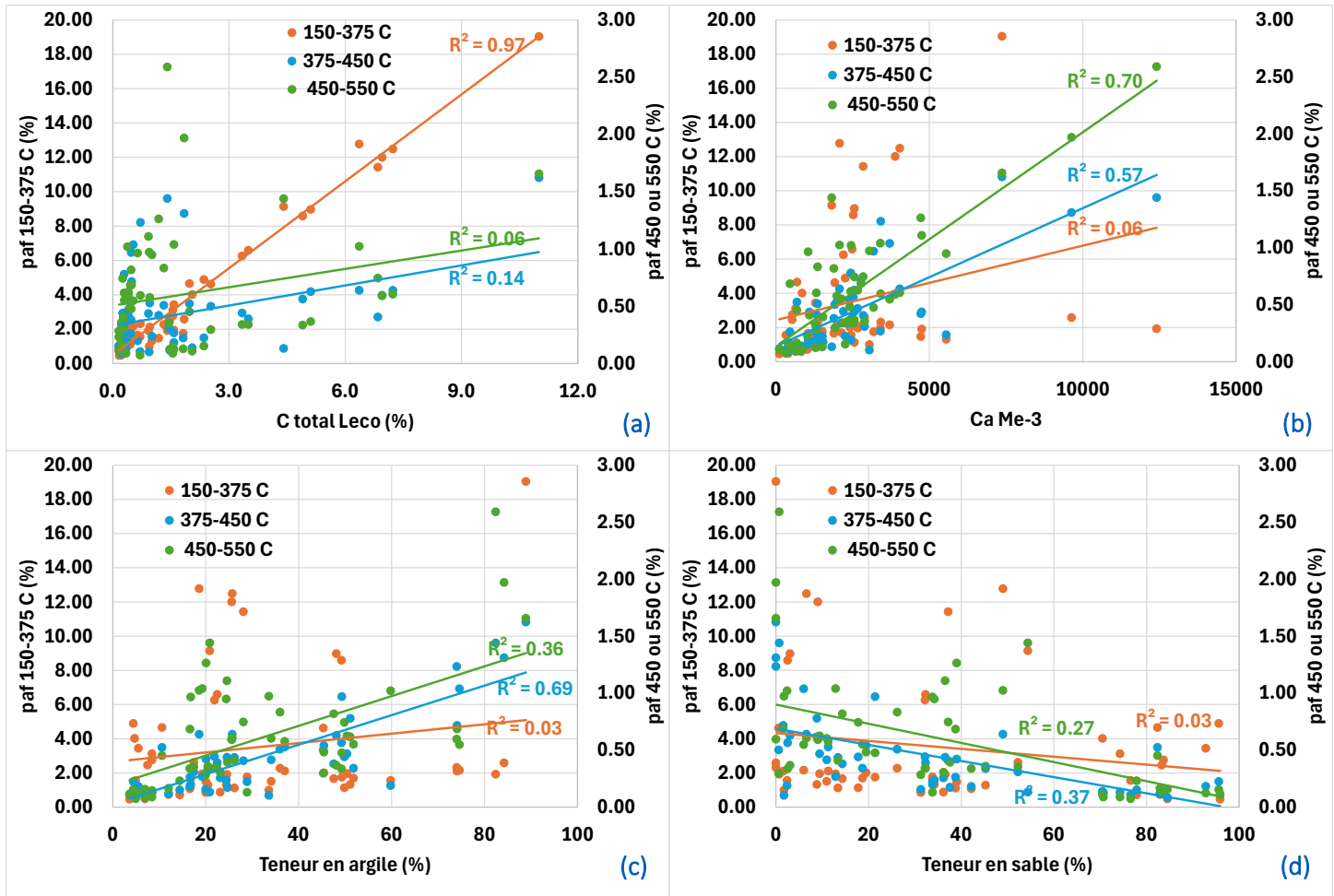


Figure 8 : Pertes au feu (%) mesurées à différents paliers de températures entre 150, 375, 450 et 550°C en fonction de la teneur en C total (a), en Ca Me-3(b), en argile (c) et en sable (d).

En termes de variation de masse d'un sol séché à 105 C et incinéré à 550°C, la perte au feu entre 150 et 375°C représente 76 % de cette masse dans les sols sableux, tandis qu'elle ne représente que 54 % de la masse perdue entre 105 et 550°C dans les sols argileux (Figure 9). À l'inverse, la masse des sols argileux incinérée au-delà de 375°C (450+550°C) représente près de 34 % de la masse totale, tandis que le 12 % de perte de masse résiduelle dans les sols argileux est attribué à de l'eau interstitielle après séchage à 150°C. Dans les sols loameux, les tills et les sols sableux ces pertes sont la plupart du temps moins importantes, à la fois en termes de masses perdues après chauffage à 150°C et des pertes au feu au-delà 375°C. Dans les horizons Ap1 et Ap2, les pertes au feu sont les plus importantes entre 150 et 375°C, soit respectivement 85 et 88 %, alors qu'elles ne sont que de 55 % dans l'horizon B. En contrepartie, une proportion importante de la perte au feu (33%) dans l'horizon B survient entre 375 et 550°C. Les pertes plus importantes dans les horizons de surface à de plus faibles températures d'incinération peuvent être reliée à la teneur en matière organique plus élevée en surface, alors qu'en profondeur, les pertes plus importantes à des températures plus élevées pointent vers des pertes de carbonates ou de feuilletés de phyllosilicates comme les micas associés à l'illite (Lebron et al., 2024, Sleutel et al., 2006).

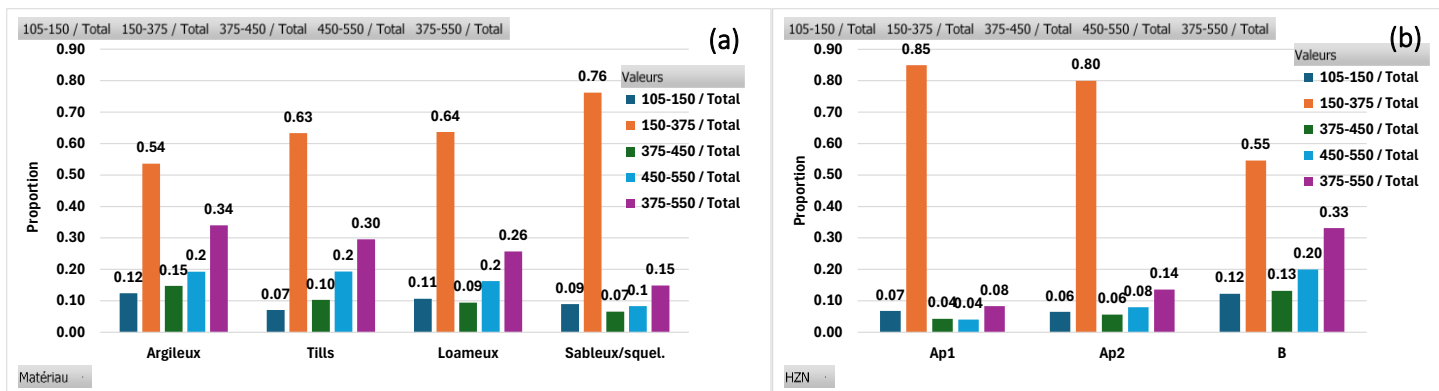


Figure 9 : Proportion des pertes au feu (%) mesurées à différents paliers de températures entre 105, 150, 375, 450 et 550°C en fonction du matériau parental (a) ou de l'horizon de sol échantillonné (b).

Effet de la mouture d'un échantillon de sol à 150 µm en comparaison d'échantillons de sols tamisé à 2 mm sur la perte au feu (%) entre 150 et 375°C.

Des échantillons de sols tamisés à 2 mm ainsi que des sols broyés et tamisés à 150 µm ont été soumis à la perte au feu aux différentes températures pour vérifier l'effet du broyage des sols sur la perte au feu. Aucun effet majeur ne semble provenir de l'effet de broyer ou non les sols à 150 µm par rapport aux sols tamisés à 2 mm sur les paf mesurées entre 150 et 375°C (Figure 10 a et b). Toutefois la variabilité entre les mesures semble plus importante entre ces deux méthodes de préparation de sol que la reprise d'un 2^e échantillon de sol tamisé à 2 mm qui n'a pas subi de broyage (Figure 10 c). Ces variations entre les différents échantillons selon la mouture pourraient expliquer une partie des variations obtenues sur le ratio entre le C total dosé sur un sol de 150 µm et la MO paf sur un sol de 2 mm.

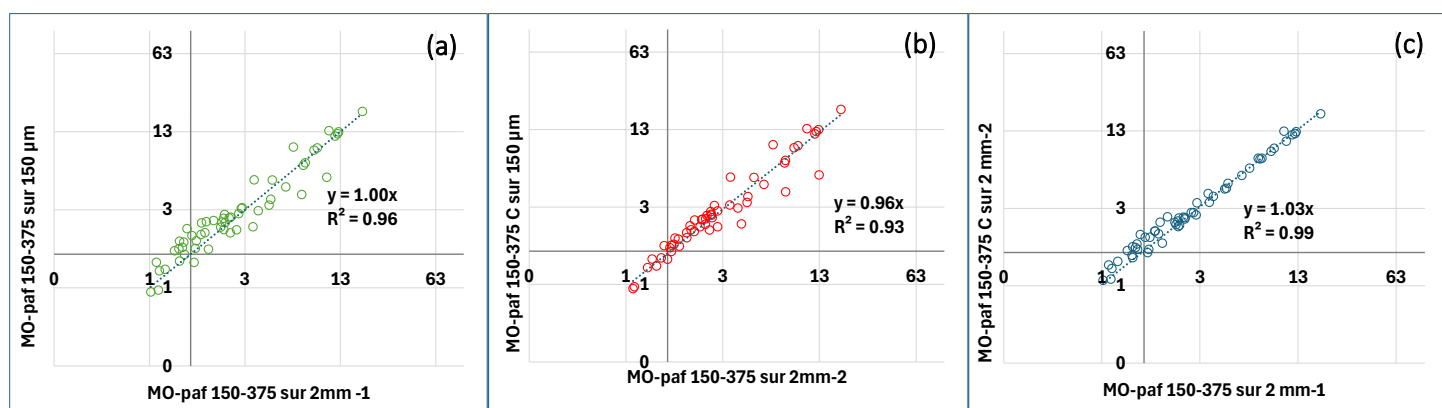


Figure 10 : Effet de la mouture des échantillons de sol à 150 µm sur la perte au feu (%) entre 150 et 375°C en comparaison d'échantillons tamisés à 2 mm (a et b) et de la reprise analytique d'un même échantillon de 2 mm (c).

Dosage du carbone résiduel après incinération à 550°C.

Sur les 16 échantillons qui ont été lavés à l'acide et chauffés pour éliminer les carbonates et doser le carbone organique, sept ont subi une perte au feu à 550°C et le carbone a été dosé dans les cendres. Il y a une certaine corrélation entre l'estimation des carbonates après lavage à l'acide et le C dosé après paf à 550°C (Figure 11a). Toutefois, les pertes de ces dernières seraient plus faibles en raison des pertes au feu qui peuvent avoir eu lieu à des températures plus faibles, prévalant surtout en profondeur tel qu'évoqué précédemment. D'autres échantillons de sols avec des ratios C total/MO-paf inférieurs à 0,4 avaient très peu de carbone encore présent (< 0,1 %) après paf à 550°C (Figure 11b). En conclusion, des formes de

carbone sont mesurées par paf à des températures d'incinération supérieures à 550°C et il est fort probable qu'elles soient reliées à des formes de carbonates. D'autres part, les ratios C total/MO-paf supérieurs à 0,5 permettent d'identifier les sols ayant des carbonates ou du C dosé au LECO dans les cendres obtenues à 550°C.

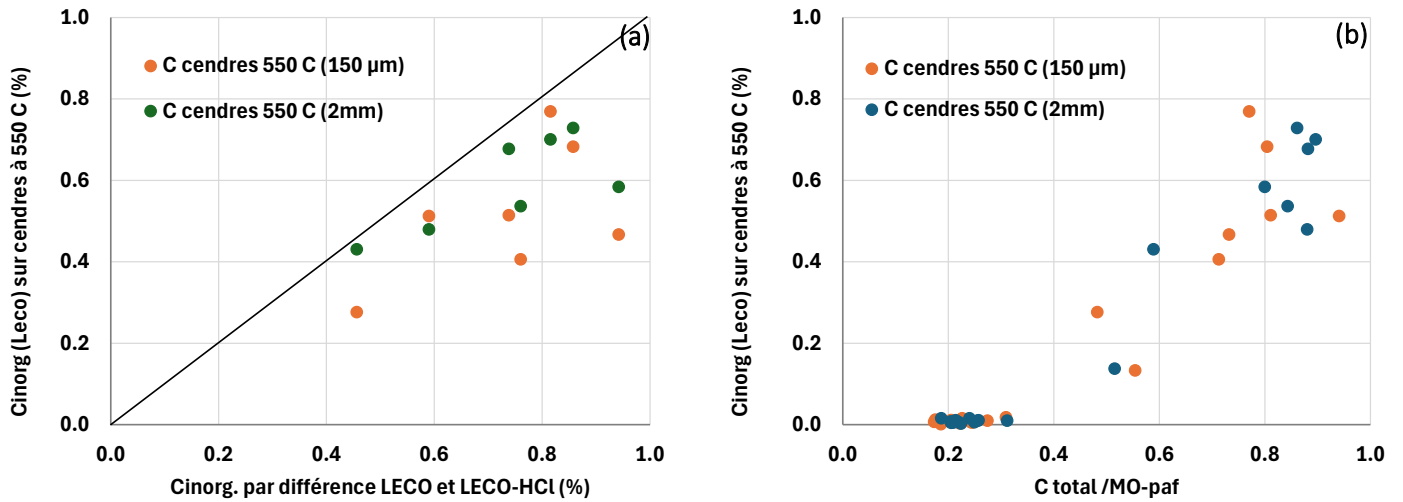


Figure 11 : Relation entre le C dosé dans les cendres d'un échantillon de sol incinéré à 550°C et la teneur en C inorganique estimée par différence entre le C total LECO et le C organique LECO dosé après lavage des carbonates à l'acide HCl (a). Relation entre le C dosé dans les cendres d'un échantillon de sol incinéré à 550°C et le ratio C total / MO-paf entre 375 et 550°C (b).

En résumé, les essais réalisés par perte au feu confirment que la température de séchage à 150°C et celle pour l'incinération à 375°C sont de meilleures températures que celles à 450 et 550°C, pour estimer la teneur en matière organique des sols, en considérant la corrélation obtenue avec le C total mesuré par combustion sèche au LECO. L'utilisation de températures supérieures à 375°C n'a pas permis de déceler d'importantes quantités de C qui seraient présentes sous forme de matière organique récalcitrante, en raison encore une fois des faibles corrélations obtenues avec le C total mesuré par combustion sèche au LECO. Les corrélations négatives obtenues avec l'argile et pour les sols argileux plus spécifiquement en profondeur dans l'horizon B suggéreraient plutôt des pertes au feu liées à des formes minérales que certains ont rapporté comme étant de mica ou de phyllosilicates. La corrélation entre la teneur en Ca Meh-3 et les pertes au feu à des températures supérieures à 375°C, de même que les teneurs en C mesurées dans les cendres après incinération à 550°C témoignent d'une éventuelle présence de carbonates qui peuvent être incinérées, mêmes à des températures entre 375 et 550°C. Les essais ont aussi révélé un certain biais lié à la préparation et à la reprise d'échantillons pour réaliser des analyses sur des fractions de sol à différentes moutures, soit de 2 mm pour la perte au feu ou 150 µm pour la combustion sèche sur LECO. La thermogravimétrie couplée à un lecture des émissions de CO₂ serait plus appropriée pour conduire des essais plus concluant sur les quantités de C émises aux différentes températures.

CONCLUSION

L'analyse du rapport C total sur MO-paf d'une sélection de 793 échantillons de sol de l'ÉE SSAQ a permis de constater qu'en moyenne ce rapport se situe plus près de 0,5 que de 0,58 (ou un facteur inverse de 1,724), tel que défini par convention. L'utilisation de la teneur en MO-paf pourrait donc surestimer les véritables teneurs en C dans les sols, si elle était utilisée à cette fin avec un facteur de 1,724. Le rapport C total/MOS -paf est cependant loin d'être uniforme. Les sols sableux présentent un rapport C total/MO-paf plus faible que les sols argileux, tandis que tout type de sols prélevés en profondeur dans l'horizon B présente un rapport C total/MO-paf plus faible que 0,5. Quelques échantillons de sols (5/793) dont le rapport C total sur MO-paf est supérieur à 1,0, pointent vers des teneurs importantes en carbonates. Les différents niveaux de stabilisation de la matière organique qu'on retrouve dans les différents matériaux parentaux et profondeurs pourraient influencer ce rapport. Les formes particulières de la matière organique peuvent aussi engendrer des biais lors de la reprise des échantillons surtout lorsqu'elles sont prépondérantes comme dans les sols sableux. Un essai sera conduit au laboratoire pour vérifier l'importance de ce biais dans le protocole actuel de reprise d'échantillon.

L'essai porté sur 16 échantillons présentant un rapport C total sur MO-paf plus élevés que 0,62 a révélé la présence de carbonates à des niveaux variant entre 0,14 et 2,09 % de C inorganique, représentant pour neuf de ces échantillons, plus de 40 % du C total. La teneur en C inorganique est corrélée à la teneur en Ca-Mehlich, mais de l'est pas avec le Mg Meh-3. L'utilisation d'un pH eau > 7,5 et d'un pH SMP > 7,2 comme critères a permis d'estimer à environ 5 %, la proportion de sols dont la présence de carbonates pourrait se trouver de façon significative dans un horizon ou l'autre à l'échelle du Québec. Toutefois, ce n'est qu'une évaluation sommaire qui a permis d'observer quelques tendances sans pouvoir conclure de façon définitive sur l'importance de la présence de ces carbonates dans les sols du Québec.

Les essais réalisés par perte au feu confirment que les températures de séchage à 150°C et d'incinération à 375°C sont plus adéquates que celles à 450 et 550°C, pour estimer la teneur en matière organique des sols, en considérant la corrélation obtenue avec le C total mesuré par combustion sèche. L'utilisation de températures supérieures à 375°C a plutôt conduit à des pertes qui corrélaient positivement avec la teneur en argile et plus spécifiquement en profondeur dans l'horizon B des sols argileux, qui pointent vers des pertes sous formes minérales (mica ou de phyllosilicates). La corrélation entre la teneur en Ca Meh-3 et les pertes au feu à des températures supérieures à 375°C, de même que les teneurs en C mesurées dans les cendres après incinération à 550°C témoignent d'une éventuelle présence de carbonates, qui peuvent même être incinérées à des températures entre 375 et 550°C. Les essais ont aussi révélé un certain biais lié à la préparation et à la reprise d'échantillons pour réaliser des analyses sur des fractions de sol à différentes moutures, soit de 2 mm pour la perte au feu ou 150 µm pour la combustion sèche sur LECO.

Les résultats de ces différents essais ont mis en lumière quelques phénomènes importants à considérer lors de l'analyse des carbonates et de la comparaison des ratios entre C organique, C total et matière organique par paf. Au moment de réaliser ces essais, le laboratoire n'était pas encore équipé d'un appareil permettant de doser adéquatement le C avant et après élimination des carbonates par combustion sèche. La thermogravimétrie couplée à un lecteur des émissions de CO₂ serait aussi plus appropriée pour conduire des essais plus concluants sur les quantités de C émises aux différentes températures. Ainsi, avec l'acquisition de ces nouveaux appareils dans les prochains mois à l'IRDA, une meilleure définition de l'importance des carbonates dans les sols du Québec (que nous estimons encore marginale, à environ 5% des sols), ainsi qu'un meilleur estimé du rapport C organique /MO-paf (que nous estimons plus près de 0,5 que de 0,58) pourront être produits. Ces travaux devraient mener à une meilleure capacité de diagnostiquer la santé des sols et leur évolution à partir de suivis de la matière organique ou de teneurs en C dans les sols, en réduisant les biais dans les analyses et leur interprétation.

RÉFÉRENCES

- CEAEQ, 2003. Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec et MAPAQ. Détermination de la matière organique par incinération : méthode de perte de feu (PAF), MA. 1010 – PAF 1.0, Ministère de l'Environnement du Québec, , 9 p.
- Cousin, I., Desrousseaux, M., Leenhardt, S., Angers, D., Augusto, L., Ay, J.-S., et al. (2025). Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs. INRAE. <https://hal.inrae.fr/hal-04934694>
- Hoogsteen, M.J.J., E.A. Lantinga, E.J. Bakker, J.C.J. Groot et P.A. Tiftonell. 2015. Estimating soil organic carbon through loss on ignition: effects of ignition conditions and structural water loss. *European Journal of Soil Science*. 66 : 320-328. doi: 10.1111/ejss.12224.
- Jha, P., A. K. Biswas, B.L. Lakaria, R. Saha, M. Singh et A. Subba Rao. 2014. Predicting Total Organic Carbon Content of Soils from Walkley and Black Analysis, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 45:6, 713-725, DOI: 10.1080/00103624.2013.874023.
- Kasoki, G.N., P. Nkedi-Kizza et W.G. Harris. 2009. Varied Carbon Content of Organic Matter in Histosols, Spodosols, and Carbonatic Soils. *Soil Science Society of America Journal*. 73 (4) : 1313-1318.
- Lebron, I., D.M. Cooper, M.A. Brentegani, L.A. Bentley, G.D.S. Pereira, P. Keenan, J.B. Cosby, B. Emmet et D.A. Robinson. 2024. Soil carbon determination for long-term monitoring revisited using thermos-gravimetric analysis. *Vadose Zone Journal*. 23 : e20300. DOI : 10.1002/vzj2.20300.
- Moreno, M. T., P. Audesse, M. Giroux, N. Frenette et M. Cescas, 2001. Comparaison entre la détermination de la matière organique par la méthode de Walkley-Black et la méthode de perte au feu, *Agrosol*. 12 (1) : 49-58.
- Pribyl, D.W., 2010. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma*. 156 : 75-83. doi:10.1016/j.geoderma.2010.02.003.
- Salehi, M.H., O.H. Beni, H.B. Harchegani, I.E. Borujeni et H.R. Motaghian. 2011. Refining Soil Organic Matter Determination by Loss-on-Ignition. *Pedosphere*. 21 (4) : 473-482.
- Sleutel, S., S. De Neve , B. Singier et G. Hofman. 2007. Quantification of Organic Carbon in Soils: A Comparison of Methodologies and Assessment of the Carbon Content of Organic Matter, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 38 : 19-20, 2647-2657, DOI: 10.1080/00103620701662877.
- Wang X., J. Wang et J. Zhang. 2012. Comparisons of Three Methods for Organic and Inorganic Carbon in Calcareous Soils of Northwestern China. *PLoS ONE* 7 (8) : e44334. doi:10.1371/journal.pone.0044334.