


*David Dupont, Ph.D.
et Joanie Ouellette, M.A.*

**Vers la valorisation de la séquestration du
carbone dans les sols agricoles au Québec**

(Première partie)

Février 2022



© Institut de recherche en économie contemporaine
ISBN: 978-2-924927-74-8

Dépôt légal – Bibliothèque nationale du Québec, 2022
Dépôt légal – Bibliothèque nationale du Canada, 2022

IRÉC, 10555, Avenue de Bois-de-Boulogne,
CP 2006, Montréal (Québec) H4N 1L4

Faits saillants

- Par les traités internationaux en matière de changements climatiques, le Québec et le Canada sont engagés dans la voie de la carboneutralité de leur économie.
- Afin d'atteindre la carboneutralité de l'économie, il faudra nécessairement ajouter à l'arsenal de mesures de réduction des gaz à effet de serre (GES) des initiatives de séquestration de ces gaz ayant pour effet de diminuer leur proportion dans l'atmosphère.
- Les sols agricoles sont des puits potentiels de carbone. En cela, ils peuvent participer à l'atteinte d'un objectif de carboneutralité de l'économie québécoise.
- Éléments à la base de la vie, l'azote et le carbone se retrouvent dans le sol, notamment comme composantes de la matière organique. Un sol qui s'enrichit de cette matière organique stocke des GES au lieu de libérer ces atomes sous la forme de dioxyde de carbone, de méthane ou de protoxyde d'azote.
- Les pratiques agricoles séquestrant du carbone sont généralement associées à l'amélioration de la santé des sols.
- En dépit des coûts qui peuvent être associés à l'adoption de pratiques agricoles menant à la séquestration des GES par les sols, celle-ci peut aussi se traduire en revenus pour la zone verte, une voie qui est exploré dans ce rapport.
- Le Québec tardant à s'engager véritablement dans la voie de la séquestration des GES, un deuxième rapport à paraître dans la prochaine année présentera des modèles économiques susceptibles de valoriser l'adoption de pratiques agricoles séquestrant les GES au Québec.

Résumé

La capacité qu'ont les sols agricoles à stocker du carbone retient de plus en plus l'attention en tant que moyen pour atteindre l'objectif d'une économie carboneutre. La présente note de recherche est le premier d'une série de deux textes sur cette avenue qui a quitté le cercle restreint de la recherche universitaire pour être désormais promue par différentes organisations de portées nationales et internationales. Les bénéfices que revêt la séquestration des GES par les terres arables ne se mesurent pas seulement à son effet sur le climat : une terre riche en carbone et en azote, des éléments à la base de la vie, est un indicateur de la santé d'un sol.

Cette première note de recherche vise à brosser un portrait général de la question de la séquestration des GES par les sols agricoles. Si, ailleurs dans le monde, des fermes engrangent déjà des revenus grâce au carbone stocké dans les parcelles en culture, le Québec tarde à emprunter cette voie. La vue d'ensemble présentée dans la présente note cherchera aussi à offrir un premier aperçu des montants en jeu à l'échelle du Québec s'il empruntait cette voie. Pour qu'elle soit praticable et viable au Québec, la séquestration du carbone par les sols devrait être conçue pour s'harmoniser avec un contexte agricole où prédomine le modèle du propriétaire exploitant. Ce sera l'objet de la deuxième note de recherche que de présenter les modèles économiques permettant à la scène agricole québécois de tirer profit d'une nouvelle source de revenus potentiels.

Table des matières

FAITS SAILLANTS	IV
RESUME	VI
TABLE DES MATIERES	VII
LISTE DES TABLEAUX, FIGURES ET CARTES	VIII
LISTE DES ABREVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES	X
INTRODUCTION	11
LES SOLS AGRICOLES : DES PUIITS DE CARBONE	11
QU'EST-CE QUE LA BIOSEQUESTRATION DES GES PAR LES SOLS AGRICOLES	13
LE CO ₂ ET LE METHANE DANS LE CYCLE DU CARBONE	14
LE PROTOXYDE D'AZOTE DANS LES SOLS : LES ENGRAIS AZOTES	17
STOCKAGE DES GES PAR LES SOLS – SURVOL DES PRATIQUES RECONNUES	20
CALCULER LE POTENTIEL DE SEQUESTRATION DES GES PAR LES SOLS DU QUEBEC	25
CONCLUSION	31
BIBLIOGRAPHIE	33

Liste des tableaux, figures et cartes

Tableaux

Tableau 1 : Stocks de carbone par mode d'occupation du sol pour l'horizon 0-30 cm de profondeur	20
Tableau 2 : Évolution annuelle de la quantité (en kg par hectare) de matière organique dans les sols agricoles au Québec et dans les prairies canadiennes (Manitoba, Saskatchewan et Alberta), 2011	24
Tableau 3 : Potentiel de stockage de carbone dans les sols suivant l'adoption de certaines pratiques agricoles et les coûts qui y sont associés, en France en 2019 (\$ constants canadiens de 2021)*	26
Tableau 4 : Carbone stocké par les sols agricoles de certaines régions québécoises suivant l'adoption de certaines pratiques* à un prix de 66,50\$ (en dollars constants de 2021)** la tonne de CO2 équivalent.....	27
Tableau 5 : Valeur des crédits compensateurs et stockage de GES des sols agricoles du Québec selon un scénario de 0,12 tonne de CO2 séquestré par hectare à un prix de 80\$ la t de CO2 eq, par région, Québec	29

Figures

Figure 1 : Gaz à effet de serre générés en agriculture, en proportion (%) selon le type de gaz (CO2, CH4 et N2O) et en équivalent en CO2, au Québec, en 2018	14
Figure 2 : Estimation de la répartition des stocks de carbone dans différents milieux.....	15
Figure 3 : Distribution des âges du carbone (en %) dans le sol en fonction de la profondeur	17
Figure 4 : Schéma du cycle du carbone et de l'azote et leur interaction avec l'écosystème des sols agricoles.....	19
Figure 5 : Matière (organique et minérale) contenue dans un sol en proportion (en masse)	22
Figure 6 : Schéma du calcul de CO2 stocké suivant un changement de pratique agricole	25

Carte

Carte 1 : Émissions nettes de GES (en kilogramme équivalent CO2 par hectare)	24
--	----

Liste des abréviations, des sigles et des acronymes

APEC	Accord commercial Asie-Pacifique
EFESE	Évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques
GES	Gaz à effet de serre
Gt	Giga (milliard) de tonnes
ha	Hectare
INRA	Institut national de recherche agronomique
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IREC	Institut de recherche en économie contemporaine
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques
MAPAQ	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
MO	Matière organique
SARE	<i>Sustainable Agriculture Research and Education</i>
t	Tonne

Introduction

En prévision de la 26^e « Conférence des parties » qui s'est tenue à Glasgow en novembre 2021, l'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) publiait à l'intention des décideurs un document synthèse¹ faisant un survol des connaissances en matière de réchauffement climatique. On leur rappelait que les activités humaines avaient *vraisemblablement* (*likely*, selon la terminologie du rapport) causé jusqu'ici un réchauffement planétaire de l'ordre 1,07° C par rapport à la température qui prévalait avant l'industrialisation. Qui plus est, on soulignait que les GES² qui ont été émis dans l'atmosphère jusqu'à maintenant par l'humanité allaient vraisemblablement contribuer à une augmentation supplémentaire de 0,5° C, et ce, même si les émissions de gaz à effets de serre causées par l'activité humaine devaient cesser dès à présent. Tous les scénarios modélisés dans le rapport envisageaient que les températures globales à la surface de la planète allaient devenir, d'ici 2040, en moyenne de 1,5° C supérieures à celles de la période pré-industrielle. Rappelons que c'est ce seuil de 1,5° C que l'Accord de Paris avait fixé comme référence en dessous de laquelle l'élévation des températures moyennes devait se situer afin d'éviter, selon les modélisations, les effets les plus délétères qu'un dérèglement du climat pourrait avoir sur la biosphère.

La tâche s'avère colossale, et ce, d'autant plus que l'article 4 de l'Accord de Paris prévoit que les pays signataires s'engagent, dans les plus brefs délais, sur la voie de la carboneutralité³. Or, en dépit d'efforts tous azimuts de diminution des émissions anthropiques de GES, ces dernières ne se réduiront pas à zéro. Si tant est que les activités humaines continuent d'émettre des GES, pour atteindre la carboneutralité, il faudra donc que par cette même activité humaine des quantités équivalentes aux GES émis soient retirées de l'atmosphère⁴, pour être séquestrées. Le compte à rebours sur cet enjeu a été lancé et le Québec (et le Canada) par ses engagements internationaux est appelé à participer à l'effort.

Les sols agricoles : des puits de carbone

Plusieurs stratégies de séquestration des GES peuvent être envisagées. Si certaines font appel à des outils technologiques inédits, voire à de la géoingénierie (dont les conséquences sur la régulation des écosystèmes peuvent être difficiles à évaluer), la nature s'avère une alliée des plus efficace dans la mitigation des changements climatiques. À cet égard, le potentiel des forêts comme puits de carbone est bien connu⁵. Une autre avenue, moins connue par ailleurs, est celle

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2021), *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis – Summary for Policymakers, Working Group I*; Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Suisse, 40 pages.

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf

² Ces principaux GES sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), de protoxyde d'azote (N₂O).

³ Le terme « carboneutralité » sera ici employé de manière non discriminante à l'égard des différents types de GES. Il inclut tous les GES, dont les trois principaux ci-haut mentionnés.

⁴ Gaz dont le cycle et l'intensité de l'effet varient de l'un à l'autre.

⁵ Le Québec se dote d'ailleurs en ce moment même d'un protocole visant à monétiser des pratiques stimulant la captation du carbone sur des superficies boisées ou reboisées. Voir le document : MELCC, (2021), *Projet de règlement de crédits compensatoires relatif à des projets de boisement et reboisement sur des terres du domaine privé*, MELCC, Québec, 24 pages. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/carbone/credits-compensatoires/quebec-protocole-foret.pdf>

qui mise sur la capacité des sols agricoles à servir de vecteurs de séquestration des GES. Depuis le lancement de *l'Initiative 4 pour 1000 (Les sols pour la sécurité alimentaire et le climat)* à Paris en 2015 à l'occasion de la COP 21⁶ cette approche a quitté les cercles plus restreints de la recherche et gagne, de proche en proche, en intérêt auprès d'un public qui s'élargit⁷. À travers le monde, des initiatives ont cours afin de stimuler l'adoption de pratiques agricoles susceptibles de retirer les GES de l'atmosphère pour les enfouir dans le sol. Même la classe politique s'y met. Un rapport du sénat canadien concluait en 2020 que « Des consultations menées auprès de spécialistes du milieu universitaire et de chefs de file de l'industrie nous ont permis de recueillir des preuves irréfutables à l'appui de la thèse selon laquelle l'agriculture peut jouer un rôle significatif dans la lutte contre les changements climatiques en réduisant les émissions nettes de GES. »⁸ La séquestration du carbone par les sols agricoles est ainsi un enjeu qui est appelé à gagner en importance dans les prochaines années, à mesure que les obligations que le Québec et le Canada sont appelés à respecter en matière de lutte aux changements climatiques exigeront un effort de plus en plus soutenu et que les revenus que les agriculteurs pourront retirer de ces efforts grimperont⁹. L'Institut de recherche en économie contemporaine (IREC) compte ainsi publier deux notes dans les prochains mois afin 1) de jeter un éclairage sur cette question (l'objet du présent rapport) ; mais aussi 2) de nourrir une réflexion sur les modèles de financement de l'introduction de pratiques agricoles propices à la bioséquestration (ce sur quoi portera le rapport ultérieur).

*

* *

⁶ En adoptant la formule "4 pour 1000", l'Initiative réfère à l'idée qu'en augmentant la teneur en carbone des sols de l'ordre de 0,4% annuellement, l'agriculture pourrait s'avérer un vecteur de lutte aux changements climatiques.

⁷ À titre d'exemple, un projet de loi C-290 fut déposé en première lecture en avril 2021, lequel prévoyait une obligation, pour le gouvernement canadien, de : « recueillir des données, de façon continue, sur la santé des sols, notamment en ce qui a trait à la teneur » https://parl.ca/Content/Bills/432/Private/C-290/C-290_1/C-290_1.PDF. Voir aussi le document présenté par le bureau du sénateur canadien Colin Deacon, publié en septembre 2020 et intitulé *Carbon sequestration in agriculture*, lequel intime le gouvernement à explorer plus à fond l'avenue de la séquestration des GES par les sols agricoles afin que le Canada atteigne ses objectifs de réduction d'émission de ces gaz. Torrealba, Gabrielle et David Dlab, (2020), *Carbon sequestration in agriculture*, Sénat canadien, bureau du sénateur Colin Deacon, Ottawa, 15 pages. https://colindeacon.ca/media/48389/20201211_enfr_carbonsequestrationfile.pdf.

⁸ Torrealba, Gabrielle et David Dlab, (2020), *Carbon sequestration in agriculture...*

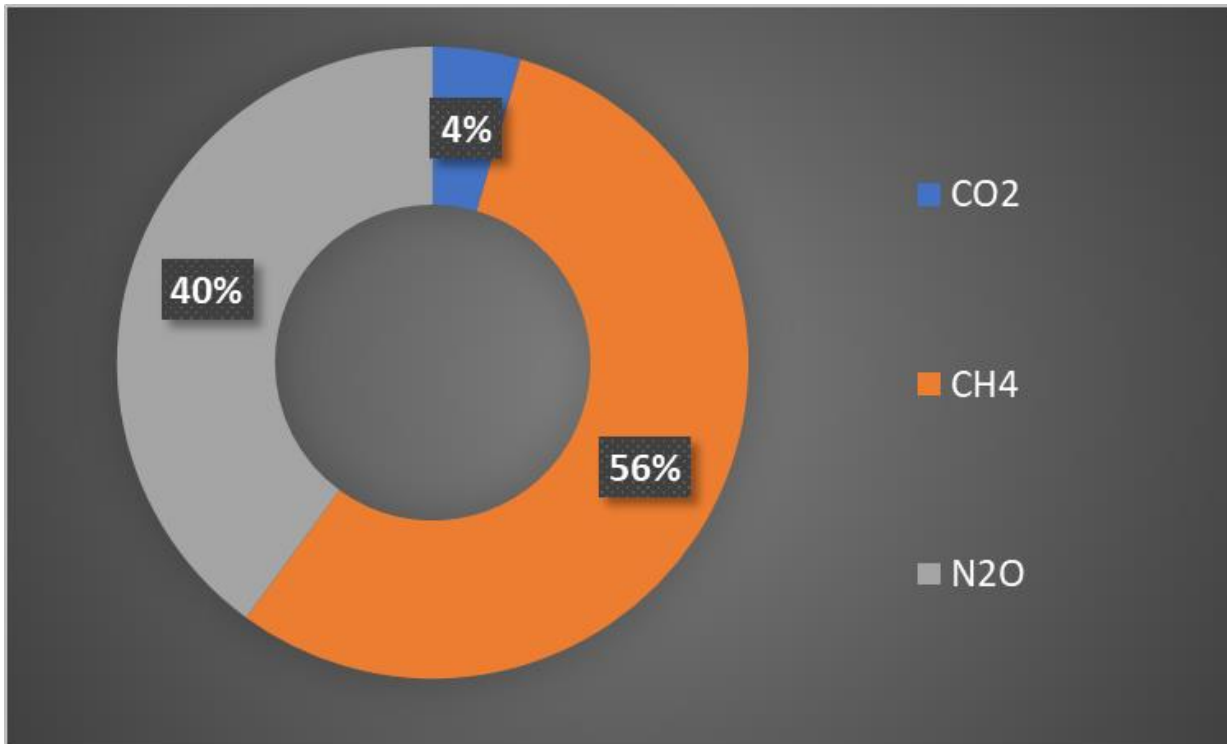
⁹ À cet égard, le plan de lutte aux changements climatiques du Canada présenté dans le document *Un environnement sain dans une économie saine* a fixé à 170\$ le prix d'une tonne en équivalent CO₂ en 2030. Tandis qu'une tonne équivalent CO₂ (eq CO₂) s'échangeait à la bourse de la Western Climate Initiative au prix de 17\$ US en octobre 2021, le coût d'une même tonne était fixé à 137 \$ US en Suède, 101 \$ US en Suisse et au Lichtenstein, pour nommer ici des exemples où les coûts reliés à la génération de eq CO₂ est davantage prohibitif et où, par voie de conséquence, l'achat de crédit carbone apparaît plus profitable. Source <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/>.

Qu'est-ce que la bioséquestration des GES par les sols agricoles

La bioséquestration des GES par les sols agricoles réfère au phénomène par lequel des éléments des gaz qui contribuent à l'effet de serre sont retirés de l'atmosphère pour être emmagasinés dans le sol. Les terres sur lesquelles se pratique l'agriculture deviennent alors des réservoirs au sein desquels des composantes de ces gaz peuvent être « séquestrées » au lieu d'être libérées dans l'atmosphère. On attribue à trois principaux gaz l'effet de serre de l'atmosphère : le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote (N_2O). La capacité du CH_4 et du N_2O à absorber le rayonnement infrarouge et à influencer sur l'effet de serre est largement supérieure à celle du CO_2 . Comme la longueur des cycles d'absorption et de libération de ces gaz diffère, il importe de rapporter sur une échelle de temps commune l'effet de ces gaz sur le climat. Cette période est communément fixée à 100 ans. Calculé sur cette base, l'effet de réchauffement du CH_4 multiplie par un facteur 28 celui du CO_2 tandis que le N_2O est 298 fois plus efficace à absorber le rayonnement infrarouge que ne l'est le dioxyde de carbone. Ces trois gaz sont libérés à différents degrés par les sols agricoles. Pour mesurer leur effet sur le climat, chaque quantité x d'un de ces gaz se calcule en se rapportant au CO_2 . Ainsi, 1 tonne de CO_2 est égale à 0,036 tonne de CH_4 et à 0,0034 tonne de N_2O . Dans la suite du texte, une tonne (t) de GES est exprimée par rapport au CO_2 , c'est-à-dire, en équivalent en CO_2 (CO_2 eq).

Ainsi, même si l'attention est souvent portée vers le CO_2 dans la lutte aux changements climatiques, en agriculture, l'émission d'autres gaz est à prendre en considération. Cette réalité est à prendre d'autant plus au sérieux au Québec où le CO_2 n'est responsable que de 4,5 % des GES pour ce secteur. Le N_2O et, surtout, le CH_4 sont les gaz qui participent le plus à l'effet de serre en représentant respectivement 39,9% et 55,5% des émissions en agriculture, comme l'illustre le graphique suivant.

Figure 1 : Gaz à effet de serre générés en agriculture, en proportion (% tiré de la valeur en CO₂eq) selon le type de gaz (CO₂, CH₄ et N₂O), au Québec, en 2018



Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC). (2021), *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2019 et leur évolution depuis 1990*, Québec.

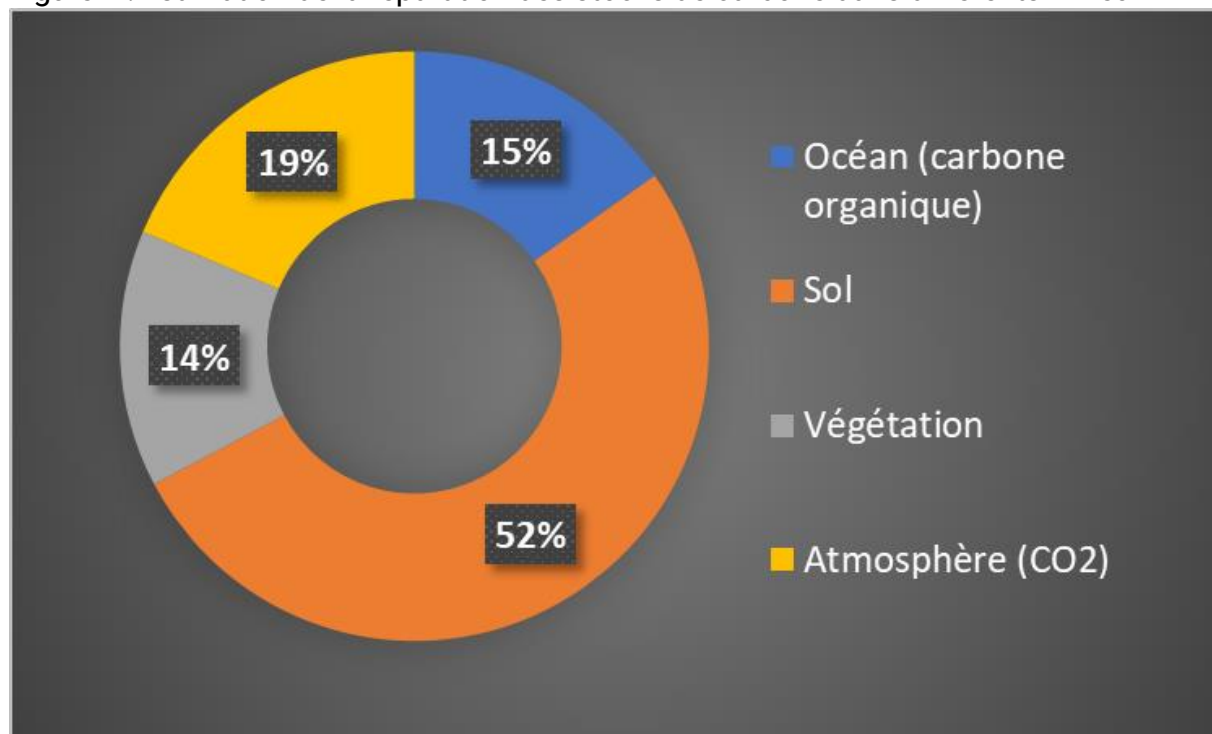
Le CO₂ et le méthane dans le cycle du carbone

Le carbone (C), qui participe à l'effet de serre lorsque combiné, notamment, à l'oxygène ou à l'hydrogène pour former du CO₂ ou du CH₄¹⁰, est une composante primordiale de la matière organique (MO) et est ainsi l'un des éléments constitutifs de la vie sur notre planète. Le carbone est partie intégrante du cycle au sein duquel il transite par l'atmosphère, la biomasse, les sols, les océans et les couches terrestres profondes. En fait, seule une fraction du carbone se retrouve dans l'atmosphère (notamment comme CO₂ ou CH₄), par comparaison aux énormes quantités de cet élément que l'on retrouve dans les autres réservoirs (océanique ou terrestre). Malgré tout, comme les rapports du GIEC visent à le montrer, les variations des gaz contenant du carbone dans l'atmosphère ont une incidence sur l'effet de serre et sur la régulation du système climatique¹¹.

¹⁰ D'autres GES sont issus de la combinaison d'un atome de carbone à au moins un autre atome. Les hydrofluorocarbures (HFC) et les perfluorocarbures (PFC) en contiennent aussi. Si le potentiel de réchauffement de certains des gaz de ces deux catégories sont des milliers de fois plus importants que le CO₂, ils ne comptent que 0,7 et 3,1% des émissions de GES du Québec.

¹¹ Voir aussi là-dessus : Lal, Rattan. (2018). « Climate Change and the Global Soil Carbon Stock », dans *Soil and Climate*, Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, p. 420.

Figure 2 : Estimation de la répartition des stocks de carbone dans différents milieux¹²



Source : Global Carbon Project. (2018). *Supplemental data of Global Carbon Budget 2018* (Version 1.0) [Data set]. Global Carbon Project. <https://doi.org/10.18160/gcp-2018>.

Les sols de la planète constituent des puits considérables de carbone : des estimations évaluent que la quantité de carbone dans les sols (2400 Gt de C) serait trois fois celle contenue dans l'atmosphère (860 Gt de C).¹³ Plus encore, et afin de bien prendre la mesure du rôle des sols dans le cycle de carbone, notons, en reprenant l'observation d'un rapport de l'Institut national de recherche agronomique (INRA), que : « [d]un point de vue quantitatif, les sols émettent à l'échelle globale 10 fois plus de CO₂ provenant de la respiration autotrophe (racines) et hétérotrophe (microorganismes et faune) que les activités humaines¹⁴. ».

Par la photosynthèse, les plantes transforment en matière organique le carbone du CO₂ de l'atmosphère. Par différents processus, notamment suivant la décomposition de la matière végétale (mais pas uniquement¹⁵), les composés organiques qui contiennent au moins un élément de carbone sont ainsi rendus disponibles aux autres organismes vivants. En enrichissant la

¹² Ces stocks de carbone ne comprennent pas l'ensemble du carbone que contient notre planète. À titre d'exemple, le graphique ci-haut ne comprend pas les 38 000 milliards de tonnes de carbone inerte dans les océans..

¹³ Voir aussi Évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques (EFESE). (2019). *La séquestration du carbone par les écosystèmes en France*, Rapport d'évaluation, Ministère de la transition écologique et solidaire, p. 5.

¹⁴ Pellerin, Sylvain, et al, (2019), *Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût - rapport technique*, Étude réalisée pour l'ADEME et le Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, INRA (France), p. 18

¹⁵ Certains organismes vivants, dont les endophytes (les microorganismes composant le microbiote des plantes), tirent profit de la matière organique créée par la photosynthèse. Les champignons qui évoluent dans une relation symbiotique avec les plantes intègrent le carbone des plantes en offrant en retour des nutriments composés de phosphore et d'azote. Voir là-dessus : Tom J. Thirkell, Daria Pastok, Katie J. Field « Carbon for nutrient exchange between arbuscular mycorrhizal fungi and wheat varies according to cultivar and changes in atmospheric carbon dioxide concentration » dans *Global Change Biology*, 2020, no. 26, pp. 1725–1738 et Camille S. Delavaux, Lauren M. Smith-Ramesh, Sara E. Kuebbing, « Beyond nutrients: a meta-analysis of the diverse effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plants and soils », dans *Ecology*, 2017, vol 98, no.8, pp. 2111-2119.

communauté du vivant (des bactéries aux organismes plus complexes : champignons, nématodes, insectes, racines et radicelles, pour ne nommer que les principaux) que contient le sol, une partie du carbone y est emmagasiné. Le carbone est aussi stocké dans les biomasses stabilisées à différents degrés dans le sol. Un cycle continu fait en sorte qu'une autre partie du carbone est libérée à nouveau dans l'atmosphère¹⁶. Par convention, on estime que la teneur en matière organique du sol (MOS) équivaut à 1,724 fois sa quantité de carbone, celle-ci étant une composante de celle-là. Enfin, comme à la masse atomique du carbone (12,01) il faut ajouter celle de l'oxygène (16,00), une tonne de carbone enfoui dans le sol est égale 3,67 t de CO₂.

Le méthane joue aussi un rôle important dans le cycle du carbone et dans l'effet de serre. En agriculture, au Québec, ce gaz est surtout émis lors de la fermentation entérique des ruminants (soit les deux tiers des émissions de CH₄). En situation d'anaérobiose (en absence d'oxygène), des microorganismes combinent le carbone à l'hydrogène pour former du méthane ; le rumen des cheptels est un environnement propice à la production de ce gaz. Un sol compact et mal aéré, où les situations d'anaérobiose foisonnent, crée aussi les conditions propices à la génération de méthane. En contrepartie, et pour citer l'ouvrage d'Alain Olivier publié récemment chez Écosociété : « lorsque le sol est bien structuré, poreux et aéré, [...] ce sont des microorganismes d'aérobies qui sont favorisés. »¹⁷ (p. 157). Si du CO₂ y est tout de même généré, ce type de sol oxygéné est moins susceptible d'émettre un gaz 28 fois plus puissant que le CO₂ en matière d'effet de serre. Par ailleurs, même si la libération de CO₂ est inévitable, une quantité supérieure de carbone est généralement absorbée par le sol en situation d'aérobiose qu'en anaérobiose¹⁸.

Le temps de résidence du carbone dans le sol est un autre élément à prendre en considération. Une certaine part de l'accroissement de la quantité de carbone dans le sol peut se réaliser dans une couche superficielle du sol où le taux de retour du carbone à l'atmosphère est plus important (et plus rapide); le carbone s'y retrouvant est plus facilement « perdu » après une seule saison. Lorsqu'enfoui dans des strates plus profondes du sol, le carbone est davantage stabilisé¹⁹. La figure suivante, tirée d'un rapport de l'INRA, présente le temps de résidence moyen du carbone à certaines profondeurs. À 5 cm, 50% du carbone présent y séjourne pour une période de 10 ans. À 30 cm, la même proportion de carbone y réside pour plus de 100 ans, et ainsi de suite. De manière générale, comme l'observe d'ailleurs des chercheurs de l'INRA : « La grande majorité du carbone (83%) est faite de carbone à durée de vie longue. L'âge moyen du carbone est de 42 ans²⁰. »

¹⁶ Olivier, Alain, (2021), *La révolution agroécologique. Nourrir tous les humains sans détruire la planète*, Montréal, Écosociété, p. 82.

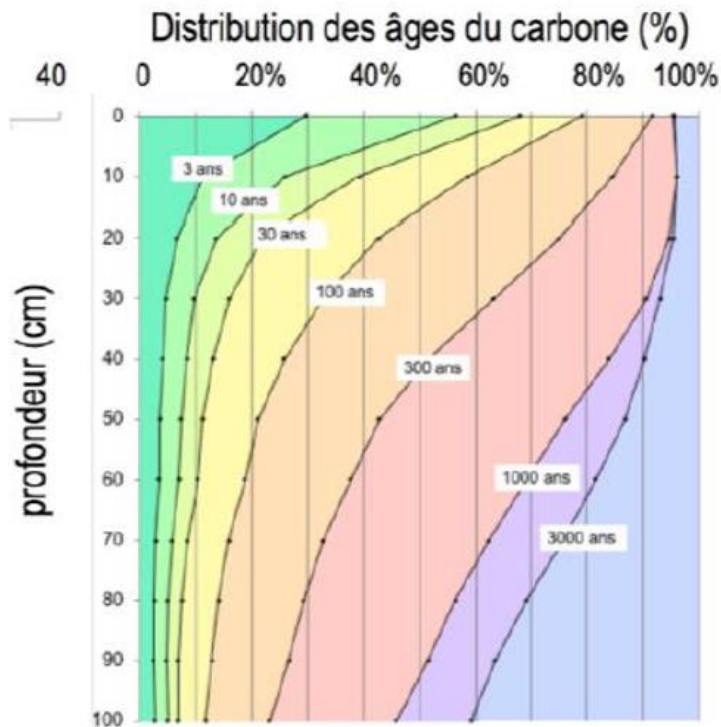
¹⁷ Olivier, Alain, (2021), *La révolution agroécologique...*, p. 157.

¹⁸ Olivier, Alain, (2021), *La révolution agroécologique...*, p. 82.

¹⁹ La durée pendant laquelle le carbone demeure dans les sols varie en fonction de sa nature (organique ou minérale) et, lorsqu'il fait partie de la matière organique, en fonction de son intégration aux différents systèmes du sol et des conditions pédoclimatiques locales (température, humidité, aération, etc.). Le carbone contenu dans le sol peut faire l'objet d'un cycle court de quelques mois tout au plus dans le cas du carbone dit labile (ou actif) à plusieurs milliers d'années lorsqu'il est stabilisé (voire devenue inerte, soit non biologiquement actif). S'il n'y a toujours pas de consensus sur la durée pour laquelle le carbone doit être emmagasiné dans le sol afin d'avoir un effet réel et durable sur le système climatique, emmagasiner le carbone dans le sol sur une plus longue période aura évidemment un impact plus grand sur le climat que s'il est libéré après une année, voire une saison agricole.

²⁰ Pellerin, Sylvain, et al, (2019), *Stocker du carbone dans les sols français...*, p. 22.

Figure 3 : Distribution des âges du carbone (en %) dans le sol en fonction de la profondeur



Source : Pellerin, Sylvain, et al, (2019), *Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût - rapport technique*, Étude réalisée pour l'ADEME et le Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, INRA (France), 114 p.

Le protoxyde d'azote dans les sols : les engrais azotés

GES près de 300 fois plus puissant que le CO_2 , le protoxyde d'azote (N_2O) est un autre gaz généré par les pratiques agricoles. L'azote (N), à l'instar du carbone, est un élément primordial à la vie en ce sens qu'il intervient dans la formation des acides aminés, les constituants des protéines. Des atomes d'azote sont aussi présents dans les molécules de chlorophylle qui participent à la photosynthèse et offrent aux feuilles leur couleur verte. Présent sous forme gazeuse dans l'atmosphère essentiellement sous la forme de diazote (N_2), l'azote peut aussi être libéré par les sols dans certaines conditions en se liant avec de l'oxygène pour former du protoxyde d'azote (N_2O). L'épandage d'engrais chimique (azoté) sur un sol peu oxygéné est une condition favorable à la production de ce gaz par des microorganismes.

L'effet du N_2O sur le climat est bien connu : il préoccupe les chercheurs et est inclus dans les principales modélisations climatiques. La revue *Science* publiait d'ailleurs en 2009 un article sur l'enjeu. Intitulé *Nitrous Oxide: No Laughing Matter*, l'auteur soulignait : « concerns about human-induced effects on Earth's climate have concentrated on carbon dioxide (CO_2) and methane (CH_4) emissions from fossil fuels and other sources. However, future changes in climate and in the distribution of stratospheric ozone depend on the emissions and changing atmospheric concentration of N_2O ... nitrous oxide deserves much more attention and consideration for policy

action to control future human-related emissions. »²¹ Qui plus est, la teneur en carbone dans les sols et la qualité de matière organique (MO) qui s’y retrouve ont aussi un impact sur la capacité des terres arables à maintenir l’azote sous terre et dans une forme qui n’est pas celle du protoxyde d’azote. Quelques études ont montré que des efforts pour accroître le carbone dans les sols ont été complètement contrebalancés par la libération de N₂O²². Même la reforestation de sols agricoles peut, dans certaines conditions, générer davantage de GES (lorsque rapporté à leur équivalent en CO₂) une fois le protoxyde d’azote pris en considération²³. Éliminer à la source les conditions dans lesquelles le N₂O est généré apparaît comme une manière efficace de diminuer la production de GES par les sols, une avenue néanmoins possible même en séquestrant le carbone²⁴.

Le schéma suivant offre une représentation visuelle et récapitulative des cycles du carbone et de l’azote et de leur interaction avec les plantes, le sol et l’atmosphère.

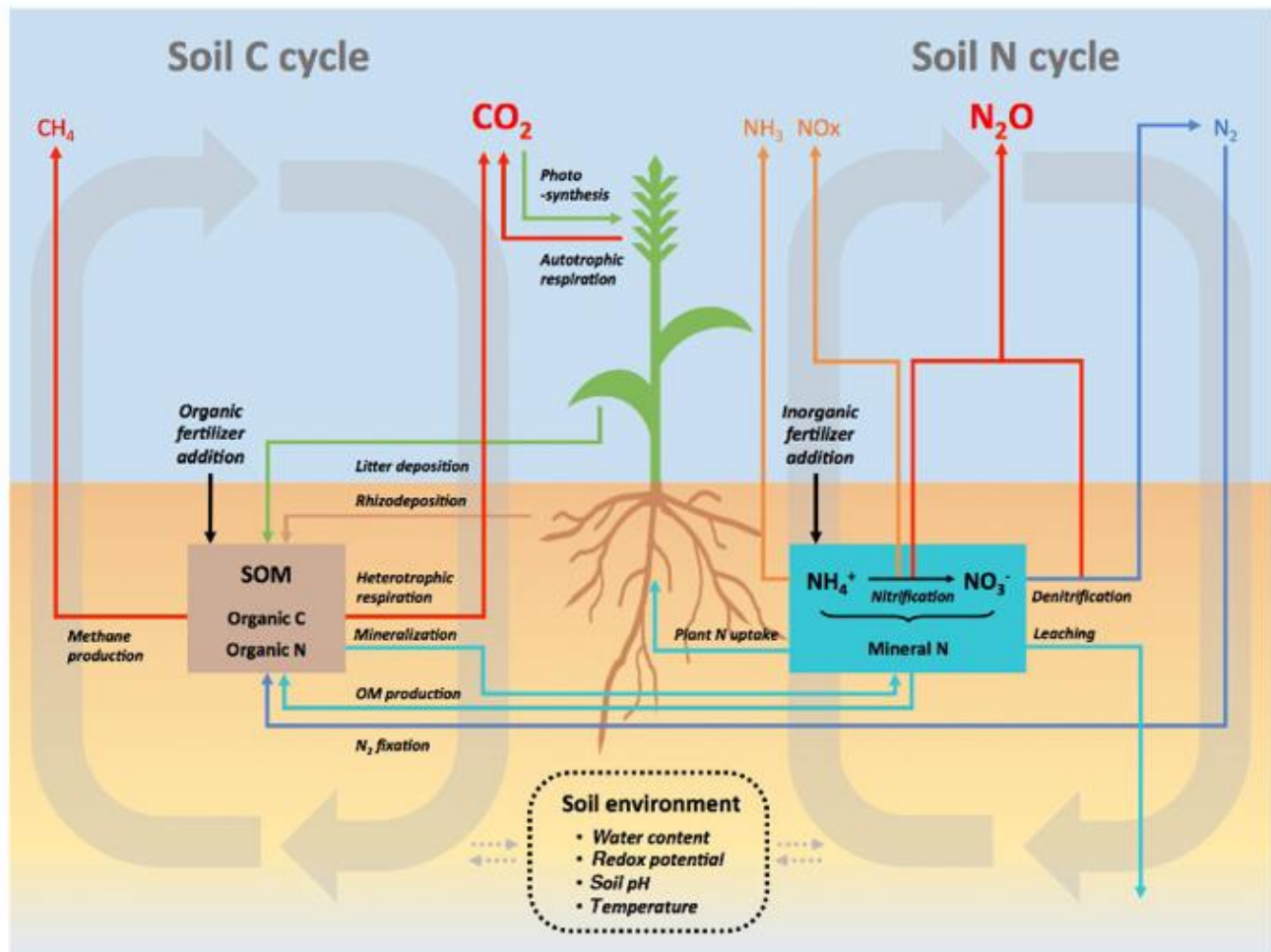
²¹ Wuebbles, Donald J. (2009). « Atmosphere. Nitrous oxide: no laughing matter », dans *Science*, vol. 326, no 5949, p. 56.

²² Gu, Jiangxin et al. (2017). « Trade-off between soil organic carbon sequestration and nitrous oxide emissions from winter wheat-summer maize rotations: Implications of a 25-year fertilization experiment in Northwestern China », dans *Science of The Total Environment*, Vol. 595, no. 1 oct. 2017, pp. 371-379; voir aussi : Guenet, Bertrand et al., (2021), Can N₂O emissions offset the benefits from soil organic carbon storage?, dans *Global Change Biology*, vol. 27, pp. 237–256.

²³ Kou-Giesbrecht, Sian et al. (2021), « N supply mediates the radiative balance of N₂O emissions and CO₂ sequestration driven by N-fixing vs. non-fixing trees », dans *Ecology. Ecological Society of America*, vol. 102, no. 8, pp. 1-8.

²⁴ Soussana, Jean-François (2012), « Biogéochimie et écologie des sols », dans *La chimie et la nature* (Dinh-Audouin, M.T., dirs), p. 76.

Figure 4 : Schéma du cycle du carbone et de l'azote et leur interaction avec l'écosystème des sols agricoles



Stockage des GES par les sols – survol des pratiques reconnues

Les sols ayant la capacité de stocker les éléments constitutifs des GES, les agriculteurs sont susceptibles de devenir des alliés dans le respect des engagements du Québec et du Canada à l'égard de la carboneutralité de leur économie. Cette possible contribution des fermes à l'effort collectif de réduction du bilan carbone des activités humaines, le spécialiste de l'agroécologie, Alain Olivier, la met d'ailleurs en valeur dans son dernier ouvrage :

En matière d'atténuation des changements climatiques, l'une des contributions les plus significatives que peut apporter le secteur agroalimentaire et, en particulier, la production agricole, réside dans la capacité des sols et des plantes à séquestrer du carbone, c'est-à-dire à le retirer de l'atmosphère pour l'intégrer de façon plus ou moins stable à leur structure.²⁵

La capacité des sols à capter les GES dans l'atmosphère est variable et dépend de différents facteurs. Les conditions pédoclimatiques, notamment le type de sol, jouent un rôle déterminant dans le processus d'absorption et de rétention du carbone dans les sols²⁶. Le potentiel de séquestration ne s'y réduit pas. Des variations en matière de stockage sont aussi observées selon le mode d'affectation du sol. Généralement, un sol affecté au fourrage, et surtout les prairies permanentes, se traduit par des stocks supérieurs de carbone. Une prairie s'avère à ce point « stockante » en matière de carbone qu'on y retrouve non seulement une quantité supérieure de carbone à l'hectare que dans les sols sous grandes cultures, mais aussi dans les sols des forêts. C'est du moins là les résultats des sondages effectués sur différentes superficies et rapportés dans une vaste étude de l'INRA (données présentées dans le tableau ci-bas).

Tableau 1 : Stocks de carbone (en tonne de carbone par hectare) par mode d'occupation du sol pour l'horizon 0-30 cm de profondeur

Stock de C organique (tC/ha)	min	moyenne	médiane	max	écart type
Sous forêts	6,87	81,0	73,4	230	35,4
Sous prairie permanente	18,1	84,6	78,3	309	35,0
Sous grandes cultures	9,92	51,6	47,9	137	16,2

Source : Pellerin, Sylvain, et al, (2019), *Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût - rapport technique*, Étude réalisée pour l'ADEME et le Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, INRA (France), 114 p.

En plus du type de sol et le mode d'occupation de celui-ci, les amendements ou pratiques agricoles qui y sont adoptés font varier la quantité de carbone stockée par les sols. Ces pratiques agricoles affectent le rôle des sols dans le cycle du carbone et dans la génération des GES et, en cela, ils

²⁵ Olivier, Alain, (2021), *La révolution agroécologique...*, p. 155.

²⁶ Voir là-dessus : Streubel, J.D., H.P. Collins, M. Garcia-Perez, J. Tarara, D. Granatstein, and C.E. Kruger. (2011). « Influence of Contrasting Biochar Types on Five Soils at Increasing Rates of Application », dans *Soil Science Society of America Journal*, vol 75 no. 4, pp. 1402-1413; et : Yorgey, G.G., S.A. Hall, K.M. Hills, C.E. Kruger, and C.O. Stöckle, (2019) « Carbon Sequestration Potential in Cropland Soils in the Pacific Northwest: Knowledge and Gaps » Washington State University, Pullman, WA. <http://s3-us-west-2.amazonaws.com/wp2.cahnrs.wsu.edu/wp-content/uploads/sites/32/2019/11/C-sequestration-in-iPNW-croplands.pdf>

participent à mitiger les changements climatiques^{27 28}. Pour accentuer le processus de séquestration des GES sous terre ou, corollairement, pour diminuer les émanations de ces gaz par les sols, des changements de pratiques doivent souvent s'opérer. Dans l'un de ses rapports qu'elle qualifie de « consensuels », la National Academy of Science, Engineering and Medicine identifiait en 2019 plusieurs formes de régies agricoles – des sols, mais aussi des troupeaux et des excédents (résidus) – qui avaient pour conséquence d'augmenter la teneur en carbone dans les sols. Ces pratiques sont les suivantes :

- Accroître la quantité de résidus végétaux restitués au sol après la récolte ;
- Utiliser de plantes de couverture (plutôt que de laisser le sol à nu) ;
- Réduire, voire élimination des labours ;
- Ajouter du fumier et du compost ;
- Cultiver de plantes pérennes et de légumineuses ;
- Favoriser les pratique d'agroforesterie ;
- Éviter l'évapotranspiration du sol ;
- Favoriser le pâturage des animaux d'élevage^{29 30}.

Pour ce qui concerne le protoxyde d'azote, pour ne nommer ici que quelques pratiques susceptibles d'en diminuer les émissions, notons :

- Diminuer et remplacer de certains types d'engrais azoté ;
- Cultiver des légumineuses ;
- Moduler la gestion du fumier et réduire l'apport en azote dans l'alimentation des ruminants^{31 32}.

Le sol étant un écosystème complexe, l'adoption de ces pratiques ne peuvent évidemment s'effectuer sans analyse contextuelle préalable prenant en compte les caractéristiques

²⁷ Si le sol peut capter les GES, inversement, certaines pratiques relatives à la régie des sols peuvent aussi mener à une libération du carbone vers l'atmosphère. Dans un registre similaire, les changements climatiques pourraient diminuer la quantité de carbone absorbée par les sols, principalement en raison de la diminution et de l'appauvrissement de la matière organique (« net primary production ») et de l'évapotranspiration.

²⁸ Lal, Rattan. (2018). « Climate Change and the Global Soil Carbon Stock », dans *Soil and Climate*, Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, p. 421.

²⁹ National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine; Committee on Developing a Research Agenda for Carbon Dioxide Removal and Reliable Sequestration. *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda*, Washington (DC), National Academies Press (US); 2018.

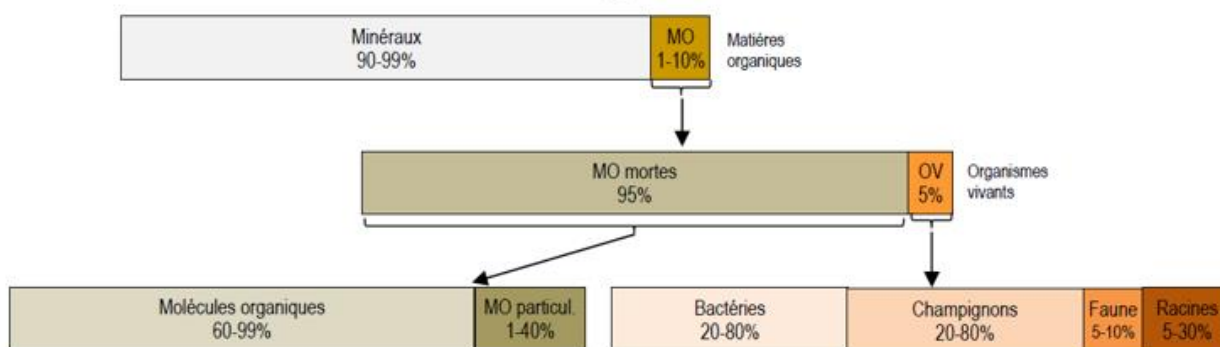
³⁰ Voir aussi : Chenu, C. et al., (2014). « Stocker du carbone dans les sols agricoles: évaluation de leviers d'action pour la France », dans *Innovations agronomique*, 37 p. et Pellerin et al., (2019) *Stocker du carbone dans les sols français...*, p. 39-40.

³¹ Li D, Watson CJ, Yan MJ, Lalor S, Rafique R, Hyde B, Lanigan G, Richards KG, Holden NM, Humphreys J, (2013), « A review of nitrous oxide mitigation by farm nitrogen management in temperate grassland-based agriculture », dans *Journal of Environmental Management*, vol 15, Oct 15; pp. 893-903.

³² Blesh J., (2019) « Feedbacks between nitrogen fixation and soil organic matter increase ecosystem functions in diversified agroecosystems », dans *Ecological Application*, vol. 29, no. 8 Dec;29(8):e01986. doi: 10.1002/eap.1986. Epub 2019 Aug 30. PMID: 31359515.

pédoclimatiques particulières du milieu et l'affectation principale du sol. Un élément important à soulever : la conversion des sols agricoles en mécanisme de lutte aux changements climatiques n'a pas à se réaliser au détriment des autres bienfaits que l'agriculture procure aux communautés (alimentation humaine, occupation du territoire, impact économique, services environnementaux), bien au contraire. Sur le plan environnemental, il est connu que plusieurs des pratiques agricoles ci-haut mentionnées améliorent aussi la santé des sols. La représentation du sol comme une chose inerte, un simple substrat minéral à la croissance des plantes, est loin de correspondre à la réalité. Les sols sont des écosystèmes complexes, composés certes des matières minérales, mais qui comprennent aussi de la matière organique, pour la plupart morte, mais aussi des organismes vivants (des bactéries aux petits animaux). Cette matière organique est essentielle à la vie des plantes cultivées. La figure suivante présente les proportions des matières que composent un sol.

Figure 5 : Matière (organique et minérale) contenue dans un sol en proportion (en masse)



Source : Pellerin, Sylvain, et al, (2019), *Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût - rapport technique*, Étude réalisée pour l'ADEME et le Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, INRA (France), 114 p.

La quantité de carbone dans un sol, qui se corrèle comme nous l'avons indiqué avec la quantité de matière organique dans celui-ci, est souvent considérée comme l'un des principaux étalons de mesure de sa santé. Un sol où l'on note avec le temps une diminution de la quantité de carbone est généralement considéré comme en voie de dégradation. Inversement, lorsque la vie d'un sol foisonne, se diversifie, s'enrichit, on y observe de manière concomitante une augmentation de la quantité de carbone (organique). Un pourcentage élevé de cet élément est donc généralement le témoin d'un sol en santé, ce qui se traduit non seulement par des rendements plus élevés, mais aussi par des écosystèmes agricoles plus résilients³³.

³³ La corrélation entre la quantité de matière organique, celle de carbone organique et la santé des sols est bien documentée et bien connue : « It is widely recognized that the application of organic materials is one of the most effective ways of increasing soil organic carbon (SOC) levels and improving soil quality. » Dhaliwal, S.S., et al. (2019), « Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: A review » dans *Environmental and Sustainability Indicators*, 2019, no. 1-2. À l'inverse, la diminution de la quantité de carbone organique est souvent identifiée comme l'une des causes principales de la décroissance des rendements. Lisons : « stagnation or decline in yields has been observed in intensive cropping systems in the latest decennia, attributed to the poor quality and quantity of SOC and its impact on nutrient supply » Vaneekhaute Céline et al., (2014), « Assessing Nutrient Use Efficiency and Environmental Pressure of Macronutrients in Biobased Mineral Fertilizers: A Review of Recent Advances and Best Practices at Field Scale », dans *Advances in Agronomy*, volume 128, 2014, pp. 137-180. Voir aussi Magdoff, Fred, Van Es, Harold. (2021). « Building Soils for Better Crops. Écological Management for Healthy Soils », dans *Sustainable Agriculture Research & Education, Handbook Series*. On peut lire enfin dans le rapport de l'INRA l'extrait suivant : « Le stockage de carbone dans les sols est, de façon générale, bénéfique localement pour le fonctionnement des agroécosystèmes, par l'effet des matières

La mise en place des pratiques susmentionnées offre ainsi des bénéfices qui s'ajoutent à la lutte aux changements climatiques. La réduction du travail du sol peut se traduire par exemple par des économies de temps et de carburant³⁴. De même en va-t-il des avantages de l'agroforesterie. En plus d'améliorer la santé des sols, elle peut représenter une occasion de diversification des sources de revenus par la plantation d'arbres fruitiers ou de noisetiers³⁵. Il fut aussi bien documenté que la croissance de plantes fourragères sur des parcelles ombragées était supérieure, et avec un meilleur taux de protéine, que si ces plantes étaient laissées en plein soleil³⁶. Plusieurs de ces mesures permettent aussi d'accroître la stabilité des agrégats du sol, ce qui permet d'en réduire l'érosion et le ruissellement, tout en favorisant son activité biologique³⁷, et ainsi de diminuer la quantité de phosphore s'écoulant dans les cours d'eau avoisinants. Ces pratiques agricoles qui contribuent à la santé des sols tout en séquestrant le carbone ne riment donc pas nécessairement avec une diminution des bénéfices pour les producteurs, la communauté et l'environnement³⁸, même si des coûts peuvent être associés à ces changements de pratiques.

Le lien entre la santé d'un sol (santé que l'on peut identifier à la matière organique qu'il contient) et les GES qui s'en échappent, s'observe notamment lorsqu'on compare certaines des caractéristiques des écosystèmes du Québec et des Prairies canadiennes. Rappelons qu'une terre en exploitation qui émet des quantités importantes GES est généralement associée à une diminution concomitante du taux de matière organique et de nitrate sous terre. La quantité de GES générés par un sol est ainsi un indicateur de sa dégradation. Le tableau et la carte suivants illustrent cet état de fait. Au Québec, 80% des superficies agricoles accusent une perte d'au moins 90 kg de matière organique par hectare. Le contraste est frappant lorsqu'on compare cette situation avec celle qui prévaut dans les Prairies où aucune des superficies recensées n'affichait une perte importante de matière organique. En fait, l'agriculture des Prairies canadiennes accroît annuellement la quantité de matière organique des sols qui y sont cultivés, et ce, environ au même rythme que les sols québécois s'épuisent. Ces tendances contraires est frappante lorsqu'on les visualise sur une carte en les rapportant en frais d'émission de GES (voir la carte 1). On peut en effet supposer qu'une part non négligeable de la matière organique qui diminue dans les sols du Québec se retrouve dans l'atmosphère sous la forme de CO₂ et de N₂O tandis que l'agriculture des Prairies préserve ces atomes dans des molécules qui composent la matière organique de leurs sols. Selon une étude sur l'agriculture écologiquement durable au Canada, le changement d'affectation de terres agricoles, jadis en pâturage ou couvert par des plantes fourragères et

organiques sur plusieurs propriétés du sol [...] Ces propriétés et fonctions du C, décrites ici pour les agroécosystèmes, sont valables pour tous les écosystèmes terrestres. » Pellerin et al., (2019) *Stocker du carbone dans les sols français...*, p. 28.

³⁴ Chenu, C et al. (2014). « Stocker du carbone dans les sols agricoles : évaluation de leviers d'action pour la France », dans *Innovations agronomiques*, 37, p. 27.

^{35 35} Chenu, C et al. (2014). « Stocker du carbone dans les sols agricoles... », p. 29.

³⁶ Pang, Keija et al., (2019), « Responses of legumes and grasses to non-, moderate, and dense shade in Missouri, USA. I. Forage yield and its species-level plasticity, *Agroforestry Systems*, vol 93 no. 1, 2019, p. 11-24.

^{37 37} Chenu, C et al. (2014). « Stocker du carbone dans les sols agricoles... », p. 27.

³⁸ Citons, à propos des bénéfices de la séquestration de carbone, Yorgey et al : These benefits include reduced erosion, improved water retention in soils, improved water quality in nearby waterways, increased microbial activity, improved nutrient cycling, enhanced crop productivity [...], and even the potential for improvements in human health through more nutritious foods (Brevik and Burgess 2013). Yorgey, G.G., S.A. Hall, K.M. Hills, C.E. Kruger, and C.O. Stöckle, (2019) « Carbon Sequestration Potential in Cropland Soils in the Pacific Northwest: Knowledge and Gaps » Washington State University, Pullman, WA. <http://s3-us-west-2.amazonaws.com/wp2.cahnrs.wsu.edu/wp-content/uploads/sites/32/2019/11/C-sequestration-in-iPNW-croplands.pdf>

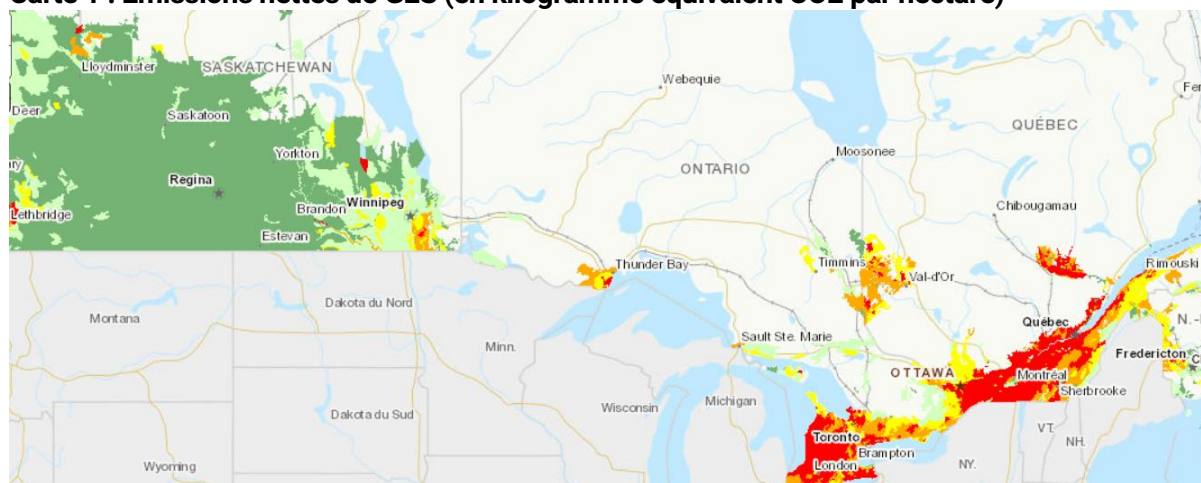
désormais affectées à des cultures annuelles, est la cause principale de cette diminution tendancielle du taux de matière organique dans les sols du Québec³⁹.

Tableau 2 : Évolution annuelle de la quantité (en kg par hectare) de matière organique dans les sols agricoles au Québec et dans les prairies canadiennes (Manitoba, Saskatchewan et Alberta), 2011

Matière organique	Québec	Prairies
+ de 90 kg/ha/an	0	56
25 à 90 kg/ha/an	0	31
25 à -25 kg/ha/an	2	13
-25 à - 90 kg/ha/an	18	0
- de 90 kg/ha/an	80	0

Source : Cerkowniak, D. B.G. McConkey, W.N. Smith and M.J. Bentham, (2016), « Soil organic matter », dans Clearwater, R. L., T. Martin and T. Hoppe (dirs.), (2016), *L'agriculture écologiquement durable au Canada : Série sur les indicateurs agroenvironnementaux - Rapport n° 4.t*, Ottawa (Ont.), Agriculture et agroalimentaire Canada, pp. 239.

Carte 1 : Émissions nettes de GES (en kilogramme équivalent CO2 par hectare)



Légende :



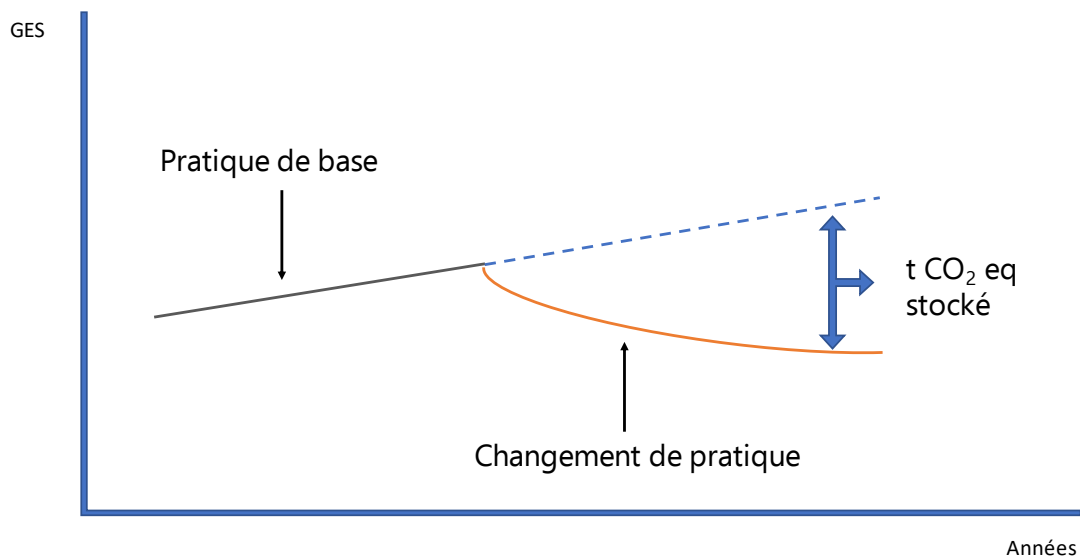
Source : Indicateur des gaz à effet de serre d'origine agricole, <https://agriculture.canada.ca/fr/agriculture-environnement/changements-climatiques-qualite-lair/indicateur-gaz-effet-serre-dorigine-agricole>

³⁹ Pour le dire avec Cerkowniak (et al.) « The decline in SOC in regions east of the Prairies is the inevitable result of the conversion of pastures and hayland to more intensive annual crops. As this trend has persisted for at least five decades, a continual loss of SOC has occurred » Voir : Cerkowniak, « Soil organic matter », dans *L'agriculture écologiquement durable au Canada...* p. 100.

Calculer le potentiel de séquestration des GES par les sols du Québec

Le carbone et l'azote étant des atomes indispensables au développement de la vie, un sol dont la matière organique augmente tend par le fait même à séquestrer des GES. En agriculture, on calcule généralement la quantité de GES (en t de CO₂ eq) stockée en une année en fonction de la différence entre les GES qui auraient été générés par une pratique agricole de départ si celle-ci avait été maintenue dans le temps, d'un côté, et, de l'autre côté, la diminution des GES dans l'atmosphère induite par un changement de pratique agricole⁴⁰. La figure suivante offre une représentation graphique de ce mode de calcul.

Figure 6 : Schéma de l'évaluation de CO₂ stocké suivant un changement de pratique agricole



Ce calcul a le mérite d'inclure dans l'équation non seulement le retrait de GES de l'atmosphère comme tel, mais aussi la réduction des émanations de GES réalisée par le changement de pratique agricole⁴¹.

Combien de GES les sols agricoles peuvent-ils stocker ? Il n'est pas possible de répondre à cette question avec exactitude. Foisonnante, la recherche sur cette question suit son cours et, comme nous l'avons soulevé, la capacité de séquestration des sols dépend de nombreux facteurs : du type de sols, du taux de MO initial, du mode d'affectation du sol, du type de culture qui s'y pratique, pour ne nommer ici que quelques éléments influençant les processus de captage des GES de l'atmosphère par les sols. Des analyses ayant été réalisées par le passé afin de chiffrer ce potentiel

⁴⁰ C'est du moins là la définition que donne l'INRA en France du stockage additionnel absolu, calculé sur une année. Lisons : « Le stockage additionnel annuel absolu permis par une pratique stockante est égal à la différence entre ces stocks à 30 ans avec la pratique stockante et ceux avec la pratique actuelle, divisée par le nombre d'années. » Pellerin et al., 2019) *Stocker du carbone dans les sols français...*, p.45.

⁴¹ Le projet de protocole présenté par l'Équipe des crédits compensatoires de la Direction du marché du carbone du MELCC offre une plus grande latitude en ce qu'il prend aussi en considération le temps de stockage du GES dans le calcul. Voir : <https://menv.gouv.qc.ca/changements/carbone/credits-compensatoires/quebec-protocole-foret.pdf>

de stockage, nous en retenons (et présentons), ici, deux. Ces études ont le mérite de non seulement considérer la séquestration des GES comme telle, mais de calculer aussi les coûts qui y sont associés. La première étude a été réalisée en France par l'INRA (étude parue en 2019) et la seconde, au Québec (et dont les résultats furent publiés en 2005).

En 2019, l'INRA a dévoilé les résultats d'une vaste étude commandée par le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation de France et à laquelle environ 40 chercheurs et experts ont contribué. L'objectif de l'étude était de chiffrer le potentiel de séquestration de GES par les sols français et de calculer les coûts associés aux changements de pratiques qu'ils impliquent. Le tableau suivant reprend les données de l'étude. Sans surprise, la capacité de stockage des sols varie principalement en fonction du type de culture qui s'y pratique. Ainsi les superficies agricoles qui sont affectées – et qui continuent à l'être – aux grandes cultures présentent, de manière générale⁴², un potentiel de stockage (exprimé en taux de carbone organique dans le sol) beaucoup moins élevé que les prairies (les pâturages ou les sols dédiés aux fourrages). Mentionnons enfin que le coût de séquestration d'une t de CO₂ eq de quelques pratiques est inférieur à 170\$ (soit le coût d'une tonne de carbone dans le plan canadien en 2030). Il s'agit plus spécifiquement de la réduction du travail du sol et de l'utilisation de semis-direct (88\$), de la mise en place de cultures intercalaires (128\$), de la réduction du nombre de fauches en une saison pour les fourrages (115\$) et de l'épandage de fertilisation additionnelle dans les prairies (65\$). La fertilisation des sols par l'ajout de matières organiques exogènes se traduit quant à elle par un coût négatif, c'est-à-dire par des économies pour le producteur.

Tableau 3 : Potentiel de stockage de carbone dans les sols suivant l'adoption de certaines pratiques agricoles et les coûts qui y sont associés, en France en 2019 (\$ constants canadiens de 2021)*

Grandes cultures (cultures pérennes)	1		2		3		4		5	
	tC/ha/an	tCO ₂ e/ha/an	tC/ha/an	tCO ₂ e/ha/an	\$/ha/an	\$/tC	\$/ha/an	\$/tC	\$/tCO ₂ e	\$/tCO ₂ e
Réduction du travail du sol et semis-direct	0.060	0.220			20	321				88
Culture intercalaire	0.126	0.462			60	470				128
Rotation (prairies temporaires)	0.114	0.418			139	1217				332
Matières organiques exogènes	0.061	0.224			-80	-1294				-353
Agroforesterie intra-parcellaire	0.207	0.760			180	872				238
Implantation de haies	0.017	0.062			112	6699				1825
Prairies permanentes (fourrages)										
	tC/ha/an	tCO ₂ e/ha/an	tC/ha/an	tCO ₂ e/ha/an	\$/ha/an	\$/tC	\$/ha/an	\$/tC	\$/tCO ₂ e	\$/tCO ₂ e
Réduction des fauches (pâturage)	0.265	0.973			112	424				115
Fertilisation additionnelle	0.176	0.646			43	240				65

* Les données du présent tableau sont celles de l'INRA, à l'exception des sommes (monétaires) qui sont rapportées en dollars canadiens de 2021.

Source : Pellerin, Sylvain, et al, (2019), *Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel au regard de*

⁴² Si l'agroforesterie intra-parcellaire présente un potentiel de séquestration similaire aux pratiques suggérées pour les prairies, les coûts à l'hectare qui y sont associés dépassent de deux à quatre fois ceux reliés aux sols affectés à l'alimentation animale.

l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût - rapport technique, Étude réalisée pour l'ADEME et le Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, INRA (France), 114 p.

Une autre étude portant sur le potentiel de séquestration des sols⁴³ a pris le Québec comme base d'analyse⁴⁴. La méthode utilisée par Thomassin *et al.* pour calculer le potentiel de séquestration des sols québécois visait à établir la quantité de GES stockés en fonction du prix des crédits compensateurs. Comme le changement de pratique agricole peut impliquer certaines charges aux producteurs, les auteurs ont calculé, en fonction d'une échelle hypothétique de prix des crédits compensateurs, les quantités de t de CO₂ eq séquestrées par les sols suivant les changements de pratiques agricoles induits par les incitatifs financiers. L'effet sur la séquestration de GES de trois pratiques agricoles fut pris en considération. Ces pratiques étaient : le travail réduit du sol, les semis-directs et la couverture végétale permanente. Le tableau suivant présente, pour certaines régions du Québec, les tonnes de GES ainsi séquestrées à un prix de 66,50\$. Au total, un crédit compensateur de 66,50\$ constituerait un incitatif suffisant pour conduire les producteurs agricoles à stocker (en adoptant l'une ou l'autre des trois pratiques susmentionnées) un peu plus de 100 Mt de CO₂ eq au Québec. Quant à eux, les revenus que les agriculteurs pourraient tirer de cette séquestration sont plutôt modestes. Pour le Québec en entier, les montants ne s'élèveraient qu'à 7 millions de dollars canadiens. À titre de comparaison, la production ovine a rapporté aux éleveurs du Québec 55 millions en recettes monétaires en 2018⁴⁵.

Tableau 4 : Carbone stocké par les sols agricoles de certaines régions québécoises suivant l'adoption de certaines pratiques* à un prix de 66,50\$ (en dollars constants de 2021)** la tonne de CO₂ équivalent

	t CO ₂ eq/an	\$ à 66,50	en %
Bas-Saint-Laurent	12 054	801 591	11,6
Saguenay-Lac-Saint-Jean et Côte Nord	16 457	1 094 391	15,8
Québec	6 537	434 711	6,3
Mauricie	998	66 367	1,0
Estrie	13 143	874 010	12,6
Montréal - Laval - Lanaudière	-295	- 19 618	-0,3
Outaouais - Laurentides	3 935	261 678	3,8
Abitibi-Témiscamingue - Nord-du-Québec	19 671	1 308 122	18,9
Chaudière-Appalaces	18 375	1 221 938	17,6
Montérégie	2 572	171 038	2,5
Centre-du-Québec	10 715	712 548	10,3
Total - Québec	104 162	6 926 773	100

* Cumul de trois pratiques : labours réduits, semis-directs et couvertures végétales permanentes.

** La valeur monétaire de l'étude initiale était de 50\$, en 2005, et elle fut ici rapportée en dollars constants de 2021.

⁴³ Seul le potentiel de séquestration du gleysol fut calculé par les auteurs en raison du fait que ce type de sol est prédominant dans la plupart des écoumènes des régions du Québec.

⁴⁴ Thomassin, Paul J., et Hugues Morand, 2005, « Changes in Quebec Cropping Practices in Response to a Carbon Offset Market : A Simulation » dans *Canadian Journal of Agricultural Economics / Revue canadienne d'agroéconomie*, vol. 53 2005, pp. 403-424.

⁴⁵ Source : MAPAQ, (2019), *Profil sectoriel de l'industrie bioalimentaire au Québec*, Québec, Gouvernement du Québec. En dollars constants de 2021.

Source : Thomassin, Paul J., et Hugues Morand, 2005, « Changes in Quebec Cropping Practices in Response to a Carbon Offset Market : A Simulation » dans *Canadian Journal of Agricultural Economics /Revue canadienne d'agroéconomie*, vol. 53 2005, pp. 403–424.

À la lumière des informations contenues dans l'étude de l'INRA (et de plusieurs autres études par ailleurs), nous savons que l'introduction de diverses autres pratiques agricoles sont plusieurs fois plus « stockantes » de GES que ce qui fut pris en considération par Thomassin et Morand en 2005⁴⁶. Si le portrait dressé par ces derniers est incomplet, il offre néanmoins un aperçu du potentiel de séquestration de GES que recèle les sols agricoles du Québec suivant l'adoption de certaines pratiques agricoles, et ce, en fonction d'une fourchette de prix des crédits compensateurs pour une t de CO₂ eq⁴⁷.

Une dernière manière d'évaluer le potentiel de séquestration québécois, de manière plus abstraite et formelle, est de calculer, sur une superficie quelconque, ce que l'augmentation de la proportion de matière organique qui y est contenue pourrait représenter en valeur sous la forme de crédits compensateurs. Nous avons effectué un tel exercice pour les superficies cultivées au Québec en calculant les revenus pouvant être générés suivant l'augmentation de 0,0325 % de MO contenue dans un sol qui en contiendrait 4 % sur 30 cm de profondeur (on sait que la plupart des sols agricoles en contiennent de 3% et 6%)^{48 49}. Une telle augmentation de la MO se traduirait par une séquestration de 0,12 t de CO₂ à l'hectare⁵⁰.

⁴⁶ Thomassin, Paul J., et Hugues Morand, 2005, « Changes in Quebec Cropping Practices... »

⁴⁷ L'étude de Thomassin et Morand n'est pas la seule à avoir pris les terres arables du Québec comme objet d'analyse. Mentionnons aussi celle de Winans et al. (2015), « Carbon sequestration potential and cost-benefit analysis of hybrid poplar, grain corn and hay cultivation in southern Quebec, Canada », dans *Agroforestry Systems*, vol 83, no3, pp. 421-433.

<https://joann-whalen.research.mcgill.ca/publications/Agroforestry%20Systems%202015%20DOI%2010-1007s10457-014-9776-4.pdf>

⁴⁸ Voir : <http://nmsp.cals.cornell.edu/publications/factsheets/factsheet41.pdf>

⁴⁹ Voici quelques-uns des autres paramètres utilisés : densité du sol = 1,4g par cm³, profondeur du sol 30 cm, 0,58 g de C par g de MO, 1 g de C = 3,67 g de CO₂, basé sur un sol contenant 4% de MO et dont cette MO connaîtrait une augmentation de 0,0325%. Cette augmentation de la quantité de matière organique est basée sur les estimations de Fred Magdoff et Harold van Es dans leur livre *Building Soils for Better Crops* (4e ed.). Ces derniers calculent que la seule application de 20 t de fumier sur un acre pendant une année fait augmenter de 0,065% la quantité de matière organique dans un sol. Leur estimation (p. 187) ayant été réalisée pour les 15 premiers centimètres, nous avons divisé par deux l'augmentation de MO pour le faire correspondre à notre estimation faite sur 30 cm. Voir : Fred Magdoff et Harold van Es,(2021), *Building Soils for Better Crops* (4e ed.), Sustainable Agriculture Research and Education (SARE), 410 pages.

<https://www.sare.org/wp-content/uploads/Building-Soils-for-Better-Crops.pdf>

⁵⁰ Un scénario de séquestration de CO₂ fixé à 0,12 tonne à l'hectare n'apparaît pas démesuré. En Saskatchewan, une récente étude a conclu que les pratiques agricoles adoptées par les agriculteurs (de 2016 à 2019) font en sorte que les sols stockent annuellement en moyenne de 0,12 à 0,42 t de carbone à l'hectare, soit entre 0,44 et 1,54 t de CO₂ eq. Au total, le tiers des émissions saskatchewanaises de GES du secteur agricole est ainsi séquestré dans les sols. L'étude relève que l'atteinte de ces résultats s'est aussi accompagnée d'une utilisation accrue de glyphosate par les producteurs. Voir Smyth, Stuart (2021), « Quantifying the Carbon Sequestered in Saskatchewan Agricultural Soils », présenté dans le cadre du *20th High Level Policy Dialogue on Agricultural Biotechnology Meeting* (3 août 2021), APEC, Nouvelle-Zélande. http://mddb.apec.org/Documents/2021/HLPDAB/HLPDAB/21_hlpdab_009.pdf. Dans l'étude de Winans et al., on a calculé qu'une plantation de peuplier en intercalaire avec des plantes fourragères pouvait séquestrer jusqu'à 11,18 tonnes de C à l'hectare par année, et donc de 40,99 t de CO₂ eq. Leur méthode de calcul se basait sur la « net primary production » (NPP), qui inclut non seulement ce que stocke le sol, mais aussi ce qui est capté par la biomasse végétale. Kiara S. Winans, Anne-Sophie Tardif, Arlette E. Lteif, Joann K. Whalen, (2015), « Carbon sequestration potential and cost-benefit analysis of hybrid poplar, grain corn and hay cultivation in southern Quebec, Canada », dans *Agroforestry Systems*, vol 83, no3, pp. 421-433 <https://joann-whalen.research.mcgill.ca/publications/Agroforestry%20Systems%202015%20DOI%2010-1007s10457-014-9776-4.pdf>

Extrapolant cette quantité sur l'ensemble de la superficie agricole du Québec, c'est 0,73 mégatonne de CO₂ qui serait ainsi retirée de l'atmosphère par les sols annuellement. À ce niveau de séquestration, des crédits compensatoires dont la valeur s'élèverait à 80\$ la t de CO₂ eq se traduiraient par une injection de près de 60 millions de dollars en zone verte. Le tableau suivant présente, par région, les résultats de ce calcul général de séquestration sur les terres arables au Québec.

Tableau 5 : Valeur des crédits compensateurs et stockage de GES des sols agricoles du Québec selon un scénario 0,12 tonne de CO₂ par hectare à un prix de 80\$ la t de CO₂ eq, par région, Québec

Régions	Sup. agri. (h)	CO ₂ eq (t)	Cr. 80\$ t (\$)
Bas-Saint-Laurent	642 000	74 620	5 969 617
Saguenay-Lac-St-Jean	399 000	46 376	3 710 089
Capitale-Nationale	222 000	25 803	2 064 260
Maurice	242 000	28 128	2 250 229
Estrie	705 000	81 943	6 555 420
Montréal	2 000	232	18 597
Outaouais	316 000	36 729	2 938 316
Abitibi-Témiscamingue	633 000	73 574	5 885 931
C-N et N du Qc	51 000	5 928	474 222
Gaspésie Les Îles	86 000	9 996	799 668
Chaudière-Appalaches	1 002 000	116 463	9 317 066
Laval	7 000	814	65 089
Lanaudière	206 000	23 944	1 915 485
Laurentides	195 000	22 665	1 813 201
Montérégie	953 000	110 768	8 861 441
Centre-du-Québec	645 000	74 969	5 997 512
Total	6 306 000	732 952	58 636 143

Source : Pour les superficies, MAPAQ, (2019), *Profil régional de l'industrie bioalimentaire au Québec*, Québec, Gouvernement du Québec.

Ce tableau donne un aperçu des montants que la bioséquestration des GES par les sols agricoles pourrait générer au Québec si le prix d'une t de CO₂ eq se situait 80\$. Une fois rapportés à l'échelle des quelques 27 000 fermes que compte le Québec, ces montants apparaissent plutôt modestes. Il s'agirait néanmoins de revenus supplémentaires de 60 millions pour la zone verte qu'il importe de capter et de canaliser vers le développement de la scène agricole québécoise. Enfin, en fonction des paramètres utilisés, la simulation mène à un stockage de carbone par les sols équivalent à seulement 10% de ce que secteur émet en frais de GES annuellement, soit 7,7 Mt de CO₂ eq⁵¹.

⁵¹ MELCC, (2021), *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2019 et leur évolution depuis 1990*, Québec, Gouvernement du Québec.

Conclusion

Éléments de base de la vie, le carbone et l'azote se retrouvent sous diverses formes (organique et inorganique) sous le sol, sur la terre (comme dans la biomasse) et dans l'atmosphère. L'augmentation de la proportion de carbone et d'azote dans le sol implique une diminution concomitante de ces atomes dans l'atmosphère où, lorsqu'ils s'y retrouvent en tant que CO₂ et N₂O, ils contribuent à l'effet de serre. Une économie qui aspire à devenir carboneutre et à retirer des quantités des GES de l'atmosphère peut table sur la capacité naturelle des sols à séquestrer ces gaz pour arriver à cette fin. Comme le Québec est engagé sur cette voie, comme d'autres pays signataires de l'Accord de Paris, le développement d'incitatifs visant à accentuer l'adoption de pratiques grâce auxquelles des GES sont stockés dans les sols, au lieu que ces derniers en génèrent, fait – et fera de plus en plus – partie de l'arsenal des moyens que les États mobiliseront dans la lutte au réchauffement climatique.

Si ces changements de pratiques s'accompagnent généralement de coûts – coûts dont on peut présumer que les producteurs agricoles ne souhaiteront pas assumer seuls – ils peuvent aussi paver la voie à l'introduction de méthodes d'élevage et de culture bénéfiques autant à la santé des sols, de l'air et de l'eau, et ce, sans être incompatibles avec la rentabilité des fermes. Une agriculture séquestrant des GES dans le sol offre généralement aussi des services écosystémiques bénéfiques à l'environnement et aux communautés où elle se pratique. La mitigation des changements climatiques par les sols agricoles québécois pourrait en outre se traduire par un apport monétaire supplémentaire en zone verte, pour peu qu'un prix soit attribué aux GES séquestrés. Cela dit, bien que l'on puisse établir que le stockage de carbone et d'azote dans les sols agricoles du Québec pourrait générer des dizaines de millions de dollars annuellement, il se pourrait bien qu'une fois rapportés à l'échelle des fermes, les coûts de transaction et les risques financiers attribuables à un changement de pratique puissent apparaître comme des charges qui, finalement et pour le producteur individuel, ne vaudraient pas la peine. Une réflexion approfondie devra donc être faite sur les modèles économiques de valorisation de la séquestration des GES par les sols agricoles du Québec si l'on souhaite établir la faisabilité et l'intérêt de cette avenue pour les producteurs. Une telle réflexion, si elle peut s'inspirer des initiatives mises de l'avant ailleurs dans le monde, devra nécessairement s'ancrer dans l'écosystème institutionnel particulier du modèle agricole québécois pour arriver à en faire profiter ses principaux artisans.

Bibliographie

- Cerkowniak, D. B.G. et al., (2016), « Soil organic matter », dans Clearwater, R. L., T. Martin and T. Hoppe (dirs.), (2016), *L'agriculture écologiquement durable au Canada : Série sur les indicateurs agroenvironnementaux - Rapport n° 4.t*, Ottawa (Ont.), Agriculture et agroalimentaire Canada, pp. 239.
- Chenu, C. et al. (2014). « Stocker du carbone dans les sols agricoles : évaluation de leviers d'action pour la France », dans *Innovations agronomiques*, vol. 37.
- Dhaliwal, S.S., et al., (2019), « Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: A review » dans *Environmental and Sustainability Indicators*, 2019, no. 1-2.
- Delavaux, Camille S., et al., (2017), « Beyond nutrients: a meta-analysis of the diverse effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plants and soils », dans *Ecology*, 2017, vol 98, no.8, pp. 2111-2119.
- Évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques (EFESE). (2019). *La séquestration du carbone par les écosystèmes en France*, Rapport d'évaluation, Ministère de la transition écologique et solidaire, 102 pages.
- Global Carbon Project, (2018), *Supplemental data of Global Carbon Budget 2018 (Version 1.0)* [Data set]. Global Carbon Project. <https://doi.org/10.18160/gcp-2018>.
- Gu, Jiangxin et al., (2017), « Trade-off between soil organic carbon sequestration and nitrous oxide emissions from winter wheat-summer maize rotations: Implications of a 25-year fertilization experiment in Northwestern China », dans *Science of The Total Environment*, Vol. 595, no. 1 oct. 2017, pp. 371-379.
- Guenet, Bertrand et al., (2021), « Can N₂O emissions offset the benefits from soil organic carbon storage? », dans *Global Change Biology*, vol. 27, pp. :237–256.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2021), *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis – Summary for Policymakers*, Working Group I; Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Suisse, 40 pages. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf.
- Irvine, Peter, et al., (2019), « Halving warming with idealized solar geoengineering moderates key climate hazards » dans *Nature Climate Change*, Vol. 9, avril 2019, pp. 295–299. www.nature.com/natureclimatechange.
- Kou-Giesbrecht, Sian et al., (2021), « N supply mediates the radiative balance of N₂O emissions and CO₂ sequestration driven by N-fixing vs. non-fixing trees », dans *Ecology. Ecological Society of America*, vol. 102, no. 8, pp. 1-8.

- Lal, Rattan. (2018). « Climate Change and the Global Soil Carbon Stock », dans *Soil and Climate*, Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, p. 421.
- Magdoff, Fred, Van Es, Harold. (2021). « Building Soils for Better Crops. Écological Management for Healthy Soils », dans *Sustainable Agriculture Research & Education, Handbook Series*, 394 pages.
- MAPAQ, (2019), *Profil sectoriel de l'industrie bioalimentaire au Québec*, Québec, Gouvernement du Québec.
- MAPAQ, (2019), *Profil régional de l'industrie bioalimentaire au Québec*, Québec, Gouvernement du Québec.
- MELCC, (2021), *Projet de règlement de crédits compensatoires relatif à des projets de boisement et reboisement sur des terres du domaine privé*, Québec, Gouvernement du Québec.
<https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/carbone/credits-compensatoires/quebec-protocole-foret.pdf>
- MELCC, (2021), *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2019 et leur évolution depuis 1990*, Québec, Gouvernement du Québec.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine; Committee on Developing a Research Agenda for Carbon Dioxide Removal and Reliable Sequestration. *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda*, Washington (DC), National Academies Press (US); 2018.
- Olivier, Alain, (2021), *La révolution agroécologique. Nourrir tous les humains sans détruire la planète*, Montréal, Écosociété, 296 pages.
- Pang, Keija et al., (2019), « Responses of legumes and grasses to non-, moderate, and dense shade in Missouri, USA. I. Forage yield and species-level plasticity », dans *Agroforestry Systems*, vol 93 no. 1, 2019, p. 11-24.
- Pellerin, Sylvain, et al, (2019), *Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût - rapport technique*, Étude réalisée pour l'ADEME et le Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, INRA (France), 114 pages.
- Rasch, Philip J., et al., (2008), « Exploring the geoengineering of climate using stratospheric sulfate aerosols: The role of particle size » dans *Geophysical Research Letters*, vol. 35, no 2. 6 pages.
- Smyth, Stuart (2021), « Quantifying the Carbon Sequestered in Saskatchewan Agricultural Soils », présenté dans le cadre du *20th High Level Policy Dialogue on Agricultural Biotechnology Meeting* (3 août 2021), APEC, Nouvelle-Zélande.
http://mddb.apec.org/Documents/2021/HLPDAB/HLPDAB/21_hlpdab_009.pdf.

- Soussana, Jean-François (2012), « Biogéochimie et écologie des sols », dans *La chimie et la nature* (Dinh-Audouin, M.T., dirs), p. 76.
- Streubel, J.D., et al., (2011). « Influence of Contrasting Biochar Types on Five Soils at Increasing Rates of Application », dans *Soil Science Society of America Journal*, vol 75 no. 4, pp. 1402-1413.
- Thirkell, Tom J., et al., (2020), « Carbon for nutrient exchange between arbuscular mycorrhizal fungi and wheat varies according to cultivar and changes in atmospheric carbon dioxide concentration » dans *Global Change Biology*, 2020, no. 26, pp. 1725–1738
- Thomassin, Paul J., et Hugues Morand, 2005, « Changes in Quebec Cropping Practices in Response to a Carbon Offset Market : A Simulation » dans *Canadian Journal of Agricultural Economics /Revue canadienne d'agroeconomie*, vol. 53 2005, pp. 403–424.
- Torrealba, Gabrielle et David Dlab, (2020), *Carbon sequestration in agriculture*, Sénat canadien, bureau du sénateur Colin Deacon, Ottawa, 15 pages.
https://colindeacon.ca/media/48389/20201211_enfr_carbonsequestrationfile.pdf.
- Vaneckhaute Céline et al., (2014), « Assessing Nutrient Use Efficiency and Environmental Pressure of Macronutrients in Biobased Mineral Fertilizers: A Review of Recent Advances and Best Practices at Field Scale », dans *Advances in Agronomy*, volume 128, 2014, pp. 137-180.
- Winans et al. (2015), « Carbon sequestration potential and cost-benefit analysis of hybrid poplar, grain corn and hay cultivation in southern Quebec, Canada », dans *Agroforestry Systems*, vol 83, no3, pp. 421-433.
- Wuebbles, Donald J. (2009). « Atmosphere. Nitrous oxide: no laughing matter », dans *Science*, vol. 326, no 5949, pp. 56-57.
- Yorgey, G.G.et al., (2019) *Carbon Sequestration Potential in Cropland Soils in the Pacific Northwest: Knowledge and Gaps*, Washington State University, Pullman, WA.
<http://s3-us-west-2.amazonaws.com/wp2.cahnrs.wsu.edu/wp-content/uploads/sites/32/2019/11/C-sequestration-in-iPNW-croplands.pdf>.