



Priorité à la Santé du Sol

Une stratégie adaptée au changement
climatique pour l'Ontario

Novembre 2016

Table des matières

Résumé	4
Les deux facettes de l’histoire de l’agriculture moderne	7
Histoire 1 – Nourrir la planète	7
Histoire 2 – Mais à quel coût?	8
Émissions de GES	9
La sécurité alimentaire et la résilience écologique	10
Autres répercussions : eau, pesticides, etc.	11
Il est temps de changer de cap.....	12
Priorité à la santé du sol	13
Qu’est-ce que la santé du sol?.....	14
Un monde complexe et actif sous nos pieds	14
Les avantages concrets de maintenir la santé des sols.....	15
Les bactéries et champignons, ingénieurs de la structure du sol	16
Le tout premier mécanisme d’échange de carbone	16
Comment les végétaux se nourrissent	16
Sources de nutriments.....	18
Apport rapide en nutriments	18
Échange et séquestration de carbone	19
Approche axée sur la santé du sol – Principes et pratiques.....	20
Principes.....	20
Du sable dans l’engrenage : l’utilisation inappropriée ou la surutilisation des adjuvants de synthèse peut nuire au système naturel.....	21
Pratiques exemplaires de gestion	22
Les champions de la santé du sol.....	24
Champions américains de la santé du sol.....	24
Brown Ranch, Dakota du Nord	24
Klaas et Mary-Howell Martens, agriculteurs biologiques dans l’État de New York	25
Champions ontariens de la santé du sol.....	26
La ferme de la famille Belan, près d’Inwood, en Ontario.	27
La ferme de la famille Rogers, à Lambton Shores, en Ontario	28

Concrétiser les avantages prometteurs d'un sol en santé	30
Un mandat pour la recherche	30
Que font les autres régions?	31
États-Unis.....	31
France.....	32
Le potentiel de la santé du sol en Ontario à atténuer le changement climatique et à s'y adapter	33
Adaptation	33
Atténuation	33
Lorsque les champions deviennent la norme	36
Un rôle important pour le MAAARO	38
Le potentiel des crédits de carbone en agriculture.....	39
Commentaires et recommandations du CEO	41
Commentaires.....	41
Recommandations	42
Notes en fin de chapitre	43

Résumé

L'agriculture moderne a le mérite d'avoir très bien réussi à nourrir le monde entier. Au cours des dernières décennies, le rendement des cultures a constamment augmenté, alors que les prix ont relativement chuté. Les nouvelles technologies et engrais ont permis de simplifier la croissance des cultures et d'accroître la rentabilité. En revanche, ces progrès entraînent certains coûts environnementaux, notamment l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, la pollution des plans d'eau par les nutriments (p. ex., le lac Érié) et l'accroissement de la dégradation et de l'érosion des sols. Le changement climatique attire davantage l'attention sur ces enjeux, puisque ceux-ci commencent désormais à menacer la sécurité alimentaire minimale en Ontario.

Heureusement, il est vraisemblable qu'il sera possible de continuer à nourrir la population de manière rentable, tout en préservant la nature en renforçant les écosystèmes des sols et en augmentant la teneur en matière organique du sol grâce à une nouvelle approche : *l'approche axée sur la santé du sol*.

Le rendement des cultures a constamment augmenté, alors que les prix ont relativement chuté.

Le concept de la « santé du sol » commence par reconnaître que les sols sont des écosystèmes vivants. Il y a plus d'organismes vivants dans une poignée de terre saine que d'êtres humains sur la planète. Tous ces organismes, parmi lesquels on retrouve des bactéries, des champignons, des protozoaires, des nématodes ainsi que d'autres créatures de taille légèrement supérieure et visibles à l'œil nu, telles que les mites et vers de terre, forment ce qu'on appelle le *réseau alimentaire du sol*. Ces organismes remplissent une pléthore de fonctions bénéfiques; ils améliorent notamment la fertilité et la structure du sol ainsi que la qualité de l'eau, ils réduisent la quantité de substances toxiques, ils éliminent les maladies et ils accroissent la capacité de séquestration du carbone, un aspect de plus en plus considéré comme l'une des importantes méthodes d'atténuation du changement climatique.

Malheureusement, l'agriculture conventionnelle fait fi du réseau alimentaire du sol et remplace en tout ou en partie le rôle de celui-ci par des adjuvants de synthèse, comme les engrais et pesticides. Qui plus est, elle emploie des pratiques de gestion qui épuisent le réseau alimentaire du sol, par exemple en travaillant le sol fréquemment et en laissant les champs nus entre les cultures. Par conséquent, la structure du sol a été endommagée, de sorte que celui-ci se dégrade et que l'érosion progresse. De plus, l'usage excessif continu des adjuvants de synthèse est l'une des causes de la pollution du sol et il a contribué à réduire la quantité d'organismes présents dans le sol, puisque bon nombre de pesticides sont toxiques pour les formes de vies bénéfiques.

L'approche axée sur la santé du sol utilise une perspective complètement différente en visant d'abord et avant tout à *préserver et améliorer la qualité de la vie du sol*. Cette approche se concrétise en s'appuyant sur les principes de base suivants :

- maintenir une couverture de végétation ou de résidus de végétaux sur le sol en tout temps;
- diversifier les cultures le plus possible;
- réduire au minimum la perturbation du sol;
- laisser des racines vivantes dans le sol toute l'année durant;

- utiliser des adjuvants biologiques le plus possible.

Les pratiques de gestion employées par les agriculteurs qui adoptent l'approche axée sur la santé du sol sont enracinées dans ces principes de base. Parmi ces pratiques, on pense notamment à l'agriculture sans labour et aux diverses méthodes de travail du sol aux fins de conservation; la plantation de cultures couvre-sol (soit des cultures qui visent à améliorer la qualité du sol et qui ne sont pas destinées à la vente au consommateur); le recours aux rotations culturales complexes; le programme 4R Nutrient Stewardship (bonne source, bonne dose, bon moment, bon endroit®); la production et l'utilisation de compost; l'intégration du bétail aux systèmes de culture; et enfin, le recours à des systèmes de pâturage écologiques.

Les agriculteurs qui ont adopté et appliqué de façon systématique les pratiques et les principes énumérés ci-dessus ont été en mesure de progressivement, voire radicalement réduire leur utilisation d'adjuvants de synthèse, tout en accroissant significativement leur rentabilité. Par exemple, Gabe Brown, un agriculteur du Dakota du Nord qui pratique l'approche axée sur la santé du sol depuis belle lurette, a réussi à augmenter le rendement de ses cultures, à améliorer la qualité de ses sols et à accroître ses profits tout en éliminant entièrement l'utilisation des engrais et en réduisant la fréquence de son utilisation des pesticides à une seule application d'herbicide tous les deux ou trois ans. Ici en Ontario, la ferme familiale Belan pratique l'agriculture sans labour depuis 25 ans et a récemment commencé à utiliser les cultures couvre-sol. Elle est ainsi parvenue à réduire ses coûts tout en accroissant le rendement de ses cultures, ce qui a fait grimper la rentabilité de l'entreprise. Par la même occasion, elle a considérablement réduit son empreinte sur l'environnement; à vrai dire, la famille Belan a réussi à augmenter de 3 % la teneur en carbone de ses sols, c'est-à-dire qu'elle a séquestré environ 48 000 tonnes de CO₂ depuis qu'elle a changé sa méthode de gestion du sol.

Ce sont là d'excellentes nouvelles. En accordant la priorité à la santé du sol, il est tout à fait possible que les agriculteurs soient en mesure de tirer parti des grandes réussites de l'histoire moderne de l'agriculture tout en s'attaquant directement à la menace que faisaient constamment peser ces réussites sur l'environnement, quoique la tâche ne sera pas aisée. L'agriculture conventionnelle a très bien fonctionné pour les agriculteurs d'un point de vue individuel, en partie en raison de la simplicité d'exécution des pratiques qu'elle implique. À l'inverse, l'approche axée sur la santé du sol exige davantage d'efforts de la part des agriculteurs en matière de planification, de surveillance et de gestion des rotations culturales complexes, lesquelles comprennent dans bien des cas des cultures secondaires ou couvre-sol pour lesquelles il n'existe pas vraiment de marché de vente. La gestion des maladies et des organismes nuisibles est un autre des obstacles majeurs à surmonter lors du passage à cette nouvelle approche.

Par conséquent, l'approche axée sur la santé du sol ne pourra être implantée à grande échelle en Ontario du jour au lendemain. Il est compréhensible que de nombreux agriculteurs se montrent sceptiques et hésitent à abandonner une façon de faire qui leur a si bien réussi. Ils ont besoin de preuves solides et de modèles de référence prospères pour les guider dans cette transition ainsi que d'un soutien financier approprié pour atténuer les risques tandis qu'ils mettent ces nouvelles idées à l'essai. Le gouvernement de l'Ontario, en particulier le ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO), a un rôle extrêmement important à jouer pour concrétiser cette vision. Le Ministère devrait mettre sur pied une « passerelle » largement accessible aux agriculteurs afin de leur permettre de passer à l'approche axée sur la santé du sol d'une façon qui comporte le moins de risques possible.

À cette fin, le CEO formule les recommandations suivantes :

- La province de l'Ontario devrait devenir signataire de l'initiative 4 pour 1000, un programme d'engagement envers la santé du sol et favorable à la lutte au changement climatique préconisé par le gouvernement de la France.
- Le MAAARO devrait prendre les mesures suivantes :
 - coordonner l'élaboration d'un protocole fondé sur des méthodes et des technologies qui permettent d'estimer de manière fiable la teneur en carbone des sols en Ontario;
 - mettre en œuvre un programme qui permettrait d'estimer la teneur en carbone des sols de l'ensemble de la province tous les trois ans, et rendre ces résultats accessibles au public.
- Le gouvernement de l'Ontario devrait trouver une manière de lier le coût de l'assurance-récolte à la teneur en carbone du sol, de façon à reconnaître qu'au fil du temps, une teneur élevée en carbone permet de réduire les risques pour les cultures.
- La province devrait mettre sur pied un programme qui fournirait un soutien financier pour une période qui pourrait s'échelonner jusqu'à 10 ans pour les agriculteurs qui adoptent les pratiques exemplaires de gestion axée sur la santé du sol, de façon à compenser toute perte de rendement des cultures qui pourrait survenir durant la période de transition.



Les deux facettes de l'histoire de l'agriculture moderne

Histoire 1 – Nourrir la planète

L'agriculture a concrétisé de grandes choses au cours du siècle dernier. Véritable réussite des temps modernes, l'histoire de sa montée foudroyante commence juste après la Première Guerre mondiale avec l'introduction et l'adoption rapide des engrais azotés de synthèse¹. L'agriculture a continué de se développer pendant la révolution verte, laquelle s'est échelonnée sur les quelques décennies qui ont suivi la fin de la Seconde Guerre mondiale. Durant cette période, des variétés de cultures intensives ont été créées et cultivées en association avec des systèmes de gestion de l'eau améliorés, des pesticides à efficacité accrue et de l'équipement agricole de meilleure qualité à plus grande échelle. Des cultures génétiquement modifiées présentant des caractéristiques telles que la résistance aux herbicides (glyphosate) ou avec des pesticides intégrés (Bt) sont apparues dans les années 1990² et ont grandement simplifié et réduit les coûts associés à l'exploitation de grandes cultures courantes, telles que le maïs et les fèves de soja. Plus récemment, la technologie moderne, notamment les tracteurs guidés par GPS, les épandeurs d'engrais à dose variable, les moissonneuses-batteuses équipées de capteurs du rendement et les drones de surveillance des champs promettent déjà d'accroître la rentabilité et de réduire l'utilisation d'adjuvants pour une agriculture plus « précise ».

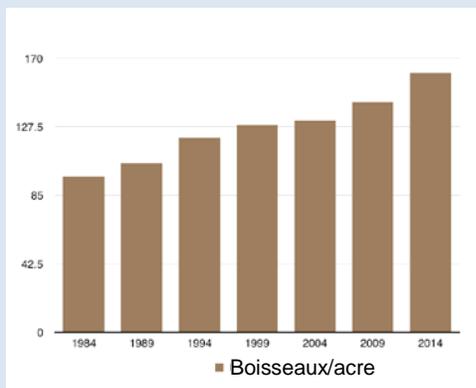


Figure 1 : Rendement des grains de maïs en Ontario, de 1984 à 2014.

Toutes ces innovations ont entraîné des résultats remarquables. Le rendement des cultures a constamment augmenté, tandis que le prix de la nourriture a relativement diminué^{3,4}. Par exemple, au cours des 30 dernières années, le rendement moyen des cultures de maïs en Ontario est passé de 102⁵ boisseaux par acre à 170⁶, celui du blé d'hiver est passé de 67⁷ boisseaux par acre à 78⁸ et celui des fèves de soja, de 37⁹ boisseaux par acre à 46¹⁰. En ce qui concerne le prix de la nourriture, il représentait près de 19 % du revenu

des ménages au Canada en 1969; 40 ans plus tard, cette part est descendue à un peu plus de 10 %, tout en offrant aux consommateurs l'accès à une plus grande variété d'aliments que jamais.

Non seulement tous les facteurs susmentionnés ont permis de réaliser des économies, mais les changements dans la façon d'exploiter les fermes ont également permis d'en faire autant. La conception et l'exploitation sont passées à plus grande échelle et à une intensité accrue, principalement en raison des économies d'échelle¹¹. Quoique la plupart des fermes de l'Ontario soient encore des entreprises familiales, celles-ci emploient bon nombre des éléments de l'agriculture intensive à grande échelle pratiquée dans bien d'autres régions du monde industrialisé, notamment les rotations culturales simples (avec peu de cultures fourragères)ⁱ; l'élimination des organismes et des végétaux nuisibles principalement au moyen d'insecticides, de fongicides et d'herbicides; les sols laissés à nu entre les cultures; et le labour fréquent et exhaustif. La gestion par les humains est souvent complétée, voire remplacée par des adjuvants et des équipements « intelligents » à la fine pointe de la technologie.

Aucune quantité
d'adjuvants de synthèse
ne suffira à atténuer les
répercussions d'un
manque d'eau à des
moments clés de la
croissance des cultures.

La hausse récente de l'intérêt des agriculteurs ontariens pour les pratiques de gestion bénéfiques telles que les cultures couvre-sol et les méthodes de labour qui préservent le sol laissent présager que la province pourrait être sur le point d'effectuer le passage vers un modèle d'agriculture qui utilise peu d'adjuvants. Les études de cas présentées aux pages 24-29 tendent à appuyer cette possibilité. Cependant, la région des terres agricoles de l'Ontario où ces meilleures pratiques de gestion sont employées demeure relativement restreinte, et il semble que le modèle intensif qui emploie de grandes quantités d'adjuvants, communément appelé *agriculture conventionnelle* partout dans le monde, demeure la norme dans la province.

Histoire 2 – Mais à quel coût?

Ce très fructueux modèle d'agriculture en constante évolution a toujours inquiété sa part de sceptiques et de détracteurs, particulièrement en ce qui concerne les répercussions sur l'environnement. Au cours des dernières années, le changement climatique a attiré davantage l'attention sur ces enjeux et les a regroupés en trois catégories : les émissions de gaz à effet de serre (GES); l'adaptation et la sécurité alimentaire; ainsi que de nombreuses autres répercussions environnementales.



Le flétrissement des feuilles démontre l'effet de la sécheresse sur le maïs.

Source : Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales.

ⁱ La réduction de la quantité de bétail dans la province au cours des dernières années a fait en sorte d'éliminer presque entièrement les cultures de plantes fourragères dans les rotations culturales.

Émissions de GES

Selon l'inventaire national officiel du Canada¹², l'agriculture en Ontario génère environ 10,0 mégatonnes (Mt) de GES par annéeⁱⁱ, soit environ 5,9 % des émissions totales de la province (voir la figure 1). Près de la moitié de ces émissions (4,3 Mt) proviennent de l'application directe d'engrais sur les sols : les engrais azotés génèrent des émissions d'oxyde nitreux (N_2O) (3,7 Mt d'éq.- CO_2), tandis que le lisier (0,6 Mt d'éq.- CO_2) produit du méthane (CH_4). Parmi les autres 5,7 Mt d'éq.- CO_2 , près des deux tiers (3,6 Mt d'éq.- CO_2) est dû au CH_4 généré par le système digestif des ruminants, par exemple les bovins (ce qu'on appelle la *fermentation entérique*), et la majeure portion de la partie restante (1,9 Mt d'éq.- CO_2) provient du CH_4 qui émane des installations d'entreposage du lisier.

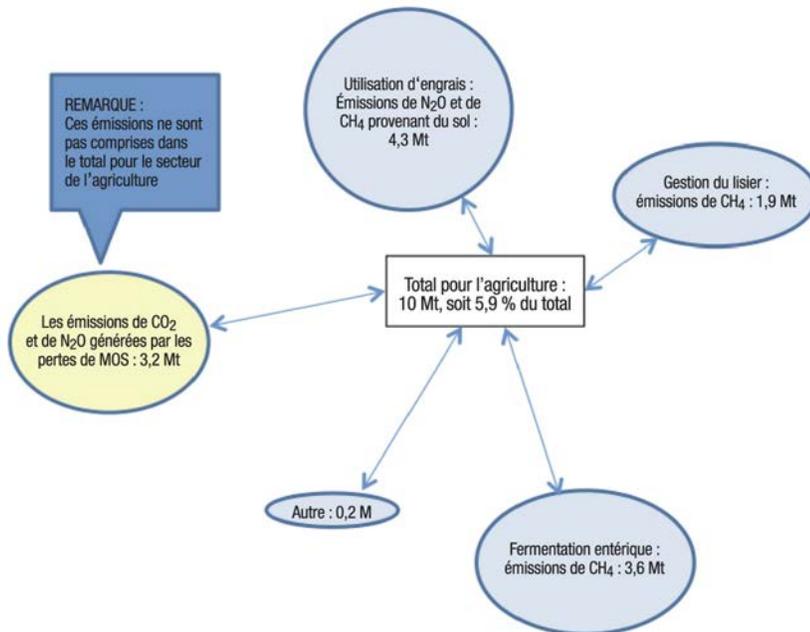


Figure 2 : Contribution du secteur de l'agriculture aux émissions de GES de l'Ontario

Il est nécessaire d'adopter une nouvelle approche qui permettra de résoudre les nombreux problèmes environnementaux décrits ici, tout en conservant la productivité et la rentabilité de l'agriculture moderne.

Un autre 3,2 Mt d'éq.- CO_2 des émissions de gaz à effet de serre provient des pertes de matières organiques du sol (MOS) des terres agricoles. Ces émissions composées de CO_2 (2,7 Mt d'éq.- CO_2) et de N_2O (0,5 Mt d'éq.- CO_2) découlent des pratiques de gestion, entre autres le labour excessif et la jachère d'été (c.-à-d., laisser « reposer » un champ durant une saison de plantation), qui tendent à réduire la teneur en MOS¹³. Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) estime que la teneur en MOS de 82 % des terres agricoles de l'Ontario diminue chaque année, dont près de 50 % perdent au moins 90 kg d'éq.- CO_2 par hectare par année¹⁴.

Fait à souligner, le Rapport d'inventaire national¹⁵ classe ces émissions dans le secteur « aménagement du territoire, changements dans l'utilisation des sols et foresterie » plutôt que dans le secteur de l'agriculture, de sorte qu'elles ne sont pas comprises dans les 10 Mt d'éq.- CO_2 du secteur de l'agriculture. Qui plus est, elles ne sont pas non plus incluses dans les émissions officielles de l'Ontario aux fins d'atteindre les cibles nationales de

ⁱⁱ Les unités utilisées pour calculer les GES sont les équivalents- CO_2 (éq.- CO_2), lesquelles utilisent le CO_2 comme norme.

réduction des émissions; cependant, elles sont comptabilisées dans le Rapport d'inventaire national du Canadaⁱⁱⁱ.

Les réductions de la teneur en carbone des sols présentées dans ces figures peuvent être perçues à la fois comme une importante perte et une excellente occasion; les pages qui suivent traiteront la question plus en détail.

La sécurité alimentaire et la résilience écologique

La « sécurité alimentaire » fait référence à une situation où les gens ont les moyens physiques, sociaux et économiques d'accéder à des aliments nutritifs, sains et en quantités suffisantes¹⁶. La capacité d'une région donnée, par exemple l'Ontario, de produire suffisamment de nourriture pour nourrir sa population dépend de divers facteurs physiques, économiques et sociaux. L'un des facteurs physiques qui revêt une grande importance est la résilience écologique, c'est-à-dire la capacité d'un système (dans le cas présent, les terres agricoles) de résister aux perturbations sans que sa productivité diminue (p. ex., l'effondrement) ou encore de se rétablir dans des délais raisonnables¹⁷.

Dans un climat en changement, la résilience est extrêmement importante. Des systèmes agricoles résilients devraient faire en sorte que l'Ontario soit en mesure de maintenir, voire de surpasser les niveaux actuels de productivité agricole même face à des changements considérables^{18,19}. Non seulement la moyenne des températures en Ontario est-elle appelée à grimper, elle atteindra également des niveaux extrêmes (c.-à-d. plus de 30 °C) plus souvent et plus longtemps. Des pointes de température quotidienne élevées posent un grave danger aux cultures telles que le maïs et les fèves de soja, dont le rendement s'effondre rapidement en fonction du nombre de jours (et d'autant plus, de nuits) où la température s'élève à plus de 30 °C²⁰.

Une autre menace considérable qui pèse sur les rendements agricoles est la possibilité du manque d'humidité en temps opportun. Aucune quantité d'adjuvants de synthèse ne suffira à atténuer les répercussions d'un manque d'eau à des moments clés de la croissance des cultures. On s'attend à ce que le changement climatique provoque encore plus de variations de température, avec des périodes de sécheresse prolongée entrecoupées d'épisodes de précipitations extrêmes, ce qui pourrait avoir un effet dévastateur sur les récoltes^{21, 22}.



Prolifération d'algues dans le lac Sainte-Claire, 28 juillet 2015.

Source : Image satellite du NASA Goddard Space Flight Centre et du U.S. Geological Survey.

Comme il sera question plus en détail ci-dessous, la capacité de l'Ontario à supporter les périodes de sécheresse et de chaleur, entrecoupées de tempêtes extrêmes, dépend dans une très large mesure de la santé de la couche arable de la province. Ainsi, la chute de la teneur en carbone de plus de 80 % du sol des fermes de l'Ontario est dangereusement inquiétante. Les matières organiques contenues dans le sol sont indispensables pour lui permettre d'absorber rapidement l'eau de pluie, de maintenir sa structure lors de précipitations intenses et de résister à l'érosion^{23, 24}. Il n'est donc pas surprenant que les fermes de l'Ontario soient sujettes à un risque accru

ⁱⁱⁱ Voir le chapitre 3 du rapport annuel sur les progrès liés aux gaz à effet de serre de 2016 du CEO, intitulé *Faire face au changement climatique*.

d'érosion (voir la section « Les sols : l'érosion d'un bien » dans le rapport annuel de 2008-2009 du CEO). La sédimentation qui en découle dans les lacs et les rivières est le reflet du problème de la diminution de la qualité de la couche arable, et ces deux problèmes sont liés à la diminution des matières organiques dans le sol des fermes de l'Ontario.

Une autre préoccupation étroitement liée est la possibilité que des inondations détruisent des récoltes. Les sols faibles en matières organiques ne parviennent pas à absorber l'eau de pluie assez vite pour l'empêcher de ruisseler rapidement en surface, ce qui peut provoquer des inondations dans les champs situés à une élévation moindre, surtout avec les épisodes météorologiques extrêmes attendus en raison du changement climatique²⁵.

De plus, à mesure que la température moyenne augmentera et que la saison de croissance se prolongera, de nombreuses nouvelles espèces de mauvaises herbes envahissantes et d'autres résistantes aux herbicides s'adapteront au climat de l'Ontario²⁶. Ensemble, ces facteurs liés au climat posent un risque considérable au secteur de l'agriculture en Ontario et soulèvent certains enjeux liés aux répercussions négatives sur l'économie et la sécurité alimentaire de la province.

Autres répercussions : eau, pesticides, etc.

L'appauvrissement de la qualité de l'eau, principalement dans le lac Érié et dans une moindre mesure dans les eaux de surface en général, est l'enjeu environnemental qui a le plus retenu l'attention ces dernières années. Les proliférations d'algues sont l'indice visuel révélateur de ce problème qu'on appelle l'eutrophisation²⁷. Le phosphore provenant du ruissellement des champs agricoles de l'Ontario et, dans une plus large mesure, de plusieurs États américains du nord est l'une des causes de l'eutrophisation. Dans son rapport annuel de 2012-2013, le CEO aborde le sujet du phosphore (« D'un extrême à l'autre : les problèmes liés au phosphore sur les fermes en Ontario ») et recommande au ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) d'accorder la priorité à la santé du sol plutôt qu'aux solutions après que les dommages aient été faits, par exemple en installant des barrières physiques pour prévenir le ruissellement de phosphore. L'eutrophisation est une menace à la fois à la santé humaine et à la biodiversité.

Parmi les autres menaces, on compte également la perte d'habitat, la pollution des eaux souterraines et de surface par le ruissellement des engrais azotés, de même que les répercussions des pesticides, tels que les néonicotinoïdes (voir la section « Guide d'introduction sur les pesticides systémiques » dans le rapport annuel de 2014-2015 du CEO). La perte de biodiversité est également un enjeu majeur tant en Ontario qu'à l'échelle internationale, alors que de nombreuses espèces, voire des catégories entières de créatures (p. ex., les amphibiens) connaissent un déclin de leur population à divers degrés^{28, 29}. Ces problèmes ne sont pas entièrement attribuables aux pratiques agricoles seules; la façon dont nous produisons la nourriture les touche tous dans une certaine mesure. Qui plus est, le changement climatique pourrait aggraver bon nombre de ces menaces (sinon toutes), surtout la possible augmentation de la fréquence des épisodes météorologiques extrêmes.

Il est temps de changer de cap

Les effets combinés du changement climatique et de l'accroissement des dommages environnementaux sont un défi de taille pour l'agriculture moderne. L'arrivée constante d'innovations en agriculture n'a pas réussi à ce jour à résoudre complètement ces problèmes environnementaux³⁰, ce qui pourrait s'expliquer par le fait que de nombreuses solutions conventionnelles visent les symptômes plutôt que les causes d'un problème environnemental donné. Par exemple, les bandes tampons (des zones de végétation permanente conçues pour capturer les sédiments et ralentir le ruissellement) sont depuis longtemps préconisées comme un moyen de contrôler la pollution par le phosphore générée par les fermes. Cependant, certains experts³¹ sont d'avis qu'il ne s'agit là que de simples solutions de fortune qui n'auront au mieux qu'un effet limité, puisqu'elles ne s'attaquent pas à la racine du problème, qui peut différer d'une ferme à l'autre³². Par conséquent, elles sont vouées à l'échec dans certaines circonstances, par exemple en hiver, lorsque le sol est gelé et que des eaux saturées de phosphore peuvent simplement ruisseler directement au-dessus, en plus de ne pas se pencher sur le problème des pertes de phosphore par les drains souterrains^{33, iv}. De plus, ces solutions pénalisent les agriculteurs en occupant de l'espace de terre arable sans rien leur offrir en retour, de sorte que les terres occupées par ces bandes tampons pourraient être reconverties en terres cultivées par les agriculteurs dans l'éventualité où le contexte économique changerait.

Une poignée de terre du jardin d'une résidence moyenne contient plus d'organismes vivants qu'il y a d'êtres humains sur la planète.

Certaines des méthodes agricoles modernes vont à l'encontre, ou du moins ignorent, les processus naturels sous-jacents aux écosystèmes durables. Souvent, lorsqu'elles sont principalement axées sur l'optimisation des récoltes ou la réduction des coûts liés à la main-d'œuvre, elles ne tiennent pas compte de la durabilité. Parallèlement, si elles visent à aborder des enjeux liés à la durabilité, par exemple l'érosion, elles le font souvent en s'attaquant au symptôme plutôt qu'à la cause, comme l'explique l'exemple ci-dessus. Il est nécessaire d'adopter une nouvelle approche qui permettra de résoudre les nombreux problèmes environnementaux décrits ici, particulièrement ceux liés au changement climatique, tout en conservant la productivité et la rentabilité de l'agriculture moderne³⁴.

^{iv} La quantité de phosphore présente dans les sols des fermes de l'Ontario peut varier considérablement : certains en contiennent des quantités excessives, d'autres ont une teneur qui correspond aux besoins des cultures et d'autres n'en renferment pas suffisamment, de sorte qu'il est nécessaire d'en ajouter. De plus, une partie du phosphore est présente sous forme organique, tandis qu'une autre est soluble. C'est principalement cette dernière qui s'écoule hors des terres agricoles. Les cultures couvre-sol (voir la p. 20) sont un moyen plus efficace de traiter le problème du phosphore, puisqu'elles séquestrent l'excès de phosphore et le conservent pour les cultures à venir, peu importe la situation particulière de la ferme concernée, ce qui est bénéfique tant pour les agriculteurs que pour l'environnement.



Priorité à la santé du sol

Il y a déjà une « nouvelle » voie vers l'avenir : *l'approche axée sur la santé du sol*. L'incapacité à comprendre et respecter les principes fondamentaux de la biologie du sol est l'une des plus grandes failles de l'agriculture moderne^{35,36}. Pallier ce manque offre de nombreux avantages sur les plans des émissions de gaz à effet de serre, de l'adaptation au changement climatique ainsi que pour l'environnement en général³⁷. Le CEO suit l'évolution de cette méthode de gestion agricole avec optimisme depuis maintenant près de dix ans. Le présent chapitre fait état de ses découvertes et explique en quoi la santé du sol est un enjeu si important.

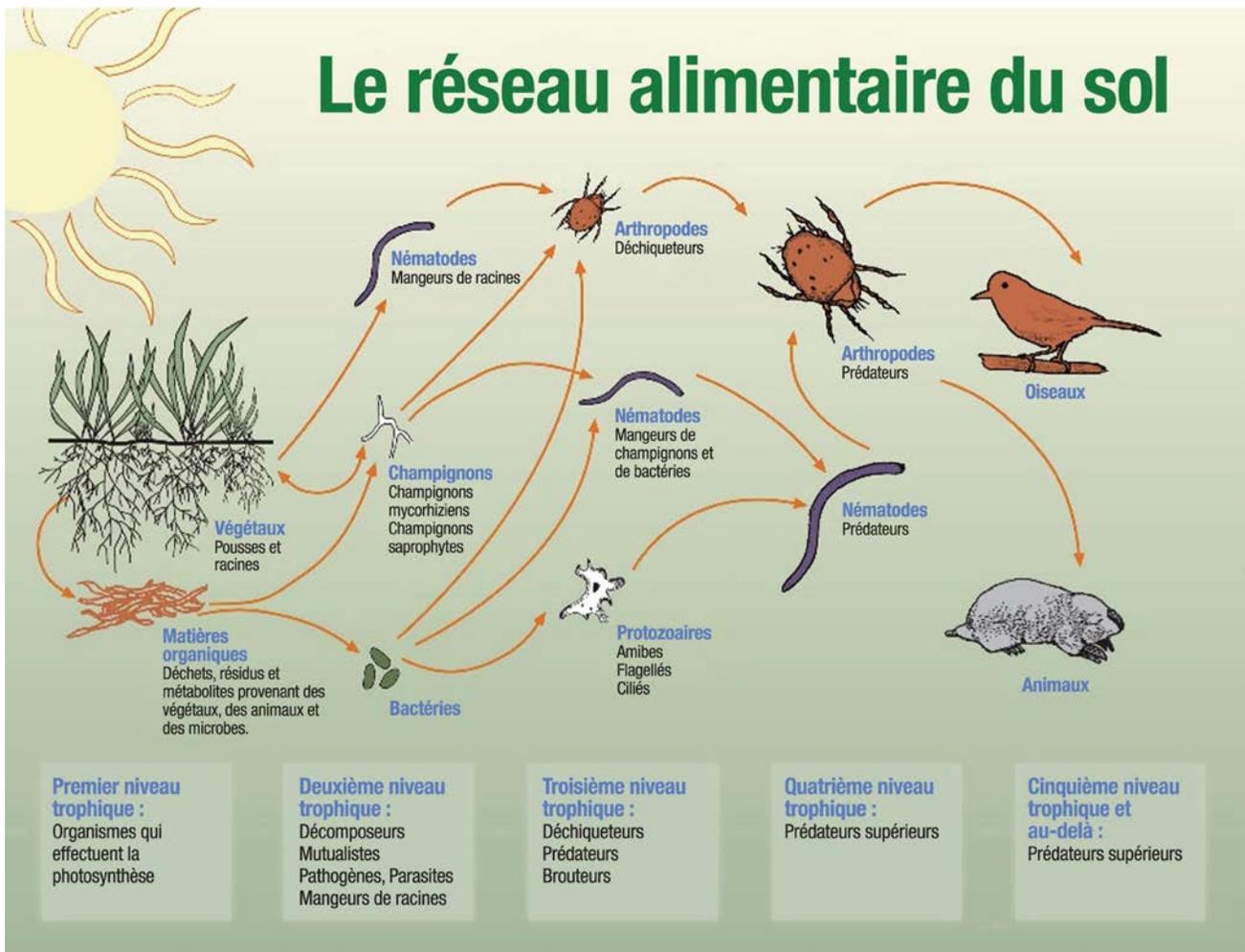


Figure 3 : Le réseau alimentaire du sol.

Source : Soil and Water Conservation Society (SWCS). 2000. *Soil Biology Primer*. Rev. ed. Ankeny, IA: Soil and Water Conservation Society.

Qu'est-ce que la santé du sol?

Un monde complexe et actif sous nos pieds

En premier lieu, examinons le sens du terme « santé du sol ». Habituellement, on ne parle pas de « santé » lorsqu'il est question d'objets inanimés, encore moins d'un mélange complexe de minéraux broyés, de matières organiques, d'eau et d'air. Toutefois, le terme *santé du sol* est un clin d'œil à une réalité méconnue : *le sol est vivant*³⁸. Pas dans le même sens qu'un organisme, mais plutôt en tant qu'écosystème^{39,40}.

La mince couche de terre végétale qui recouvre la majeure partie de la surface de la terre ferme de la planète est constituée d'un ensemble varié d'écosystèmes extrêmement productifs et dynamiques⁴¹. Une poignée de terre du jardin d'une résidence moyenne contient plus d'organismes vivants qu'il y a d'êtres humains sur la planète⁴². Qui plus est, ces organismes sont très actifs. Tel que l'explique un réputé écologiste spécialiste du sol : « L'activité du sol est comparable aux célébrations du Nouvel An à Times Square, mais toute l'année durant »⁴³.

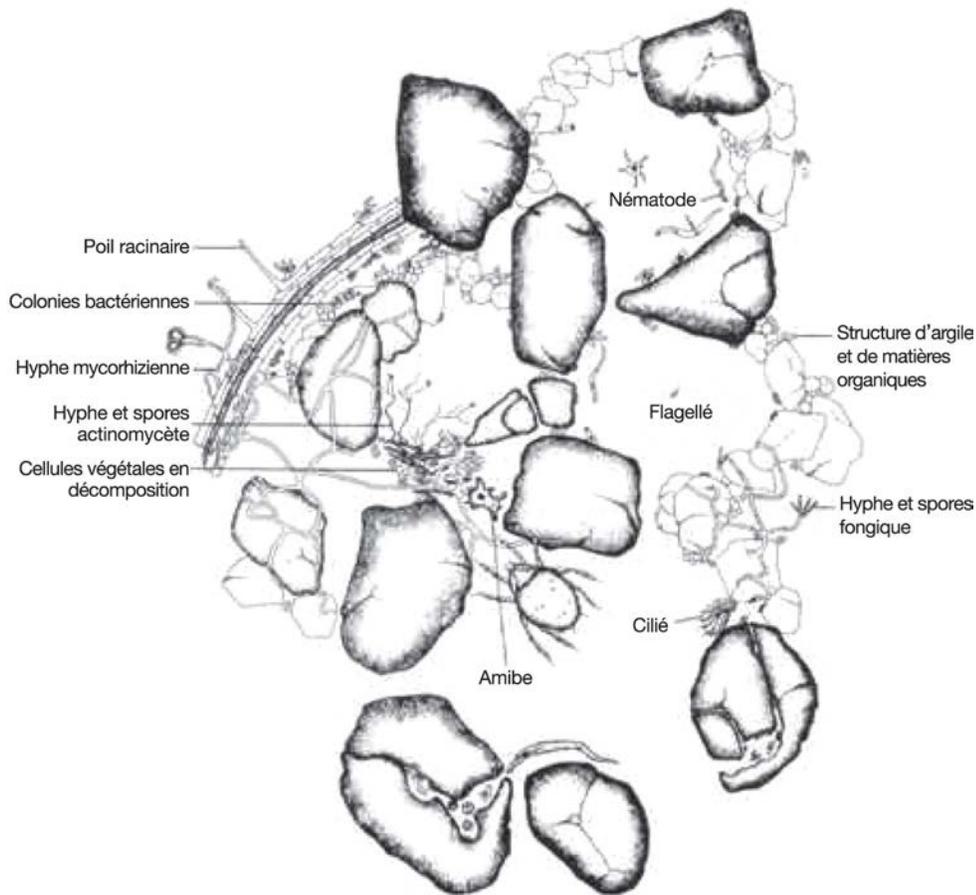


Figure 4 : Organismes du sol dans un agrégat de sol

Source : Ankeny, IA, *Soil Biology Primer*, édition révisée, Soil and Water Conservation Society (SWCS), 2000.

La panoplie de petites créatures qui vivent dans le mélange d'eau et d'air qui s'immisce entre les grains de sable, de vase ou d'argile est le facteur déterminant de la santé du sol. C'est cette société souterraine de microbes, d'arthropodes (p. ex., des insectes, araignées, crustacés), de vers et d'autres organismes que les scientifiques appellent le *réseau alimentaire du sol* (voir la figure 3). Tout comme le réseau alimentaire au-dessus du sol, le réseau alimentaire du sol peut être considéré comme constitué de la multitude des différents types d'organismes qui y vivent et des relations entre ceux-ci. Certains sont des prédateurs, d'autres des proies, et beaucoup jouent les deux rôles à la fois!

Tout au bas de la chaîne alimentaire, on retrouve les bactéries et les champignons, lesquels sont les principaux responsables de la décomposition des matières organiques mortes. Ces organismes microscopiques sont la principale source de nourriture des prédateurs de taille supérieure tels que les nématodes, les protozoaires et les petits arthropodes, lesquels sont des proies pour les nématodes prédateurs et les gros arthropodes. Ces derniers, en compagnie de divers types de vers, occupent l'échelon supérieur de l'écosystème souterrain du sol, mais sont également des proies pour une multitude de créatures qui vivent au-dessus du niveau du sol, comme les oiseaux insectivores et les mammifères fouisseurs. En fait, la relation entre les sols et les écosystèmes à l'extérieur est si étroite que les scientifiques constatent habituellement une corrélation entre les populations et la biodiversité sous le sol et sur le sol^{44,45}.

Les avantages concrets de maintenir la santé des sols

Les humains connaissent l'importance de ce complexe monde souterrain depuis la nuit des temps. Aristote disait que les vers sont les « intestins de la Terre »⁴⁶, en raison de leur capacité à nettoyer le sol (p. ex., en détruisant les organismes pathogènes) et à recycler les résidus organiques en nutriments. Néanmoins, malgré les nombreux bénéfices écologiques du sol (voir la discussion qui suit ci-dessous), dont plusieurs sont liés à la santé humaine⁴⁷, dans l'ensemble, l'agriculture moderne se concentre uniquement sur sa capacité à recycler les nutriments et même ce rôle a été presque entièrement usurpé par les engrais de synthèse. L'importance des fonctions essentielles remplies par le réseau alimentaire souterrain commence à peine à être prise en compte dans le monde de l'agriculture conventionnelle.

Une « fonction » du sol correspond à un service écologique que celui-ci remplit sur une base régulière au profit du reste de l'environnement⁴⁸. Les organismes biologiques accomplissent 90 % de ces fonctions⁴⁹, d'où la si grande importance du réseau alimentaire du sol. Les organismes présents dans le sol assurent sa santé par les moyens suivants :

- ils rendent les nutriments accessibles aux végétaux par différentes façons uniques et efficaces (voir « Le mécanisme d'échange des droits d'émission de carbone à l'origine », p. 17-18);
- ils forment et améliorent les agrégats du sol et sa porosité (et assurent donc une bonne structure), ce qui améliore sa capacité à laisser l'eau s'infiltrer et à la retenir (voir ci-dessous « Les bactéries et champignons, ingénieurs de la structure du sol »);
- ils séquestrent l'azote et d'autres nutriments dans leur corps, diminuant par la même occasion la pollution par la perte de nutriments;

- ils agissent en tant que prédateurs ou concurrents contre les maladies et organismes nuisibles, ce qui améliore la santé des végétaux et accroît le rendement des cultures;
- ils augmentent la quantité de matières organiques dans le sol, une fonction de base qui soutient non seulement toutes les autres fonctions susmentionnées, mais qui réduit également les taux de carbone dans l'atmosphère et atténue du coup le changement climatique⁵⁰.

Les bactéries et champignons, ingénieurs de la structure du sol

Les bactéries et champignons sont de loin les membres les plus nombreux du réseau alimentaire du sol. Pourtant, malgré leur très petite taille et leur position tout au bas du réseau alimentaire, ces microbes sont les ingénieurs du sol qui jouent le rôle le plus important, puisqu'ils sont responsables de sa bonne structure⁵¹.

Le sol est constitué de particules de différentes tailles, des plus petites particules d'argile à peine visibles à l'œil nu (moins de 0,02 mm), aux plus gros grains de sable faciles à distinguer (jusqu'à 2 mm), en passant par des particules de vase de taille moyenne (jusqu'à 0,05 mm). Les sols qui contiennent plus de 50 % de particules d'argiles sont considérés « argileux »; les petites particules s'entassent très étroitement les unes aux autres et laissent très peu d'espaces poreux. En fait, les sols argileux sont souvent si compacts que l'eau ne parvient pas à pénétrer et reste au-dessus, comme sur une surface de béton. À l'extrême opposé, on retrouve les sols sableux, dans lesquels il y a beaucoup d'espace entre les grains (un peu comme des balles de golf dans un bocal). Ces sols sont souvent secs, puisque l'eau s'écoule très facilement au travers. Les meilleurs sols présentent un bon équilibre d'argile (20 %), de vase et de sable (40 % chacun); c'est ce qu'on appelle des sols limoneux⁵².

Cependant, tous les types de sols nécessitent une bonne structure interne pour être en santé. Celle-ci peut varier de faible à excellente, et bien qu'elle soit influencée par le type de sol, sa chimie et l'environnement, sa forme finale résulte en grande partie de l'activité biologique. Les bactéries, les champignons et les vers sécrètent tous des colles organiques qui se collent aux minuscules particules et les font s'accrocher les unes aux autres, ce qui forme de petits agrégats. Une substance en particulier, la *glomaline*⁵³, qui est produite par les champignons mycorhiziens, semble jouer un rôle de premier plan dans ce processus^{54, 55}. Tous les types de champignons peuvent améliorer ce processus en enroulant leur hyphes (filaments) autour des petits agrégats afin de les regrouper pour en former de plus gros^{56, 57}. C'est ce mélange d'agrégats de différentes tailles qui confère au sol une structure optimale. Dans un sol qui contient le bon profil d'agrégats, l'eau s'infiltrerait aisément, ce qui prévient la formation de mares, le ruissellement et les inondations. Elle est également retenue dans les espaces poreux, de sorte qu'elle est ultérieurement accessible aux végétaux⁵⁸. Finalement, et il s'agit peut-être ici du point le plus important, ces agrégats ne se désagrègent pas lorsque le sol devient trempé en raison de la solidité des réseaux de différentes colles et d'hyphes résistants à l'eau. En somme, un sol qui présente une bonne structure empêche les inondations et le ruissellement, résiste aux sécheresses, à l'érosion et offre de l'espace, de la stabilité ainsi que de bonnes réserves d'eau et d'air – bref, le milieu idéal pour les microbes et les racines des végétaux^{59, 60}.

Le tout premier mécanisme d'échange de carbone

Comment les végétaux se nourrissent

Alors que l'Ontario se prépare à lancer son système de plafonnement et d'échange sur le marché du carbone, il pourrait s'avérer instructif de jeter un œil au *premier* marché du carbone qui ait jamais existé, soit celui qui se déroule sous nos pieds depuis l'apparition de la vie végétale sur la Terre.

Tout examen du marché du carbone souterrain devrait commencer par une étude de la façon dont les végétaux puisent les nutriments dont ils ont besoin dans le sol. Les deux premiers concepts à l'étude sont le *débit massique* et la *diffusion*.

Les particules de sol sont généralement enrobées d'une fine pellicule d'eau. À mesure que les racines prélèvent l'eau du sol environnant, elles créent un gradient d'humidité, c.-à-d. que le sol autour des racines s'assèche. L'eau circule vers ce gradient en partant des zones plus humides, d'où elle est attirée vers les zones moins humides autour des racines : c'est ce processus naturel qu'on appelle le *débit massique*. L'eau entraîne ainsi avec elle une grande quantité de nutriments.



Colonie de bactéries à la pointe d'une racine (rhizosphère)

Source : Ankeny, IA, *Soil Biology Primer*, édition révisée, Soil and Water Conservation Society (SWCS), 2000.

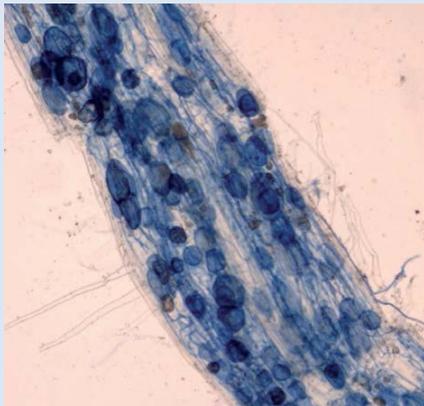
Un processus semblable à ce dernier se produit en même temps pour tous les nutriments en suspension dans l'eau du sol. La diffusion se définit comme la tendance des substances dans une solution à se déplacer des zones de forte concentration aux zones de concentration moindre, ce qui équilibre leur répartition. Puisque les végétaux absorbent régulièrement les nutriments qui se retrouvent dans la zone racinaire (rhizosphère), la concentration de nutriments autour des racines est généralement faible par rapport au reste du sol en général. Par conséquent, la diffusion fait en sorte que les nutriments se déplacent vers les racines, et ce, indépendamment du débit massique (quoi qu'elle y contribue). Ensemble, ces deux processus créent un flot continu de nutriments dissous vers les racines. Dans les faits, les racines « aspirent » du sol environnant les nutriments solubles dans l'eau afin de nourrir la plante⁶¹.

Lorsque ces nutriments parviennent aux racines, ils sont absorbés, de manière largement passive, par diffusion à travers la paroi cellulaire des racines^v.

^v Les végétaux possèdent certains mécanismes spéciaux pour contrôler ce processus, mais de manière générale celui-ci se produit passivement dans la nature. Le mouvement ascendant des nutriments des racines à la partie supérieure de la plante fait en sorte que la concentration de nutriments dans les cellules des racines est plus faible que dans l'eau contenue dans le sol environnant, ce qui entraîne la diffusion.

La description ci-dessus de la manière dont se nourrissent les végétaux était autrefois perçue comme étant tout ce qu'il y a à savoir; cependant, cette perception a changé avec l'arrivée de nouvelles données issues du domaine de l'écologie du sol. Pour comprendre l'apport considérable du réseau alimentaire du sol au fonctionnement du processus décrit ci-dessus, il est préférable de commencer par répondre à quelques questions : d'abord, d'où proviennent les nutriments du sol et comment se régénèrent-ils? Ensuite, des processus relativement lents et passifs tels que la diffusion et le débit massique fournissent-ils suffisamment de

...les végétaux utilisent la photosynthèse afin de fixer le carbone sous une forme organique à partir du CO₂ dans l'atmosphère. Ils échangent ensuite une partie de ce carbone aux microbes, qui leur assure en retour un apport rapide et efficace en nutriments.



Les champignons mycorhizes à vésicules et arbuscules (MVA) sont le type le plus commun dans les systèmes d'agriculture : il en existe environ 240 espèces. Généralement nombreux, ils peuvent représenter de 20 % à 30 % de l'ensemble de la masse microbienne du sol. Ils envahissent les cellules des racines, dans lesquelles ils forment des vésicules, soit des structures d'entreposage. L'image ci-dessus montre les structures mycorrhiziées (vésicules) au sein des cellules des racines.

Source : S.L. Sturmer et M. Brundrett, *Global Soil Biodiversity Atlas*. Commission européenne, Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg, 2016.

nutriments pour assurer la croissance d'une prairie verdoyante ou d'une forêt luxuriante? Les réponses à ces questions sont étroitement liées et se rapportent dans les deux cas aux microbes du sol.

Sources de nutriments

Les nutriments des végétaux (p. ex., le phosphore, le potassium, le calcium, le bore, le manganèse, le zinc, etc.) proviennent principalement de deux sources dans les systèmes naturels : la roche minérale (sous forme d'argile, de vase ou de particules) ou, dans le cas de l'azote, de l'azote atmosphérique et des matières organiques mortes⁶². Les nutriments contenus dans une particule de roche ou dans de la matière organique (p. ex., une racine morte) sont insolubles et ne peuvent ainsi pas pénétrer les cellules des racines par l'entremise de la diffusion⁶³. Au fil du temps, la composition des minéraux est altérée, mais ce processus est extrêmement lent. Fort heureusement, les microbes tels que les bactéries et les champignons ont la capacité de décomposer les matières minérales et organiques assez rapidement et d'absorber différents constituants nutritifs dans leur corps. Lorsque ces petits microbes sont ultérieurement consommés par des prédateurs microbiens de taille supérieure, tels que les protozoaires et les nématodes, certains de ces nutriments sont relâchés sous forme soluble dans les excréments de ces prédateurs. À partir de ce moment, ces nutriments deviennent accessibles aux végétaux, c'est-à-dire qu'ils sont solubles dans l'eau. Le débit massique et la diffusion peuvent désormais les transporter dans la rhizosphère, où ils sont diffusés dans les cellules des racines des végétaux⁶⁴. Dans la nature, la plupart des nutriments végétaux passent par ce cycle et se recyclent de cette manière⁶⁵.

Apport rapide en nutriments

Les microbes ne servent pas uniquement à libérer les nutriments contenus dans les matières minérales et organiques. Ils permettent également aux végétaux d'accéder plus rapidement aux nutriments.

C'est ici que le carbone entre en jeu; les végétaux utilisent la photosynthèse afin de fixer le carbone sous une forme organique à partir du CO₂ dans l'atmosphère. Ils échangent ensuite une partie de ce carbone aux microbes, qui leur assure en retour un apport efficace en nutriments. Deux systèmes de base servent à assurer cette fonction.

L'un des systèmes implique d'extraire des composés riches en carbone, comme des sucres et des acides aminés, à partir des racines des végétaux (exsudat racinaire) dans le sol de la rhizosphère^{66,67,68}. Cette matière organique riche en énergie attire les microbes vers les racines, qui à leur tour, attirent les prédateurs microbiens (p. ex., les nématodes) qui viennent se régaler des microbes. Au cours de ce processus, ils excrètent des nutriments solubles exactement là où les végétaux en ont besoin, soit juste à l'extérieur des parois cellulaires des racines⁶⁹. En moyenne, 17 %⁷⁰ des composés de carbone produits par les végétaux par la photosynthèse servent à cette fin (la proportion peut atteindre jusqu'à 44 %) ⁷¹.

Le deuxième système est un type de symbiose encore plus direct. Un type de champignons appelés « mycorhizes » (nom savant pour « racine de champignon ») creuse dans les racines des végétaux (certains types pénètrent même dans les cellules des racines) pour y créer l'équivalent d'un pipeline à deux sens qui permet d'une part aux substances à base de carbone de la plante de s'écouler vers l'extérieur pour fournir de l'énergie pour la croissance des champignons, et d'autre part à l'eau et aux nutriments de pénétrer dans la plante. Ces filaments mycorhiziens (appelés « hyphes ») élargissent considérablement la zone où la plante puise ses nutriments et lui permettent d'accéder plus rapidement à une plus grande quantité de ces nutriments^{72,73}.

En somme, le premier mécanisme d'échange de carbone est un important processus omniprésent dans le monde souterrain qui profite à tous les êtres qui y prennent part, que ceux-ci vivent dans le sol ou à sa surface. Les plantes fournissent aux microbes une grande partie des composés de carbone qu'elles produisent par la photosynthèse afin que les microbes leur permettent d'accéder plus rapidement aux nutriments et à l'eau.

Échange et séquestration de carbone

Ce système complexe d'échange de carbone souterrain crée un mélange de sol carbonique dont la composition change constamment. Les microbes respirent, tout comme les animaux, et ils rejettent ainsi constamment du carbone dans l'atmosphère sous forme de CO₂. Cependant, si les végétaux stockent plus de carbone que les microbes n'en consomment, alors le taux général de carbone dans le sol augmente⁷⁴. Cette accumulation souterraine de carbone est ce qu'on appelle la *séquestration du carbone dans le sol*^{75,76}, laquelle joue un rôle très important pour atténuer le changement climatique et s'y adapter⁷⁷.

Les systèmes d'échange de carbone et de nutriments sont extrêmement sensibles aux perturbations provoquées par les mauvaises pratiques de gestion du sol des humains. Certaines d'entre elles, comme le labour excessif, accroissent les pertes en carbone en augmentant la quantité d'oxygène disponible, ce qui fait en sorte d'accroître la respiration microbienne et de relâcher davantage de CO₂ dans l'atmosphère, tandis que d'autres, par exemple, laisser le sol nu pour une longue période ou employer des adjuvants de synthèse aveuglément, ralentissent le processus d'échange de carbone entre les microbes et les végétaux, ce qui limite la production de composés par la photosynthèse ainsi que le nombre et la variété de microbes (voir « Du sable dans l'engrenage » à la p. 21).

Approche axée sur la santé du sol – Principes et pratiques

Comme décrit ci-dessus, les nombreux bénéfices offerts par des sols en santé sont facilement accessibles aux agriculteurs, du moment que la taille et la diversité du réseau alimentaire du sol sont préservées. En toute logique, la prochaine question est de déterminer comment gérer au mieux le sol de façon à soutenir et améliorer ses composantes vivantes afin de leur permettre d'atteindre leur plein potentiel. Il se trouve justement qu'au cours des quelques dernières décennies, les chefs de file du domaine de la santé du sol ont élaboré des principes et des pratiques de gestion essentiels⁷⁸.

Principes

Les principes clés pour assurer la santé du sol sont les suivants :

- **Maintenir le sol couvert en tout temps.** Une bonne couverture du sol (cultures, cultures couvre-sol, résidus de cultures) fait en sorte de préserver l'humidité du sol et de maintenir une température modérée. Cette pratique protège l'habitat souterrain des organismes du sol et favorise leur croissance et leurs activités. Les résidus provenant de la surface alimentent le réseau alimentaire du sol en fournissant les matières organiques dont les microbes se nourrissent; quant aux cultures et aux cultures couvre-sol, elles nourrissent les microbes par l'entremise de l'exsudat racinaire (tel que susmentionné).
- **Assurer le plus de diversité possible⁷⁹.** Une grande diversité de végétaux en surface fournit une plus grande variété d'aliments aux microbes bénéfiques qui vivent dans le sol⁸⁰, puisque différentes cultures génèrent différents types d'exsudat racinaire, ce qui attire et soutient du coup une grande diversité d'être souterrains^{81,82}. Les divers végétaux possèdent également différents types de racines de longueurs et de formes variées, ce qui permet d'améliorer la composition du sol à différentes profondeurs. Une grande diversité microbienne accroît la résilience du sol et l'efficacité de ses fonctions⁸³; ainsi, les agriculteurs profitent d'une productivité accrue⁸⁴, d'une meilleure résistance des cultures contre les maladies, d'une moins grande quantité d'organismes nuisibles et d'une plus forte résilience dans l'ensemble⁸⁵ aux répercussions environnementales telles que la sécheresse, les épisodes météorologiques extrêmes et les fluctuations de température.
- **Réduire au minimum les perturbations du sol** (c.-à-d. sans labour ou labour restreint). Le labour perturbe le réseau alimentaire et modifie l'équilibre entre les bactéries et les champignons en brisant l'hyphe des champignons, ce qui ralentit leur croissance et leur reproduction⁸⁶. Les champignons sont essentiels pour maintenir la structure du sol (voir « Les bactéries et champignons, ingénieurs de la structure du sol » à la p. 16) ainsi que pour éliminer les maladies, puisque les champignons bénéfiques peuvent supplanter les champignons pathogènes (ceux qui causent des maladies) et les écraser dans un sol en bonne condition. Le labour expose également les bactéries responsables de la décomposition à davantage d'oxygène, ce qui accélère le processus de décomposition des matières organiques. Du coup, le CO₂ est relâché trop rapidement dans l'atmosphère (c.-à-d., plus rapidement qu'il ne peut être

Les nombreux bénéfices offerts par des sols en santé sont facilement accessibles aux agriculteurs, du moment que la taille et la diversité du réseau alimentaire du sol sont préservées.

remplacé), ce qui réduit la concentration générale de matières organiques dans le sol. La réduction de matières organiques dans le sol fait décliner encore davantage les populations de champignons, ce qui cause des pertes d'agrégats stables dans le sol et entraîne encore davantage de pertes de carbone, en plus de favoriser l'érosion et de rendre le sol compact.

- **Laisser les racines vivantes dans le sol** durant la plus longue période de temps possible au cours de l'année, même en hiver. Les exsudats des racines vivantes nourrissent le réseau alimentaire du sol. En particulier, les champignons mycorhiziens ne peuvent pas survivre sans racines vivantes pour leur servir d'hôtes; ainsi, les champs nus font décliner les populations de champignons mycorhiziens et privent les cultures de l'année suivante de leurs nombreux bénéfiques⁸⁷.
- **Utiliser des adjuvants organiques.** Les matières organiques, comme les résidus de cultures, le lisier et le compost fournissent un habitat et de la nourriture au réseau alimentaire du sol et entraînent moins de répercussions potentiellement nocives que les adjuvants de synthèse (voir « Du sable dans l'engrenage » ci-dessous). Cependant, qu'il soit naturel ou synthétique, n'importe quel nutriment peut s'avérer problématique s'il n'est pas appliqué judicieusement (voir les pratiques exemplaires de gestion ci-dessous).

Du sable dans l'engrenage : l'utilisation inappropriée ou la surutilisation des adjuvants de synthèse peut nuire au système naturel

L'approche axée sur la santé du sol décourage l'utilisation intensive d'engrais synthétiques^{88,89}, car ces produits chimiques peuvent faire plus de mal que de bien lorsqu'ils ne sont pas épandus correctement (voir l'étude de cas Klaas Martens, p. 23-24). Lorsqu'ils ne sont pas utilisés judicieusement, les engrais synthétiques peuvent avoir des répercussions néfastes directes ou indirectes. Parmi les effets directs, on compte les émissions de N₂O, lequel est un puissant gaz à effet de serre⁹⁰ (comme le montre la figure 2); la pollution des eaux souterraines⁹¹; l'épuisement des réserves de carbone du sol par les microbes surstimulés par l'abondance de nutriments accessibles^{92,93}; la réduction de la diversité des organismes du sol^{94,95,96}; ainsi qu'un accroissement de la pression exercée par les mauvaises herbes, qui découle aussi de l'abondance de nutriments accessibles^{97, 98}.

L'un des graves problèmes indirects concerne l'exsudat des racines des végétaux. L'une des principales raisons pour lesquelles les végétaux sécrètent de l'exsudat est pour nourrir les microbes qui vivent dans leur zone racinaire⁹⁹ (voir « Le tout premier mécanisme d'échange de carbone »). Ce processus demande de l'énergie aux végétaux, de sorte que s'ils sont en mesure d'obtenir les nutriments dont ils ont besoin sans devoir attirer ces microbes, ils sécrètent moins d'exsudat¹⁰⁰, ce qui entraîne une réduction considérable de cette importante source de nourriture pour le réseau alimentaire du sol, et, du coup, limite la quantité et la qualité des services que ce dernier peut fournir.

Les pesticides peuvent aussi causer des problèmes, car nombre d'entre eux ont des répercussions négatives sur le réseau alimentaire du sol, principalement parce qu'ils font chuter la diversité^{101,102}. Par exemple, les fongicides nuisent à un grand nombre de champignons bénéfiques et aux organismes nuisibles qu'ils sont censés combattre¹⁰³. Comme les scientifiques reconnaissent de plus en plus le rôle essentiel que les champignons jouent dans la santé du sol, la séquestration du carbone^{104,105,106} et la productivité naturelle^{107,108} (en plus du fait qu'il a été démontré qu'ils éliminent certaines mauvaises herbes tenaces)¹⁰⁹, leur causer des dommages par l'application régulière de fongicides amoindrit ces bénéfiques. L'approche axée sur la santé du sol dépend largement des défenses naturelles du sol et des végétaux pour assurer la survie des cultures et par conséquent, elle recourt aux pesticides (tous types confondus) de façon judicieuse et peu fréquente^{110,111}.

Pratiques exemplaires de gestion

Le thème sous-jacent aux principes susmentionnés est *protéger et améliorer la vie du sol*. L'approche axée sur la santé du sol vise à optimiser les bénéfices offerts par un écosystème souterrain en santé, diversifié et productif. Ces principes fondamentaux de la santé du sol peuvent être mis en œuvre en employant une variété de pratiques exemplaires de gestion de la santé du sol (PEG). La liste qui suit présente un résumé des plus importantes d'entre elles :

- **Travail du sol aux fins de conservation.** Cette méthode regroupe de nombreuses pratiques agricoles qui laissent les résidus des cultures passées dans le champ. Les exemples les plus courants sont l'agriculture sans labour et le labour de certaines bandes de terre uniquement. Le premier exemple consiste à semer des cultures dans des résidus qui n'ont pas été perturbés du tout, et le second consiste à semer les cultures dans d'étroites bandes de terre labourée, entre lesquelles le sol et les résidus n'ont pas été touchés. Ces deux pratiques permettent d'appliquer à divers degrés¹¹² le principe selon lequel il est préférable de réduire au minimum les perturbations du sol afin de soutenir et d'améliorer le réseau alimentaire du sol de différentes façons.
- **Rotations culturales.** Cette pratique consiste à semer différentes cultures dans le même champ en suivant un ordre bien établi (p. ex., maïs-blé-soja). La rotation culturale a démontré qu'elle apporte de nombreux effets bénéfiques, notamment l'augmentation de la production globale¹¹³, la réduction de la quantité d'organismes nuisibles et de la fréquence des maladies¹¹⁴, la lutte aux mauvaises herbes¹¹⁵ et l'amélioration de la santé du sol¹¹⁶. Cette pratique applique le principe qui vise à optimiser la diversité, tout en réduisant au minimum la pression exercée par les maladies qui peuvent se développer lorsque le même type de culture est semé dans un même champ année après année.
- **Cultures couvre-sol.** Produire des cultures à des fins autres que commerciales peut entraîner un certain nombre d'avantages non négligeables, notamment la réduction de l'érosion du sol, l'ajout de matières organiques, la réduction de la perte de nutriments, l'accroissement de la fertilité du sol, la réduction des populations d'organismes nuisibles, la diminution de la compaction du sol et l'amélioration de la santé du sol en général¹¹⁷. Ces types de cultures génèrent ces effets bénéfiques en appliquant trois des principes importants de l'approche axée sur la santé du sol : elles gardent le sol couvert en tout temps, elles optimisent la diversité et elles laissent des racines vivantes dans le sol.
- **Le programme 4R sur l'utilisation des engrais.** Le programme 4R est une méthode durable d'épandage d'engrais de synthèse sur les cultures. Il repose sur 4 principes : bonne source (des nutriments équilibrés accessibles aux végétaux), bonne dose (en fonction de ce que le sol produit en nutriments et des besoins



Équipement adapté pour l'agriculture sans labour par la famille Belan (voir p. 27-28).

Source : Glenn Munroe.

... accorder la priorité à la santé du sol est une pratique judicieuse non seulement sur le plan de l'environnement, mais également sur le plan des affaires.

des cultures), bon moment (en fonction de la relation entre l'absorption des nutriments par les cultures, la production du sol, le risque de perte de nutriments, etc.) et bon endroit (s'assurer que les racines aient accès aux nutriments et qu'il y ait le moins de pertes possible)¹¹⁸. Cette pratique se penche sur les inquiétudes décrites dans la section « Du sable dans l'engrenage » à la p. 21, tout en s'assurant qu'il y a un accès à suffisamment de nutriments sous forme accessible aux cultures afin de produire de bonnes récoltes.

- **Compostage et utilisation du compost.** Lorsqu'il est possible de le faire, il est préférable de composter les adjuvants organiques avant de les épandre sur le sol, puisque le compostage permet de stabiliser les matières telles que le lisier, de diminuer le ruissellement (et du coup, la perte de nutriments et la pollution par les nutriments) et d'accroître le taux de séquestration du carbone dans le sol^{119, 120}.
- **Intégration du bétail.** Selon l'agriculteur et auteur Wendell Berry, l'approche moderne en matière d'élevage, qui dissocie le bétail et les cultures, a fait en sorte de prendre une solution pour la diviser en deux problèmes¹²¹. En réintégrant le bétail de manière appropriée à l'exploitation de cultures agricoles, les agriculteurs peuvent réduire leur utilisation d'engrais de synthèse, accroître la santé du sol et augmenter la quantité de matières organiques, tout en réduisant considérablement l'une des plus importantes sources agricoles de méthane, qui découle de l'entreposage du lisier. Cette pratique applique les principes qui concernent l'utilisation d'adjuvants organiques, en plus de garder le sol couvert et de garder des racines vivantes dans le sol (de plus, le bétail peut paître sur les cultures couvre-sol).
- **Utiliser une approche de gestion des pâturages écologique.** Les agriculteurs qui élèvent du bétail sur des terres vouées au pâturage ont l'occasion d'améliorer la santé du sol et son taux de carbone. La méthode de pâturage employée et la période de temps durant laquelle elle est pratiquée sont deux facteurs importants. Le pâturage par rotation ou « en groupe » est un système qui consiste à faire paître le bétail dans de petites zones pour une courte période, plutôt que de leur donner libre accès à l'ensemble du pâturage en tout temps. La concurrence entre les bêtes qui cherchent de la nourriture fait en sorte qu'elles consomment tous les végétaux qui s'y trouvent sans se limiter à ceux qu'elles préfèrent. Il suffit de les déplacer vers une autre zone pour éviter le surpâturage afin qu'il reste suffisamment de végétaux pour assurer une capacité de photosynthèse suffisante pour que les végétaux puissent se régénérer rapidement après le passage du bétail. De plus, le lisier du bétail est une source de nutriments accessibles qui accroît la fertilité du sol. Cette approche s'apparente à la façon dont les grands herbivores vivaient jadis dans les prairies avant l'intervention humaine : à cette époque, ils restaient en groupe et se déplaçaient à l'approche de prédateurs, ce qui les empêchait à la fois de consommer tous les végétaux et de choisir seulement ceux qu'ils préfèrent. Les systèmes de pâturage par rotation bien gérés ont démontré qu'ils augmentent considérablement le taux de carbone dans le sol, qu'ils réduisent, voire renversent la dégradation du sol, qu'ils optimisent la diversité et qu'ils sont favorables à la santé des sols^{122,123}.

Les agriculteurs qui adoptent et appliquent systématiquement les principes et les pratiques décrits ci-dessus parviennent à réduire progressivement, mais considérablement le recours aux adjuvants, à maintenir et même accroître le rendement des récoltes, à augmenter la capacité de rétention d'eau des sols, à virtuellement éliminer les problèmes environnementaux ainsi qu'à accroître leur rentabilité, et ce, tout à la fois¹²⁴. Comme le démontrent les exemples à venir, accorder la priorité à la santé du sol est une pratique judicieuse non seulement sur le plan de l'environnement, mais également sur le plan des affaires.



Les champions de la santé du sol

Au cours des dernières années, les plus réputés champions nord-américains de la santé du sol agricole aux États-Unis ont pris l'initiative de favoriser et de promouvoir le mouvement avec le soutien du Natural Resources Conservation Service (NRCS – voir la p. 32), lequel collabore aussi avec des agriculteurs novateurs. Faites connaissance avec deux figures de proue américaines en matière de santé du sol : l'une utilise l'approche conventionnelle, tandis que l'autre a adopté l'approche biologique. Leurs histoires respectives inspirantes démontrent la portée de ce qui peut être accompli par les agriculteurs qui accordent la priorité à la santé du sol.

Champions américains de la santé du sol



Un agriculteur qui emploie la méthode sans labour montre la multitude de vers enfouis dans son sol, ce qui est caractéristique d'un sol en santé.

Source : Glenn Munroe.

Brown Ranch, Dakota du Nord

Gabe Brown et sa famille exploitent un ranch de 5 400 acres, dont 2 000 sont consacrés aux cultures, près de Bismarck, dans le Dakota du Nord¹²⁵. M. Brown a commencé à progressivement adopter l'approche axée sur la santé du sol en 1993, lorsqu'il a décidé d'utiliser la méthode sans labour sur ses terres agricoles. À cette époque, le taux moyen de matières organiques (lequel correspond étroitement au taux de carbone) dans ses terres était de moins de 2 %. En 1995, il est passé à l'étape suivante, c'est-à-dire qu'il a diversifié ses rotations culturales. Il avait d'ailleurs déjà remarqué une légère amélioration de la qualité de ses sols, ce qui l'a encouragé à adopter les cultures couvre-sol en 1997. La qualité de ses sols a continué de s'accroître d'année en année, notamment sur les plans du taux de matières organiques et de la capacité de rétention et d'infiltration d'eau. En 2006, il a commencé à faire des

essais avec une multitude d'espèces de cultures couvre-sol (pour accroître encore davantage la diversité) et depuis, il a également intégré ses bêtes de pâturage (bovins, ovins, porcs) à sa gestion des terres cultivées. En à peine plus de deux décennies de gestion axée sur la santé du sol, le taux moyen de matières organiques a

grimpé et varie maintenant entre 5,3 % et 6,1 %; l'un de ses champs a récemment atteint un sommet de 11,1 %^{vi}.

Cependant, ces pratiques de gestion ont eu bien d'autres bénéfices que la seule augmentation du taux de séquestration du carbone. Brown affirme qu'elles ont manifestement accru l'ampleur et la diversité du réseau alimentaire du sol de ses terres, avec tous les avantages qui y sont liés. Ses terres sont maintenant en mesure d'absorber plus de huit pouces de précipitations par heure, soit une capacité d'absorption rarissime

dans sa région. Par conséquent, tandis que les terres de son voisin sont inondées après de fortes précipitations, pas même une flaque ne se forme sur les siennes et, peu importe la période de l'année, le ruissellement est un phénomène étranger sur ses terres. En fait, M. Brown explique que la capacité de rétention d'eau de ses terres se situe maintenant à environ 20 pouces, c'est-à-dire 5 pouces de plus que les précipitations annuelles moyennes dans la région de Bismarck. Ces faits indiquent que ses sols sont en mesure de capter et de retenir toutes les précipitations qui s'abattent sur la région au cours de l'année, de sorte que ses cultures sont protégées contre la sécheresse et que les récoltes sont meilleures.

Pour ce qui est du rendement de ses récoltes, M. Brown a calculé que son système axé sur la santé du sol peut produire plus de calories par acre que tout autre système agricole qu'il ait connu, et ce, à coût moindre. Ses récoltes sont environ 25 % plus abondantes que la moyenne du comté, et pourtant, il n'utilise ni engrais, ni insecticides, ni fongicides; en 2015, il a affirmé qu'il applique un herbicide seulement une fois tous les deux ou trois ans sur certains de ses champs et qu'il vise à ne plus avoir à y recourir à l'avenir. Ses coûts par acre sont bien inférieurs à la moyenne et il n'hésite pas à affirmer que son exploitation est probablement la plus rentable de sa région.

Klaas et Mary-Howell Martens, agriculteurs biologiques dans l'État de New York

La plupart des agriculteurs conventionnels seraient plus que satisfaits d'obtenir un rendement de 200 boisseaux de maïs par acre¹²⁶, soit un chiffre beaucoup plus élevé que la moyenne de 143 dans l'État de New York en 2015¹²⁷. Fait intéressant, les Martens obtiennent ce rendement élevé en pratiquant l'agriculture biologique, sans avoir recours à quelconque engrais ou pesticide de synthèse. Généralement, les agricultures qui utilisent une approche biologique ont de la difficulté à égaler le rendement moyen de leur région, sans même imaginer pouvoir le surpasser de 40 %. Comment les Martens parviennent-ils à accomplir cet exploit? La réponse à cette question repose sur l'approche axée sur la santé du sol¹²⁸.

Les Martens, qui exploitent des terres agricoles dans le nord de l'État de New York, adhèrent non seulement aux principes du biologique, mais également au concept de la santé du sol ainsi qu'aux pratiques sous-jacentes. Ils élargissent la définition habituelle de la santé du sol en ajoutant qu'il est tout aussi important de créer un environnement dans le sol qui est propice à la croissance des cultures. À leur avis, le rendement moindre auquel

^{vi} Le climat du Dakota du Nord est très différent de celui de l'Ontario; les précipitations sont moindres et les sols plus secs. Bien que ces conditions soient considérées comme plus favorables à l'accumulation de matières organiques dans le sol, les agriculteurs de l'Ontario obtiendront des résultats positifs semblables à ceux du Dakota du Nord, sinon à la même échelle.

M. Brown a calculé que son système axé sur la santé du sol peut produire plus de calories par acre que tout autre système agricole qu'il ait connu, et ce, à coût moindre.

se sont résignés bien des agriculteurs qui emploient l'approche biologique (par rapport à l'approche conventionnelle) est le résultat de leurs pratiques agricoles, qui sont essentiellement les mêmes que celles de l'agriculture conventionnelle, à l'exception que les adjuvants sont biologiques. L'approche adoptée par les Martens est différente, en ce sens qu'ils s'efforcent de créer l'environnement le plus propice à chaque culture en reproduisant les cycles de succession naturels. Par conséquent, ils planifient le type de gestion du sol (degré de recours au labour, cultures couvre-sol, etc.) et le calendrier de rotations culturales de façon à s'assurer que chaque culture est semée dans un sol qui lui est parfaitement adapté.

Les Martens ont collaboré étroitement avec des chercheurs de la Cornell University afin d'approfondir leurs connaissances sur la santé du sol et les pratiques qui y sont favorables. Ce faisant, ils ont découvert qu'un surplus d'engrais, même lorsqu'il s'agit de lisier biologique, est en fait un gaspillage d'argent et pose même un risque environnemental, en plus d'attirer les mauvaises herbes qui prospèrent dans les sols riches en nutriments facilement accessibles. Par la même occasion, ils ont aussi appris que l'azote n'est pour ainsi dire jamais un facteur qui nuit à la santé du sol lorsque des légumineuses fixatrices d'azote sont utilisées comme cultures couvre-sol ou sont intégrées aux rotations culturales. Par conséquent, en appliquant un volume modeste de lisier (1,5 tonne par acre) au bon moment (sur une culture en croissance au cours de la saison précédente), ils sont en mesure de réduire la pression exercée par les mauvaises herbes, de réduire leurs coûts, d'éliminer les répercussions environnementales et d'obtenir un bon rendement.

Les Martens en ont beaucoup appris sur la santé du sol et ces connaissances leur permettent d'obtenir un rendement supérieur à celui des méthodes conventionnelles sans avoir recours aux adjuvants de synthèse. Ils affirment que leurs sols sont tellement en santé que les maladies qui affligent les terres voisines n'arrivent pas à s'implanter sur les leurs, voire encore mieux, qu'elles s'attaquent parfois seulement aux mauvaises herbes. Klaas Martens est d'avis que cet avantage supplémentaire n'est pas seulement dû à l'optimisation de la santé de leurs terres, mais aussi à son approche qui adapte chaque champ à un type de culture en particulier. Ainsi, leurs cultures sont mieux armées que les mauvaises herbes pour résister aux organismes nuisibles et aux maladies.

Champions ontariens de la santé du sol

Ici en Ontario, un groupe restreint, mais croissant, d'agriculteurs accordent davantage d'importance à la santé du sol et récoltent les bénéfices associés à un rendement accru, à la diminution des coûts et à la réduction des répercussions environnementales. Dans un rapport antérieur^{vii}, le CEO a brossé le portrait de trois de ces entrepreneurs novateurs qui promeuvent la santé du sol et lui fait grand plaisir d'en présenter deux autres : la ferme de la famille Belan, située au nord de Chatham, ainsi que la ferme de la famille Rogers, à Lambton Shores.



Mike Belan montre l'excellente structure de son sol en santé.

Source : Glenn Munroe.

^{vii} Voir la section « Les sols en santé procurent des avantages aux fermiers de l'Ontario » à la page 70 du rapport annuel du CEO de 2013-2014, *Gérer de nouvelles difficultés*.

La ferme de la famille Belan, près d'Inwood, en Ontario.

Comme l'explique Mike Belan, sa famille a été poussée à s'intéresser à la santé du sol en raison de contraintes financières. Les taux d'intérêt élevés des années 1980 les avaient forcés à vendre une partie de leurs terres et de leur équipement pour rembourser des dettes bancaires, ce qui les a menés à repenser leur façon de pratiquer l'agriculture. Le père de Mike, encore jeune homme à l'époque, était en train de reprendre les rênes de la ferme des mains de son propre père. Il est parvenu à la conclusion qu'il n'avait pas envie de travailler de si longues heures seulement pour payer des intérêts à la banque. Ainsi, lorsqu'un manufacturier d'équipement a présenté un semoir à semis direct de 30 pieds à la communauté agricole de l'Ontario en 1991, la famille a décidé de tenter le coup. L'année suivante, elle a complètement converti la ferme à l'agriculture sans labour et vendu tout l'équipement de labour et les tracteurs inutiles. C'est ainsi que, comme le disent les Belan, « l'aventure de l'agriculture sans labour a commencé ».

...« les coûts de production moindres conjugués à l'absence de labour font en sorte qu'il n'est pas obligatoire de produire des récoltes record chaque année »...

Ils ont dû affronter certaines difficultés, par exemple ce que la communauté agricole appelle le « rendement à la traîne » (la diminution du rendement qui survient lors des premières années de transition vers l'agriculture sans labour). Néanmoins, les Belan n'ont pas laissé tomber et Mike leur est très reconnaissant de cette persévérance, puisque leur rendement est aujourd'hui supérieur à la moyenne régionale et leurs coûts sont beaucoup moins élevés qu'ils ne le seraient s'ils pratiquaient encore le labour. La famille a également remarqué que leurs terres sont beaucoup plus résistantes aux événements météorologiques extrêmes, qu'elles ne souffrent plus de la sécheresse et qu'elles peuvent absorber beaucoup plus de précipitations que celles de leurs voisins.



Les Belan qui sèment du maïs sur une couverture verdoyante.

Source : Mike Belan.

Après avoir pratiqué l'agriculture sans labour pendant plus de 20 ans, les Belan ont fait l'expérience des cultures couvre-sol pour la première fois en 2013, lorsqu'ils ont laissé du blé spontané pousser dans les champs après la récolte du blé (alors qu'ils avaient l'habitude de pulvériser les champs à la fin de l'automne afin d'avoir le champ libre au printemps). Les résultats au printemps leur ont plu, alors en 2014 ils ont décidé de semer un mélange de quatre cultures couvre-sol après la récolte de blé en août. Ces cultures sont demeurées verdoyantes tout au long de l'hiver et ils ont semé le maïs directement par-dessus au printemps 2015. Depuis lors, ils ont commencé à pratiquer l'ensemencement d'une seconde culture avec le maïs (afin que la culture couvre-sol ait une longueur d'avance après la récolte du maïs) en plus de semer une culture couvre-sol de végétaux verts au printemps. Mike affirme que malgré les excellents résultats obtenus des cultures couvre-sol jusqu'à présent, cette approche demande une gestion rigoureuse au printemps, de sorte que cette période de l'année est très stressante.

Aujourd'hui, les Belan sèment différents types de cultures couvre-sol sur toutes leurs terres, y compris celles qu'ils possèdent et celles qu'ils louent; ils ont récemment semé un mélange de 14 cultures couvre-sol sur un lot d'essai. L'un des principaux avantages qu'ils ont remarqué de ce mélange au printemps est son effet sur l'état

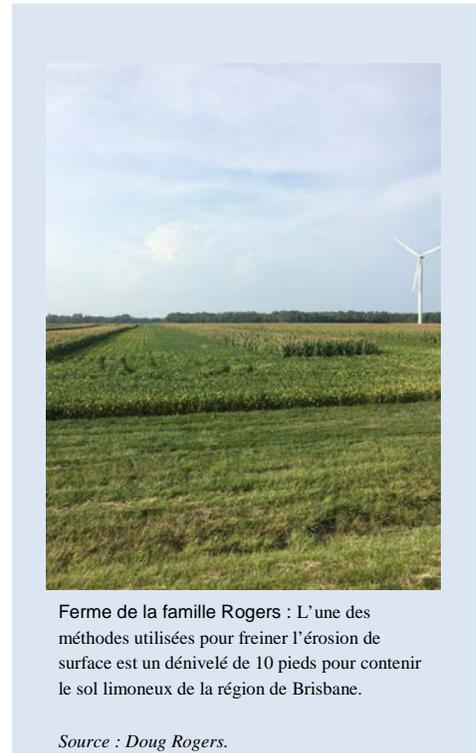
du sol; les deux premiers pouces de la couche supérieure sont plus moelleux et améliorent le contact entre le sol et les semences. Il y a environ 4 ans, ils ont également adopté la méthode d'échantillonnage par grille. Ils effectuent de plus des analyses de base du sol afin de vérifier la quantité de macro et de micro nutriments accessibles ainsi que le taux de matières organiques, ce qui leur permet d'ajuster en conséquence l'épandage d'engrais en fonction de chacun des champs de la ferme.

Mike Belan dit être très satisfait de la situation actuelle de sa ferme, puisque les coûts de production moindres conjugués à l'absence de labour font en sorte qu'il n'est pas obligatoire de produire des récoltes record chaque année et que la famille est heureuse de voir son rendement suivre une tendance constamment à la hausse. Le taux de matières organiques dans leurs sols est passé d'environ 2 % à l'époque où ils ont commencé l'agriculture sans labour, il y a 25 ans, pour grimper à environ 5 % (4 % élevés à 5 % bas) en 2016.

La ferme de la famille Rogers, à Lambton Shores, en Ontario

Doug Rogers et sa famille cultivent le soja, le maïs et le blé sur 700 acres de terres (certaines leur appartiennent, d'autres sont louées) à moins de deux kilomètres du lac Huron. En 1990, l'agriculteur a adopté une combinaison de travail du sol sur billon et sans labour, mais depuis les 16 dernières années il pratique exclusivement l'agriculture sans labour. Il utilise un système de « contrôle de la circulation » dans ses champs afin d'éviter de compacter le sol, ce qui signifie qu'il sème dans les mêmes rangées tous les ans. Il a semé sa première culture couvre-sol en 2010; après le blé d'hiver, il a semé de l'avoine et du radis daikon. Depuis, sa culture couvre-sol est passée à un mélange de 8 à 10 espèces. Au cours des deux dernières années, il a également ensemencé plusieurs cultures couvre-sol secondaires avec le maïs ainsi qu'une culture de seigle annuel avec ses cultures de soja. À partir de 2016, il a commencé à épandre le compost récolté par les municipalités dans les bacs des citoyens sur ses champs après la récolte du blé d'hiver et avant de semer les cultures couvre-sol. Il vise à accroître le taux de matières organiques dans ses sols très limoneux le plus rapidement possible.

M. Rogers avait d'abord introduit les cultures couvre-sol dans le but d'améliorer la santé du sol, d'accumuler les matières organiques et d'accroître la résistance à la sécheresse de ses sols plus légers en renforçant leur capacité de rétention d'eau. Il constate aujourd'hui des avantages supplémentaires, par exemple l'élimination des mauvaises herbes et une augmentation de la vie biologique dans ses sols. Il espère pouvoir diminuer son utilisation des engrais de synthèse au cours des années à venir. En 2013, M. Rogers a commencé à chercher à savoir si ses efforts lui permettent de conserver davantage de terre végétale et de phosphore. Il s'est tourné vers la St. Clair Conservation Authority pour demander si l'organisme accepterait de mettre sur pied un petit projet visant à vérifier la qualité de l'eau en testant la quantité d'eau qui s'écoule des sorties des drains de différents champs lors de précipitations afin de comparer les résultats. Sa demande a été acceptée, et les résultats préliminaires de 2014 et 2015 montrent que par rapport aux champs avoisinants cultivés au moyen de



la méthode conventionnelle, l'eau qui s'écoule des sorties de drains des terres de M. Rogers contient : moins de la moitié du niveau de matières dissoutes totales (MDT); une fraction (<10 %) du total des solides en suspension (TSS) en 2014 et la moitié moins en 2015; 29 % (2014) et 46 % (2015) de la quantité d'azote; et 36 % (2014) et 67 % (2015) du phosphore¹²⁹.

« Nous nous efforçons de garder des cultures vivantes dans nos champs toute l'année durant. »

Il est vraisemblable que ces bons résultats deviendront encore meilleurs au fil du temps, puisque M. Rogers a recours aux cultures couvre-sol multiples depuis quelques années seulement et qu'il n'a pas encore commencé à diminuer son utilisation d'engrais. L'agriculteur a récemment publié un article dans l'infolettre *St. Clair Region Soil and Crop*, dans lequel il affirme qu'il s'est efforcé de garder des cultures vivantes dans ses champs toute l'année durant. Les résidus qu'elles génèrent sont une source de nourriture pour le

réseau biologique sous nos pieds. Les micro-organismes du sol contribuent à améliorer la structure du sol et à former des agrégats de meilleure qualité. Par conséquent, le sol parvient à mieux absorber l'eau avant que celle-ci ne ruisselle en dehors des champs¹³⁰.

Comme les Belan, M. Rogers déclare que ses récoltes atteignent, voire surpassent les moyennes de son canton et il n'a pas ressenti d'effet de traîne à long terme. Surtout, son rendement net est plus élevé que celui de ses voisins en raison de ses besoins moins coûteux en adjuvants et en équipement. Le CEO a constaté la même situation financière avantageuse chez tous les agriculteurs qui ont adopté la méthode axée sur la santé du sol dont il a établi le profil au cours des quelques dernières années; il semblerait que lorsqu'il est question de santé du sol, il y a réellement une synergie entre l'environnement et l'aspect économique, plutôt qu'un conflit¹³¹.



Concrétiser les avantages prometteurs d'un sol en santé

Un mandat pour la recherche

Ces champions de la santé du sol sont une preuve convaincante, quoiqu'anecdotique, que l'adoption de systèmes axés sur la santé du sol par les agriculteurs pourrait avoir une incidence considérable sur l'empreinte environnementale de l'agriculture tout en respectant les exigences du marché, soit un rendement élevé et des coûts moindres. À présent, il est nécessaire de mener des recherches plus pointues sur les mécanismes particuliers qui sont à l'œuvre dans les sols en santé, ainsi que d'avoir une discussion respectueuse avec les agriculteurs sur les moyens d'appliquer ces principes et ces pratiques.

La biologie du sol est un sujet complexe et difficile à étudier.

Cependant, des progrès récents en technologies moléculaires et en séquençage d'ADN permettent aux chercheurs d'obtenir une vision plus globale et détaillée de l'univers du sol et de ses organismes¹³². Ce type de recherche n'en est qu'à ses balbutiements, mais il produit déjà des résultats fascinants¹³³. Par exemple, des chercheurs ont découvert qu'un mélange de 17 espèces de microbes, plutôt qu'une seule, est nécessaire pour éliminer de façon fiable et constante une maladie qui affecte les racines de la betterave à sucre et entraîne de graves conséquences sur le plan commercial¹³⁴. Ce type de renseignement permet aux fournisseurs de trouver une solution biologique sur laquelle ils peuvent compter pour combattre certains organismes nuisibles et maladies en particulier¹³⁵. En fait, de grandes sociétés multinationales telles que Monsanto ont déjà mis sur pied des branches de recherche axées sur les solutions biologiques pour créer ce type de produits^{136,137}.



Nématodes bénéfiques : Ces créatures augmentent la fertilité du sol en mangeant des bactéries et champignons, puis en relâchant des nutriments.

Source : Ankeny, IA, *Soil Biology Primer*, édition révisée, Soil and Water Conservation Society (SWCS), 2000.

Même s'il est inévitable que les fournisseurs commerciaux jouent un rôle important au sein du mouvement axé sur la santé du sol, les fondements de la santé du sol ne devraient pas être entièrement assujettis à des motifs de profitabilité. Le CEO est d'avis que le MAAARO devrait jouer un rôle plus important afin de déterminer, appuyer et diffuser les recherches sur la santé du sol dont les agriculteurs de l'Ontario ont besoin pour prendre de décisions sur le plan de la gestion.

Que font les autres régions?

Les États-Unis et la France sont deux autres grands acteurs dans le domaine de la santé du sol.

États-Unis

Le Natural Resources Conservation Services (NRCS), une branche du United States Department of Agriculture (USDA), possède une longue et éminente histoire. Au début des années 1930, la sécheresse persistante, les mauvaises récoltes et l'amincissement de la couverture du sol dans les grandes plaines de l'Amérique du Nord ont provoqué le Bassin de poussière, soit une série de tempêtes qui ont traversé l'Amérique en soufflant des résidus de terre végétale en poussière, pour finalement passer par-dessus le district fédéral de Columbia et se disperser dans l'océan Atlantique. En réponse à cette crise, l'administration Roosevelt a adopté la loi *Soil Conservation Act*, laquelle a entre autres choses mené à la création du Soil Conservation Service, dont le mandat consistait à promouvoir la conservation du sol au moyen d'une variété sans cesse croissante de programmes et des mesures incitatives au cours des huit dernières décennies¹³⁸. Le nom de l'agence a été changé en 1994, et elle est devenue le NRCS.

Récemment, le NRCS est devenu l'une des figures de proue du mouvement axé sur la santé du sol et il a influencé de nombreux autres organismes et secteurs, y compris l'Ontario. En 2012, le NRCS a lancé une campagne sur la santé du sol qui comprenait des activités de formation sur la santé du sol pour des milliers de ses propres agents sur le terrain ainsi qu'à des milliers d'agriculteurs et de propriétaires de ranch. Puis, en 2014, le NRCS a formé une équipe d'experts en formation sur la santé du sol qui a tenu plus de 200 événements de formation et de sensibilisation sur la santé du sol partout aux États-Unis en l'espace de quelques mois. Il a également créé une série de webinaires et de vidéos sur YouTube pour promouvoir les concepts de base de la santé du sol. Plus récemment (au début de 2016), l'USDA a annoncé une augmentation de 70 millions de dollars du financement au NRCS¹³⁹ afin de transmettre encore davantage de stratégies de gestion de la santé des sols et des nutriments aux agriculteurs

Pour que la capacité mondiale de production alimentaire soit en mesure de nourrir 9,5 milliards de personnes en 2050 dans un contexte où le changement climatique sera bien réel, il sera particulièrement important de garder les sols en vie.

– Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt de la France



Bandes intercalées de maïs et de soja sur une ferme sans labour en Ontario.

Le système agricole de Dean Glenney qui consiste à cultiver sous forme de rangs clôturés (fencerow farming) en combinant la méthode sans labour, les rotations culturales et l'agriculture de précision pour produire des récoltes au rendement très élevé a été présenté dans le rapport annuel du CEO de 2013-2014, *Gérer de nouvelles difficultés*.

Source : Glenn Munroe.

américains. Ce financement accru découle directement des grandes réussites de l'agence dans ses collaborations sur le terrain avec les agriculteurs, dont font partie les deux agriculteurs américains présentés à la section précédente.

Le site Web du NRCS^{viii} contient une foule de renseignements sur tout ce qui a trait à la santé du sol, en partant des bases de la biologie du sol jusqu'aux moindres détails sur les moyens d'appliquer les pratiques exemplaires de gestion.

France

Le ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt de la France est récemment devenu un ardent promoteur de la santé du sol, particulièrement en ce qui a trait à l'augmentation du taux de matières organiques dans le sol; il a en effet déclaré que pour que la capacité mondiale de production alimentaire soit en mesure de nourrir 9,5 milliards de personnes en 2050 dans un contexte où le changement climatique sera bien réel, il sera particulièrement important de garder les sols en vie¹⁴⁰. L'*initiative 4 pour 1000* est un plan d'action sur base volontaire parrainé et promu par le gouvernement de la France¹⁴¹. Son objectif est de faire en sorte que les autres gouvernements, organismes internationaux, institutions de recherche et universités, organismes agricoles, la société civile ainsi que le secteur privé s'engagent à promouvoir les pratiques qui augmentent le taux de carbone dans le sol¹⁴².

Le nom de l'initiative vient du fait que les scientifiques ont calculé qu'une croissance annuelle de 0,4 % des réserves de carbone dans le sol ferait en sorte qu'il soit possible de freiner l'augmentation actuelle de CO₂ dans l'atmosphère^{143,144}. L'initiative ne croit pas nécessairement qu'il soit possible d'atteindre cet objectif; elle vise plutôt à montrer que même une légère augmentation du taux de carbone dans le sol pourrait avoir un effet considérable. Les parties prenantes qui s'embarquent dans l'initiative doivent s'engager à créer ensemble un plan d'action volontaire aux fins suivantes : mettre en œuvre les pratiques exemplaires de gestion qui permettent de séquestrer le carbone sur le plus de sites agricoles possible; s'efforcer de préserver les sols riches en carbone¹⁴⁵; et financer un programme international de recherche axé sur la santé du sol et la séquestration du carbone dans les sols¹⁴⁶. En date d'août 2016, 33 pays ou régions avaient signé l'initiative. Le Canada et l'Ontario ne sont pas du nombre des signataires, ni aucun des organismes agricoles de l'Ontario¹⁴⁷.



Mycélium fongique qui entoure une feuille.

Source : Y. Kries, *Global Soil Biodiversity Atlas*, Commission européenne, Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg, 2016.

^{viii} Voir : <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/>

Le potentiel de la santé du sol en Ontario à atténuer le changement climatique et à s'y adapter

Adaptation

Si l'on tient compte de la théorie et des pratiques qui entourent la santé du sol ainsi que du nombre croissant d'exemples de réussite, il devient évident que cette approche offre des avantages considérables à l'Ontario en ce qui a trait à sa capacité de s'adapter au changement climatique. Nous savons que ce dernier produira davantage d'épisodes météorologiques extrêmes dans la province, lesquels seront accompagnés de précipitations plus intenses. La capacité des sols à absorber et retenir de plus grandes quantités d'eau de pluie est un aspect crucial pour se préparer à affronter bon nombre de risques liés au climat, notamment une augmentation des inondations, de l'érosion du sol, de la pollution de l'eau et des sécheresses. De plus, les sols couverts sont moins vulnérables aux dommages causés par les températures extrêmes et les phénomènes météorologiques¹⁴⁸. Si la majorité des fermes de l'Ontario étaient gérées selon l'approche axée sur la santé du sol employée par les figures de proue dans le domaine, nous pourrions tous respirer un peu plus aisément et moins nous inquiéter de la qualité de l'eau et de la sécurité alimentaire.

Le CEO est encouragé par la récente annonce d'un nouveau laboratoire de surveillance du sol à la ferme expérimentale Elora.

L'un des obstacles qui se dresse toujours sur le chemin est le manque d'études scientifiques revues par les pairs qui fourniraient des preuves crédibles et documentées des avantages concrets générés par la santé du sol. Quelques recherches ont été menées en Ontario^{149,150}, mais il faut en faire davantage. Le CEO est encouragé par la récente annonce d'un nouveau laboratoire de surveillance du sol à la ferme expérimentale Elora. Le laboratoire effectuera une comparaison entre deux systèmes de cultures : la rotation conventionnelle du maïs et du soja, et un autre système appelé la « rotation pérenniale améliorée », dans laquelle le blé d'hiver est utilisé conjointement à des cultures couvre-sol et des cultures secondaires afin de garder le sol couvert par de la verdure pour la plus grande partie de l'année possible^{ix, 151}.

Atténuation

Le CEO a déjà écrit au sujet de la possibilité que les sols puissent séquestrer suffisamment de carbone pour avoir une incidence considérable sur les émissions de GES^x. En 2011, le CEO s'est fondé sur sa propre analyse pour conclure qu'une combinaison des pratiques de gestion recommandées, comme les cultures couvre-sol, le travail du sol aux fins de conservation et les rotations culturales pourraient générer près de 10 % des réductions de GES nécessaires pour atteindre la cible de l'Ontario pour 2020, soit l'équivalent de 2,9 Mt d'éq.-CO₂ par année. Ce chiffre présume que les pratiques seront adoptées sur 40 % des terres agricoles de la province et

^{ix} La ferme expérimentale Elora est l'un des cinq sites de recherche en Ontario. Certains travaux de recherche importants ont déjà été menés sur ces sites à propos des avantages de différentes pratiques exemplaires de gestion. Le CEO croit que le nouveau programme est un pas dans la bonne direction puisqu'il se penche sur les systèmes agricoles, plutôt que sur les pratiques exemplaires individuelles.

^x Voir en particulier la section 4.3 du rapport annuel sur les progrès liés aux gaz à effet de serre de 2011, intitulée « Occasions liées au carbone organique dans le sol » ainsi que la section 6.2 du rapport annuel du CEO de 2010-2011, intitulée « Les racines de la durabilité : Lancer les solutions sur le carbone organique dans le sol ».

prévoit un taux de séquestration de 2 tonnes d'éq.-CO₂ par hectare par année. La cible de 2 tonnes par hectare est considérée comme ambitieuse par certains scientifiques spécialisés dans le sol : toutefois, des chiffres similaires (voire plus élevés) ont été rapportés par de nombreuses sources crédibles et la science sur le sujet connaît une évolution rapide^{xi}, 15².

Il existe toutefois de nombreux facteurs qui font qu'il est difficile de mesurer avec exactitude les taux de séquestration du carbone (autant potentiels que réels). Il s'agit probablement de l'une des principales raisons pour lesquelles l'Ontario n'a toujours pas intégré la séquestration du carbone dans le sol à son plan d'atténuation des GES à long terme. La possibilité d'un renversement de situation dans l'avenir est également préoccupante, puisque le carbone séquestré dans le sol pourrait facilement être relâché si les pratiques de gestion changent encore une fois (p. ex., si le labour est adopté à nouveau). Le CEO reconnaît l'existence de ces obstacles. Néanmoins, la possibilité de réduire les GES grâce à la séquestration du carbone dans le sol est bien réelle et significative¹⁵³, même si elle est difficilement quantifiable et difficile à assurer à long terme. Le CEO croit qu'il vaut la peine de faire des efforts afin de surmonter ces problèmes et d'élaborer des protocoles qui pourront servir à la fois à mesurer les progrès accomplis et enfin à soutenir les programmes de mesures incitatives financières.



Structure mycorhizienne dans le sol (extrêmement importante pour former des agrégats de bonne qualité).

Source : Ankeny, IA, *Soil Biology Primer*, édition révisée, *Soil and Water Conservation Society (SWCS)*, 2000.

Pour donner un exemple de ce potentiel, pensons aux bénéfices accumulés au cours des 25 dernières années grâce à une seule ferme. Les Belan (voir les p. 27-28) ont commencé à mesurer le taux de matières organiques dans leurs sols depuis qu'ils ont abandonné le labour en 1991. Le taux moyen de matières organiques dans leurs sols a augmenté de près de 3 %, soit d'environ 2 % à près de 5 %. Les matières organiques du sol représentent environ 60 % du carbone organique du sol, ce qui signifie que celui-ci a augmenté d'environ 1,8 % pendant cette période (c.-à-d., 60 % de 3 %). Ce chiffre représente environ 32,4 tonnes de carbone supplémentaires par hectare^{xii}, soit l'équivalent d'environ 119 tonnes d'éq.-CO₂ par hectare (une tonne de carbone organique dans le sol = 3,67 tonnes d'éq.-CO₂). Au total, les Belan ont donc séquestré près de 48 000 tonnes d'éq.-CO₂ dans les 15 premiers centimètres de la surface du sol de leurs 405 hectares de terres agricoles depuis qu'ils ont changé de méthode.

^{xi} Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) estime que le potentiel annuel du taux de séquestration du carbone des terres agricoles se situe entre 1,1 et 1,8 tonne d'éq.-CO₂ par hectare, et une étude de 2007 sur le potentiel du secteur agricole au Canada fait état d'estimations encore plus basses. Toutefois, de récents travaux scientifiques ont donné une nouvelle perspective sur les mécanismes par lesquels le sol séquestre le carbone et cette nouvelle vision suggère que les modèles utilisés pour calculer les estimations ci-dessus pourraient générer des chiffres trop bas, principalement parce qu'ils ne tiennent pas compte de ce qui se produit dans le réseau alimentaire du sol (en particulier, sa capacité de « cacher » du carbone dans les agrégats).

^{xii} En supposant une profondeur d'échantillonnage de 15 centimètres (cm), ce qui est typique pour les analyses de sol en Ontario, et une densité du sol en vrac de 1,2 grammes/cm³ – c'est-à-dire la densité d'un sol contenant une quantité raisonnable de matières organiques. Si la profondeur d'échantillonnage utilisée était de 30 cm ou plus, le taux de séquestration pourrait changer, selon le taux de carbone des couches plus profondes du sol.

Les Belan ont séquestré près de 48 000 tonnes d'éq.-CO₂ dans les 15 premiers centimètres de la surface du sol de leurs 405 hectares de terres agricoles depuis qu'ils ont changé de méthode.

À ce point, le lecteur devrait noter que le CEO ne suggère pas que la situation des Belan est définitivement représentative du phénomène de séquestration du carbone dans le sol. Même si les analyses ont été effectuées par des laboratoires agréés, les Belan n'ont suivi aucun protocole spécifique sur la séquestration du carbone en ce qui concerne la profondeur de l'échantillon de sol ou l'emplacement du prélèvement, et les résultats obtenus ne sont qu'une estimation de ce qui s'est produit dans les 15 premiers centimètres de la couche supérieure

de leur sol. Cependant, 25 années est une période assez longue pour que les pratiques de labour employées aient eu le temps de faire leur œuvre et provoquer des changements, de sorte qu'il est probable que ces estimations soient plutôt exactes. De plus, la culture couvre-sol n'a été adoptée que tout récemment et n'a donc pas eu le temps d'avoir une grande incidence sur les taux de matières organiques. Ce dernier point donne à croire qu'il est tout à fait possible de séquestrer encore plus de carbone.

Les données laissent entendre un taux de séquestration de carbone dans le sol d'environ 4,75 tonnes d'éq.CO₂/hectare/année, soit plus du double du taux de 2 tonnes d'éq.-CO₂/hectare/année que le CEO avait utilisé pour effectuer son analyse en 2011. Avant tout cependant, les Belan sont un excellent exemple de ce que peut accomplir l'agriculteur moyen de l'Ontario.

Le tableau 1 compare les données des Belan au taux auquel aspire l'initiative 4 pour 1000, soit 0,4 % de réserve de carbone dans le sol, et examine les deux taux en fonction de leur incidence potentielle sur les cibles de réduction des GES de l'Ontario. Encore une fois, le CEO n'entend pas par là que ces chiffres devraient servir de référence de base aux fins de planification dans l'avenir. Un peu comme le nom de l'initiative 4 pour 1000, cette comparaison vise davantage à inspirer et motiver qu'à fixer des cibles réelles. Le CEO croit tout de même qu'il est juste de dire que ces données portent à croire qu'il y a un grand potentiel de séquestration du carbone dans le sol en Ontario. De fait, les résultats des Belan laissent entendre qu'en adoptant l'approche axée sur la santé du sol pour gérer 40 % des terres agricoles, il serait *possible* de séquestrer suffisamment de carbone pour combler 12,5 % de l'écart entre les émissions de GES actuelles et la cible fixée pour 2030.

Le tableau 1 montre aussi que la hausse moyenne du carbone organique dans le sol des Belan au cours des 25 dernières années est d'environ 9,5 fois le taux suggéré par l'initiative 4 pour 1000. Par conséquent, même si les résultats obtenus par les Belan sur le plan de la séquestration s'avèrent surestimés ou un cas d'exception, les données laissent entendre que l'initiative 4 pour 1000 ne promet pas un programme fondé sur des cibles irréalistes ou impossibles à atteindre pour l'agriculteur moyen. Parvenir à ce taux de séquestration dans plus de 90 % des terres agricoles de l'Ontario réduirait de 3 % l'écart pour atteindre la cible de 2030 – une réussite tout à fait louable, particulièrement compte tenu de tous les autres avantages qui viennent s'y ajouter.

Tableau 1 : Comparaison de l'incidence de deux taux de séquestration du carbone dans le sol sur la réduction des GES

Taux (t d'éq.-CO ₂ /ha/an)	Pourcentage de terres agricoles participantes	Total d'hectares assujettis aux PEG	Quantité séquestrée (Mt d'éq.-CO ₂ /an)	Écart en pourcentage par rapport à la cible de 2030
4,75	40	1 440 000	6,84	12,5
0,5	90	3 240 000	1,6	3

Remarque : Nombre d'hectares de terres agricoles en Ontario = 3 600 000; cible de 2030 + 115 Mt d'éq.-CO₂/année; écart : 55 Mt d'éq.-CO₂

**Estimation approximative du taux de séquestration du carbone proposé par l'initiative 4 pour 1000 (convertie en tonnes d'éq.-CO₂/hectare/année). Puisque le chiffre de 0,4 % représente une augmentation des *réserves actuelles* (plutôt qu'une augmentation absolue), le taux variera d'un endroit à l'autre en fonction du niveau de carbone de départ dans le sol.

Lorsque les champions deviennent la norme

Les scientifiques ont répertorié de nombreux avantages associés à la santé du sol qui profitent aux agriculteurs (ils continuent d'en découvrir d'autres). De plus, ces résultats sont corroborés par un nombre croissant d'agriculteurs (comme le démontrent les études de cas de réussites susmentionnées), et les politiques dans les régions en tête de file, telles que les États-Unis et la France, évoluent rapidement pour refléter le consensus qui se dessine.

Ce sont là d'excellentes nouvelles. En accordant la priorité à la santé du sol, il est tout à fait possible que les agriculteurs soient en mesure de tirer parti des grandes réussites de l'histoire moderne de l'agriculture tout en s'attaquant directement à la menace que faisaient constamment peser ces réussites sur l'environnement. Ils peuvent ainsi améliorer leurs propres résultats et réduire leurs risques, tout en jouant un rôle important pour trouver des solutions aux enjeux liés à la durabilité qui accablent l'humanité, du déclin de la biodiversité au changement climatique. Adopter une approche axée sur la santé du sol n'est pas seulement une occasion intéressante pour les agriculteurs de l'Ontario; il s'agit également d'une occasion économique et d'un impératif sur le plan environnemental.

Cependant, la tâche ne sera pas aisée. L'agriculture conventionnelle a très bien fonctionné pour les agriculteurs d'un point de vue individuel, en partie en raison de la simplicité d'exécution des pratiques qu'elle implique. À l'inverse, l'approche axée sur la santé du sol exige davantage d'efforts de la part des agriculteurs en matière de planification, de surveillance et de gestion des rotations culturales complexes, lesquelles comprennent dans bien des cas des cultures secondaires ou couvre-sol pour lesquelles il n'existe pas vraiment de marché de vente.

La gestion des maladies et des organismes nuisibles est un autre des obstacles majeurs à surmonter lors du passage à cette nouvelle approche.

D'ailleurs, une très forte culture entoure maintenant l'agriculture conventionnelle. La norme exige des champs sans mauvaises herbes, remplis de cultures vertes qui contrastent fortement avec une terre nue et foncée. Par comparaison, des champs où le sol est constamment dissimulé par des résidus ou de multiples espèces de cultures couvre-sol peuvent paraître désordonnés et chaotiques. Certaines PEG axées sur la santé du sol, par exemple l'abolition du labour et les cultures couvre-sol, ne faisaient pas bonne figure dans l'esprit de la génération précédente d'agriculteurs. De nombreuses questions sur le plan technique demeurent sans réponse en ce qui a trait à la mise en application des principes et des PEG axés sur la santé du sol¹⁵⁴.

Accorder la priorité à la santé du sol exige une plus grande tolérance des agriculteurs face à l'incertitude, sans filet de sécurité pour les soutenir face au risque, lequel est pour eux un enjeu crucial puisque leur subsistance dépend de leur capacité à produire des récoltes au rendement adéquat chaque année. Ils ne sont donc pas à blâmer pour vouloir réduire au minimum leurs risques et optimiser leurs chances de réussir¹⁵⁵. Les programmes actuels d'assurance-récolte ne protègent ni ne soutiennent les agriculteurs qui tentent le coup et adoptent l'approche axée sur la santé du sol, même si trois années ou plus peuvent être nécessaires avant d'en constater les bénéfices. Les techniques pour mesurer la santé du sol ne sont pas non plus aussi développées que les analyses chimiques du sol¹⁵⁶. Ces derniers permettent par exemple de facilement évaluer les besoins en nutriments du sol, et ceux-ci sont simples à satisfaire. En revanche, les évaluations de la santé du sol¹⁵⁷ consistent habituellement à prendre des mesures liées aux caractéristiques du sol, comme le taux d'infiltration des précipitations, de sorte que les recommandations qui en découlent sont plus qualitatives que quantitatives (p. ex., diminuer le recours au labour)^{158,159}. De ce point de vue, il est facile de comprendre pourquoi les agriculteurs se questionnent à savoir si cette approche fonctionnera dans leur cas et hésitent à abandonner une approche qui fonctionne.

Pour couronner le tout, le réseau commercial qui approvisionne le secteur de l'agriculture en Ontario en adjuvants devra effectuer de sérieux réajustements. L'agriculture conventionnelle dépend des engrais de synthèse pour ajouter des nutriments et des pesticides pour protéger les cultures. Puisque ces adjuvants peuvent causer du tort aux créatures du réseau alimentaire du sol (voir « Du sable dans l'engrenage » p. 21), les adeptes de l'approche axée sur la santé du sol les utilisent

judicieusement et avec parcimonie. Le désintérêt pour les adjuvants conventionnels entraînera vraisemblablement une baisse de la demande pour ces produits, tout en accroissant la demande pour les autres (p. ex., les cultures couvre-sol, divers inoculants, le compost). Ce changement provoquera sans doute des perturbations économiques pendant la période où les fournisseurs et conseillers agricoles prendront les mesures nécessaires pour s'adapter. Tel que susmentionné (voir p. 21), certains des principaux fournisseurs ont déjà lancé le développement de nouveaux produits qui correspondent davantage à l'approche axée sur la santé

Établir une approche axée sur la santé du sol dans l'ensemble du secteur de l'agriculture en Ontario ne se fait pas du jour au lendemain. Les agriculteurs sont tout à fait justifiés d'hésiter à abandonner une approche qui leur a si bien réussi à eux et à leurs familles.

du sol¹⁶⁰. Du temps sera nécessaire avant d'obtenir de nouveaux produits efficaces, et la période de transition représentera un défi pour l'ensemble de l'industrie de l'agriculture.

Un rôle important pour le MAAARO

Établir une approche axée sur la santé du sol dans l'ensemble du secteur de l'agriculture en Ontario ne se fait pas du jour au lendemain. Les agriculteurs sont tout à fait justifiés d'hésiter à abandonner une approche qui leur a si bien réussi à eux et à leurs familles. Il est également normal qu'ils demandent des preuves tangibles et des histoires d'exemples de réussite, ainsi qu'un soutien financier approprié pour gérer le risque pendant qu'ils expérimentent avec ces nouvelles idées.

Le MAAARO devrait mettre sur pied une « passerelle » largement accessible aux agriculteurs afin de leur permettre de passer à l'approche axée sur la santé du sol d'une façon qui comporte le moins de risques possible. Le Ministère devrait prendre les devants dans les domaines suivants :

- *Lever le doute et faire adhérer la majorité des agriculteurs par l'entremise de la recherche, de projets de démonstration, de figures de preuve et de campagnes promotionnelles.* Comme mentionné plus haut, changer une culture n'est pas une tâche aisée. Dans son rapport annuel de 2013-2014, le CEO recommande que le MAAARO « identifie les leaders en Ontario en matière de santé du sol et qu'il intègre systématiquement les importants facteurs de réussite dans les documents ministériels éducatifs sur l'agriculture et dans ses priorités de recherche ». Le Ministère a commencé à agir en ce sens en donnant l'occasion aux adeptes locaux de l'approche axée sur la santé du sol de s'exprimer à un nombre grandissant d'ateliers qui ont lieu partout en Ontario (organisés par le MAAARO et différents organismes agricoles) ainsi qu'en accroissant les efforts de recherche en la matière. Il reste toutefois beaucoup à faire en ce sens.
- *Aider les agriculteurs à gérer le risque durant la période de transition, au moyen de changements possibles aux règles sur l'assurance-récolte, en remplaçant les mesures dissuasives par des mesures incitatives qui favorisent le changement et par le financement de l'innovation et de la recherche et sur le terrain.* Il s'agit là d'un domaine très important qui n'a pas encore été abordé par le gouvernement. Cependant, en réponse à une demande d'examen déposée par deux résidents de l'Ontario préoccupés par la santé des sols de l'Ontario, le Ministère a lancé un projet sur la santé du sol (voir l'encadré ci-contre « Le projet sur la santé du sol du MAAARO »), et le CEO espère que celui-ci permettra de répondre à ces préoccupations. De plus, le ministère de l'Environnement et de l'Action en matière de changement climatique a récemment publié son *Plan quinquennal de l'Ontario pour combattre le changement climatique*, lequel présente le financement prévu de 30 millions de dollars dans le Compte de réduction des gaz à effet de serre pour appuyer la santé du sol à long terme¹⁶¹.
- *Résoudre les problèmes techniques.* En particulier, les agriculteurs ont besoin de meilleures méthodes rapides et bon marché pour mesurer le taux de carbone et évaluer la santé du sol^{162, xiii}. Lorsque de telles méthodes auront été créées, le gouvernement pourrait se servir des résidents un peu comme des scientifiques (les agriculteurs et autres gestionnaires du sol) pour récolter des données de référence nécessaires pour lancer de nouveaux programmes ainsi que surveiller leur progrès et leurs réussites.

^{xiii} Le MAAARO est à l'œuvre et tâche d'élaborer un protocole d'évaluation de la santé du sol en mettant à l'épreuve la méthode d'évaluation de la santé du sol de Cornell pour l'adapter au contexte de l'Ontario. Ces travaux sont toujours en cours.

- *Gérer les perturbations entraînées par les idées novatrices qui définissent l'approche axée sur la santé du sol.* Ce domaine d'activité devrait aborder des enjeux tels que les secteurs de l'industrie qui risquent de perdre des ventes, la nécessité de former à nouveau les professionnels, gérer les questions liées à la propriété des terres et combler l'écart qui existe entre les lois telles que la *Loi sur le drainage*, la *Loi sur les espèces en voie de disparition* et la *Loi de 2002 sur la gestion des éléments nutritifs* pour les harmoniser avec la nouvelle vision de l'agriculture.
- *Promouvoir le concept d'un pied d'égalité.* De façon générale, le MAAARO devrait préconiser le concept d'un pied d'égalité pour une économie durable et expliquer comment il s'applique à l'agriculture en général et particulièrement à la santé du sol. Ce concept intègre les enjeux tels que tenir compte de l'ensemble des coûts, c'est-à-dire que la prise en compte des coûts écologiques et des avantages d'une activité sont tout aussi importants que les paramètres économiques standards. Par exemple, les coûts associés à la plantation de cultures couvre-sol sont assumés par les agriculteurs sur une base individuelle, tandis que l'ensemble de la société en profite par l'entremise de la diminution de la pollution. Les agriculteurs qui n'emploient pas les cultures couvre-sol n'ont pas à supporter ces coûts supplémentaires; ainsi, pour que tous soient sur un pied d'égalité, il serait nécessaire de mettre en place un mécanisme qui reconnaît les avantages pour la société qui découlent de ces PEG afin que ceux qui les ont adoptées ne soient pas pénalisés sur le plan économique pour avoir pris la bonne décision.

Le projet sur la santé du sol du MAAARO

En décembre 2014, le CEO a reçu une demande d'examen de la part de deux résidents de l'Ontario, lesquels demandaient d'étudier le besoin d'établir une politique et un cadre réglementaire exhaustifs sur la gestion saine du sol en Ontario. Le CEO a envoyé cette demande au MAAARO, au ministère de l'Environnement et de l'Action en matière de changement climatique et au ministère des Affaires municipales et du Logement. Le MAAARO a accepté de mener cet examen et les deux autres ministères ont accepté de lui prêter main-forte. Cet examen est en cours, et entre-temps, le CEO a appris lors de séances d'information avec le MAAARO que ce dernier a accordé la priorité à la santé du sol et a mis sur pied un comité consultatif multilatéral pour obtenir l'avis d'une grande variété d'experts. Les résultats préliminaires de cette consultation ont été affichés sur le Registre environnemental le 29 août 2016 sous forme de document de travail pour le développement d'une stratégie axée sur la santé et la conservation du sol en Ontario, intitulé *Le maintien des sols agricoles en Ontario : vers une vision partagée*.

Le potentiel des crédits de carbone en agriculture

Bien qu'il paraisse alléchant d'avoir recours aux crédits de carbone en tant que mesure incitative pour accroître le carbone dans le sol^{163,164}, ceux-ci sont accompagnés de pièges majeurs. Comme il en est question plus haut, il est difficile et coûteux de mesurer l'augmentation du taux de carbone dans le sol, et plus particulièrement, ces augmentations peuvent être facilement et rapidement renversées si les pratiques qui en sont responsables sont abandonnées. Cela ne veut pas dire que la société devrait abandonner l'idée de trouver des moyens de promouvoir, voire récompenser, la séquestration du carbone dans le sol^{xiv, 165}, mais plutôt que les paiements compensatoires versés directement aux agriculteurs ne sont peut-être pas le meilleur moyen de parvenir à accroître la santé du sol en général.

^{xiv} En fait, l'USDA a récemment remis une subvention de [1 000 000 de dollars américains](#) à la National Corn Growers Association pour élaborer un système pour comptabiliser le carbone à l'échelle dans l'agriculture par l'entremise du projet *Soil Health Partnership Initiative*.

Il pourrait s'avérer utile de mettre un accent différent sur l'utilisation des crédits compensatoires. Plutôt que de récompenser le stockage du carbone dans le sol, certains organismes emploient un protocole sur la réduction de l'utilisation des engrais. Tel que susmentionné, 43 % des GES du secteur de l'agriculture de l'Ontario proviennent de l'épandage d'engrais de synthèse et de lisier brut. Comme l'ont prouvé les actuels adeptes des principes liés à la santé du sol, les agriculteurs qui adoptent cette approche pourraient progressivement réduire leur besoin de recourir aux engrais azotés de synthèse. En fait, de nombreux protocoles sur les engrais ont déjà été élaborés aux États-Unis; trois sont fondés strictement sur les quantités réduites utilisées¹⁶⁶, tandis que d'autres comprennent également les facteurs tels que le type d'engrais utilisé ainsi que le moment et l'emplacement de l'épandage¹⁶⁷. Ces protocoles sont tous utilisés pour les cultures de maïs aux États-Unis, mais pourraient être adaptés à d'autres régions et d'autres types de cultures.

Le CEO est d'avis que cette approche pourrait réduire les émissions de GES du sol. Offrir des compensations pour certaines réductions pourrait aider les agriculteurs qui ont adopté des pratiques axées sur la santé du sol à passer à la prochaine étape risquée, mais importante, soit réduire leur utilisation des engrais. Même après avoir mis en œuvre bon nombre de pratiques exemplaires de gestion axées sur la santé du sol, les agriculteurs sont susceptibles, et avec raison, d'être inquiets d'utiliser une quantité d'engrais synthétiques moindre que les quantités recommandées et d'être incertains que l'accroissement de la fertilité naturelle de leurs terres suffira à maintenir la productivité de leurs récoltes. Des crédits compensatoires pourraient contribuer à atténuer ces préoccupations, surtout si elles sont accompagnées d'autres mécanismes de soutien, par exemple en adaptant les programmes d'assurance-récolte.



Commentaires et recommandations du CEO

Commentaires

Les sols en santé présentent un immense potentiel de lutte au changement climatique, mais pour que le mouvement axé sur la santé du sol puisse s'établir fermement et à temps en Ontario, le gouvernement devra jouer un rôle actif et considérable.

La santé du sol n'est pas une caractéristique que l'on peut simplement « ajouter » à un système de gestion du sol existant.

Le principal obstacle à ce projet est le fait que la santé du sol n'est pas une caractéristique que l'on peut simplement « ajouter » à un système de gestion du sol existant. Il est nécessaire d'adopter une approche différente qui met l'accent sur la protection et l'amélioration des organismes qui vivent dans le sol. Pour ce faire, il faut sincèrement reconnaître et comprendre l'aspect technique de ces organismes et la façon dont des créatures pour la plupart invisibles font équipe avec le processus de la photosynthèse pour absorber le carbone de l'atmosphère, ainsi atténuer le changement climatique, puis utiliser ce carbone pour créer et maintenir un sol résilient qui s'adapte efficacement. La santé du sol et le réseau alimentaire dont elle découle ne peuvent pas être abordés après coup; ils doivent être la préoccupation principale.

La conversion à l'approche axée sur la santé du sol à l'échelle provinciale demandera du temps, des efforts et des ressources de la part du gouvernement. Des efforts considérables seront nécessaires dans les domaines de la recherche approfondie, du soutien technique ciblé, des programmes de gestion du risque appropriés, de la formation efficace et accessible et des mesures incitatives qui peuvent être appliquées¹⁶⁸. Plus que tout, le gouvernement devra d'abord s'engager sérieusement à comprendre la nature et la valeur des changements nécessaires et des obstacles à surmonter, puis à faire en sorte que ces changements se produisent.

Recommandations

Premièrement, le CEO recommande que la province de l'Ontario devienne signataire de l'initiative 4 pour 1000. Travailler de concert avec d'autres régions qui empruntent le même virage¹⁶⁹ facilitera la conversion à une approche agricole axée sur la santé du sol. Le CEO encourage également le MAAARO à recommander à divers organismes de la société civile à adhérer à l'initiative, par exemple la Fédération de l'agriculture de l'Ontario et l'Association pour l'amélioration des sols et des récoltes de l'Ontario.

Deuxièmement, le CEO formule les recommandations suivantes à l'intention du MAAARO :

- coordonner l'élaboration d'un protocole soutenu par des méthodes et technologies appropriées pour estimer les taux de carbones des sols de l'Ontario;
- mettre en œuvre un programme pour estimer les niveaux de carbone dans le sol de l'ensemble de la province sur une base triennale et rendre les résultats publics.

Troisièmement, le CEO recommande au gouvernement de l'Ontario de trouver une manière de lier le coût de l'assurance-récolte à la teneur en carbone du sol, de façon à reconnaître qu'au fil du temps, une teneur élevée en carbone permet de réduire les risques pour les cultures.

Quatrièmement, le CEO recommande à la province de mettre sur pied un programme qui fournirait un soutien financier pour une période qui pourrait s'échelonner jusqu'à 10 ans pour les agriculteurs qui adoptent les pratiques exemplaires de gestion axée sur la santé du sol, de façon à compenser toute perte de rendement des cultures qui pourrait survenir durant la période de transition. Ce programme pourrait envisager d'utiliser les crédits de carbone dans le cadre de son soutien financier, par exemple pour récompenser la diminution de l'utilisation des engrais.

Notes en fin de chapitre

- ¹ Simpson, Sarah, « Nitrogen Fertilizer: Agricultural Breakthrough – And Environmental Bane », *Scientific American*, mars 2009.
- ² Santé Canada, *Les aliments GM et leur réglementation*. <http://www.hc-sc.gc.ca/fn-an/gmf-agm/fs-if/gm-foods-aliments-gm-fra.php>
- ³ Statistique Canada, « Section 1: Les aliments au Canada », *L'activité humaine et l'environnement*, pub. 16-201-X, graphique 1.1.
- ⁴ Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO), *Estimatif provinciales historiques par culture, 1981-2014*. http://www.omafr.gov.on.ca/french/stats/crops/estimate_hist_imp.htm
- ⁵ Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO), *Estimatif provinciales historiques par culture, 1981-2014*. http://www.omafr.gov.on.ca/french/stats/crops/estimate_hist_imp.htm
- ⁶ Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO), *Estimations provinciales de la superficie, du rendement, de la production et de la valeur agricole de certaines cultures en particulier, 2012-2016* (unités impériales et métriques). http://www.omafr.gov.on.ca/french/stats/crops/estimate_new.htm
- ⁷ Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO), *Estimatif provinciales historiques par culture, 1981-2014*. http://www.omafr.gov.on.ca/french/stats/crops/estimate_hist_imp.htm
- ⁸ Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO), *Estimations provinciales de la superficie, du rendement, de la production et de la valeur agricole de certaines cultures en particulier, 2012-2015* (unités impériales et métriques). http://www.omafr.gov.on.ca/french/stats/crops/estimate_new.htm
- ⁹ Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO), *Estimatif provinciales historiques par culture, 1981-2014*. http://www.omafr.gov.on.ca/french/stats/crops/estimate_hist_imp.htm
- ¹⁰ Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO), *Estimations provinciales de la superficie, du rendement, de la production et de la valeur agricole de certaines cultures en particulier, 2011-2015* (unités impériales et métriques). http://www.omafr.gov.on.ca/french/stats/crops/estimate_new.htm
- ¹¹ Statistique Canada, *Données sur les exploitations et les exploitants agricoles de 2011*, « Faits saillants et analyses : Chapitre 1 ». <http://www.statcan.gc.ca/pub/95-640-x/2011001/p1/p1-01-fra.htm>
- ¹² Environnement et Changement climatique Canada, *Inventaire canadien des gaz à effet de serre*, mars 2016. <https://www.ec.gc.ca/ges-ghg/default.asp?lang=Fr&n=83A34A7A-1>
- ¹³ Tel que rapporté au CEO par Environnement Canada.
- ¹⁴ Agriculture et Agroalimentaire Canada, *L'agriculture écologiquement durable au Canada : Série sur les indicateurs agroenvironnementaux – Rapport numéro 4*, 2016, p. 94.
- ¹⁵ Environnement et Changement climatique Canada, *Inventaire canadien des gaz à effet de serre*, mars 2016. <https://www.ec.gc.ca/ges-ghg/default.asp?lang=Fr&n=83A34A7A-1>
- ¹⁶ Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), « Food Security: Concepts and Measurement », *Trade Reforms and Food Security*, chapitre 2.
- ¹⁷ Gunderson, Lance H., « Ecological Resilience – in Theory and Application », *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 31, 2000, p. 425-39.
- ¹⁸ Agence de protection de l'environnement des États-Unis (US EPA), *Climate Change Impacts on Agriculture and Food Supply*, <https://www3.epa.gov/climatechange/impacts/agriculture.html>
- ¹⁹ Ontario Centre for Climate Impacts and Adaptation Resources (OCCIAR), *Agriculture: in a changing climate*. www.climateontario.ca
- ²⁰ Schlenker, Wolfram et Michael J. Roberts, « Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change », *PNAS*, vol. 106, n° 37, septembre 2009.
- ²¹ Ontario Centre for Climate Impacts and Adaptation Resources (OCCIAR), *Agriculture: in a changing climate*. www.climateontario.ca
- ²² Center for American Progress, *Agriculture and the Paris Agreement*, 12 mai 2016.
- ²³ Natural Resources Conservation Service (NRCS), United States Department of Agriculture (USDA), *Role of Soil Organic Matter*.
- ²⁴ Bot, Alexandra et Jose Benites, « The importance of soil organic matter », *FAO Soils Bulletin 80*, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), 2005.
- ²⁵ Natural Resources Conservation Service (NRCS), United States Department of Agriculture (USDA), *Role of Soil Organic Matter*. <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/>
- ²⁶ Agence de protection de l'environnement des États-Unis (US EPA), *Climate Change Impacts on Agriculture and Food Supply*. <https://www3.epa.gov/climatechange/impacts/agriculture.html>
- ²⁷ Penn State Extension, *Managing Phosphorus for Agriculture and the Environment*. <http://extension.psu.edu/plants/nutrient-management/educational/soil-fertility/managing-phosphorus-for-agriculture-and-the-environment>
- ²⁸ Dirzo et coll., « Defaunation in the Anthropocene », *Science* 25, juillet 2014, p. 401-406.
- ²⁹ Schwagerl, Christian, « Vanishing Act: Why Insects Are Declining and Why It Matters », *Yale Environment 360*, 6 juillet 2016.
- ³⁰ Pour consulter une analyse relativement détaillée des problèmes associés à l'agriculture intensive ou « industrielle », lire le rapport suivant : International Panel of Experts on Sustainable Food Systems (IPES-Food), *From Uniformity to Diversity: a paradigm shift from industrial agriculture to diversified agroecological systems*, juin 2016. www.ipes-food.org.

- ³¹ Don McCabe, « Buffer strips are ineffective because most P is lost in winter and early spring when the strips are frozen and the P-laden water runs right over them », communication personnelle.
- ³² Natural Resources Conservation Service (NRCS), United States Department of Agriculture (USDA), vidéo sur les principes liés à la santé du sol présenté par le porte-parole du NRCS, Ray Archuleta. À partir de la minute 9:30, Archuleta explique en quoi les bandes tampons ne sont que des solutions de fortune qui ne règlent pas vraiment le problème des pertes de nutriments et d'eau.
- ³³ Le renseignement présenté dans la note en pied de page 4 est fourni par Charles Lalonde et Don McCabe de l'Ontario Federation of Agriculture (OFA).
- ³⁴ Cernansky, Rachel, « News Feature 13: Secrets of life in the soil », *Nature*, septembre 2016.
- ³⁵ Stika, Jon, « Introduction », *A Soil Owner's Manual*, 2016.
- ³⁶ Clapperton, Jill, Rhizoterra Inc., présentation de diapositives « Soil Health Principles », 2014. www.rhizoterra.com
- ³⁷ Des recherches récentes suggèrent que le transfert du carbone des plantes vers les écosystèmes souterrains pourrait être l'un des facteurs déterminants de la réaction de l'environnement au changement climatique, voir : Bardgett, Richard D., « The Root of the Problem », *The Scientist*, 1^{er} août 2011.
- ³⁸ Clapperton, Jill, Rhizoterra Inc., *Healthy Soil is the Foundation of Civilizations*. www.rhizoterra.com
- ³⁹ Orgiazzi, A., Bardgett, R.D., Barrios, E., Behan-Pelletier, V., Briones, M.J.I., Chotte, J-L., De Deyn, G.B., Eggleton, P., Fierer, N., Fraser, T., Hedlund, K., Jeffery, S., Johnson, N.C., Jones, A., Kandeler, E., Kaneko, N., Lavelle, P., Lemanceau, P., Miko, L., Montanarella, L., Moreira, F.M.S., Ramirez, K.S., Scheu, S., Singh, B.K., Six, J., van der Putten, W.H. et Wall, D.H. (éditeurs), *Global Soil Biodiversity Atlas*, Commission européenne, Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg, 2016, p. 9.
- ⁴⁰ Kibblewhite, M.G., Ritz, K., et Swift, M.J., « Soil Health in Agricultural Systems », *Phil. Trans. R. Soc.*, n° 363, 2008, 685-701.
- ⁴¹ Orgiazzi, et coll., « The Soil Habitat », *Global Soil Biodiversity Atlas*, Commission européenne, Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg, 2016, chapitre 1.
- ⁴² Natural Resources Conservation Service (NRCS), United States Department of Agriculture (USDA), *Soil Health Nuggets*. <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/>
- ⁴³ Damrosch, Barbara, « Symphony of the Soil », *Washington Post*, 2 octobre 2013. Article sur le monde fascinant qui se trouve sous nos pieds.
- ⁴⁴ Orgiazzi, A. et coll., *Global Soil Biodiversity Atlas*, Commission européenne, Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg, 2016, p. 169.
- ⁴⁵ Wardle, David et coll., « Ecological Linkages between Aboveground and Belowground Biota », *Science*, vol. 304, 11 juin 2004.
- ⁴⁶ Townsend, Lee, Potter, Dan et Powell, A.J., *Earthworms: Thatch-Busters*, University of Kentucky Cooperative Extension Service, College of Agriculture.
- ⁴⁷ Wall, Diana H., Uffe N. Nielsen et Johan Six, « Soil biodiversity and human health », *Nature*, vol. 000, 2015.
- ⁴⁸ Orgiazzi, A. et coll., *Global Soil Biodiversity Atlas*, Commission européenne, Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg, 2016, p. 93.
- ⁴⁹ Stika, Jon. *A Soil Owner's Manual*, 2016, p. 26.
- ⁵⁰ Pour consulter des discussions détaillées sur cet avantage en particulier, lire la section 6.2 « Les racines de la durabilité : lancer les solutions sur le carbone organique dans le sol » du rapport annuel de 2011-2012 du CEO, *Mettre des solutions en œuvre* et le rapport annuel sur les progrès liés aux gaz à effet de serre de 2014 du CEO, *À la recherche d'un leadership*, section 3.2.5.
- ⁵¹ Magdoff, Fred et Harold Van Es, *Building Soils for Better Crops*, Sustainable Agriculture Research and Education (SARE) Program, 3^e édition, Handbook Series Book 10, 2009, p. 39-41.
- ⁵² Penn State Extension, Cooperative Extension, College of Agricultural Sciences, « Soil Quality », *Introduction to Soils*, p. 2.
- ⁵³ Nichols, Kris, *Does Glomalin Hold Your Farm Together?*, USDA-ARS-Northern Great Plains Research Lab.
- ⁵⁴ Rillig, Matthias C., Wright, Sara F. et Eviner, Valerie T., « The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: comparing effects of five plant species », *Plant and Soil*, n° 238, 2002, p. 325-333.
- ⁵⁵ Singh, Pradeep Kumar, « Role of Glomalin Related Soil Protein Produced by Arbuscular Mycorrhizal Fungi: A Review », *Agricultural Science Research Journal*, vol. 2, n° 3, mars 2012.
- ⁵⁶ Penn State Extension, Cooperative Extension, College of Agricultural Sciences, « Soil Quality », *Introduction to Soils*, p. 3-4.
- ⁵⁷ Murphy, B.W., Department of the Environment, Canberra, Australie, *Soil Organic Matter and Soil Function – Review of the Literature and Underlying Data*, p. 34.
- ⁵⁸ Pour consulter une discussion détaillée de la façon dont les MOS retiennent l'eau et du degré d'accroissement de la capacité de rétention d'eau qu'ils pourraient entraîner, lire : Jones, Christine, « Soil Carbon means WATER to me! », *Managing Wholes.com*, 2 mai 2010.
- ⁵⁹ Clapperton, Jill, Rhizoterra Inc., *Healthy Soil is the Foundation of Civilizations*, 2014. www.rhizoterra.com
- ⁶⁰ Orgiazzi, A., et coll. (éditeurs), *Global Soil Biodiversity Atlas*, Commission européenne, Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg, 2016, p. 176.
- ⁶¹ Cornell University, NRCCA Study Resources, *Competency Area 2: Basic Concepts of Soil Fertility*.
- ⁶² International Plant Nutrition Institute, *Enviro-Brief*, n° 01.
- ⁶³ International Plant Nutrition Institute, *Enviro-Brief*, n° 01.
- ⁶⁴ Ingham, Elaine R., *Soil Food Web*, Natural Resources Conservation Service (NRCS), United States Department of Agriculture (USDA). <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/>

- ⁶⁵ Magdoff, Fred et Harold Van Es, *Building Soils for Better Crops*, Sustainable Agriculture Research and Education (SARE) Program, 3^e édition, Handbook Series Book 10, 2009, p. 38-39.
- ⁶⁶ Jill Clapperton, vidéo sur les principes liés à la santé du sol. <https://www.youtube.com/watch?v=-z-r3omKP3c>
- ⁶⁷ Bais et coll., « The Role of Root Exudates in Rhizosphere Interactions with Plants and Other Organisms », *Annual Review of Plant Biology*, n° 57, 2006, p. 233-266.
- ⁶⁸ Walker, Travis S., Harsh Pal Bais, Erich Grotewold et Jorge M. Vivanco, « Root Exudation and Rhizosphere Biology », *Plant Physiology*, vol. 132, 2003, p. 44-51.
- ⁶⁹ Clapperton, Jill., Rhizoterra Inc., *Healthy Soil is the Foundation of Civilizations*. www.rhizoterra.com
- ⁷⁰ Nguyen, C., *Agronomie* 23, tel que référencé par Patrick Lavelle à la p. 11 du chapitre 1.1 de l'ouvrage *Soil Ecology and Ecosystem Services*, Diana Wall, Oxford University Press, 2003.
- ⁷¹ Bais et coll., « The Role of Root Exudates in Rhizosphere Interactions with Plants and Other Organisms », *Annual Review of Plant Biology*, n° 57:233-266, 2006, p. 251.
- ⁷² Natural Resources Conservation Service (NRCS), United States Department of Agriculture (USDA), *Soil Biology Primer*, chapitre sur les champignons du sol. <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/>
- ⁷³ Magdoff, Fred et Harold Van Es, *Building Soils for Better Crops*, Sustainable Agriculture Research and Education (SARE) Program, 3^e édition, Handbook Series Book 10, 2009, p. 39-41.
- ⁷⁴ Pour consulter une bonne explication du cycle complet du carbone relativement à sa séquestration dans le sol, lire : Kane, Daniel, *Carbon Sequestration Potential on Agricultural Lands: A Review of Current Science and Available Practices*, National Sustainable Agriculture Coalition, 2015.
- ⁷⁵ Natural Resources Conservation Service (NRCS), United States Department of Agriculture (USDA), *The Food Web and Carbon Sequestration*. <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/>
- ⁷⁶ Un document très important sur la séquestration du carbone dans le sol soutient que de nouveaux modèles de prédiction du taux de séquestration de carbone dans le sol sont nécessaires, puisque les auteurs avancent qu'il s'agit d'une « propriété de l'écosystème » plutôt que d'une simple propriété biologique, chimique ou physique. Schmidt et coll., « Persistence of soil organic matter as an ecosystem property », *Nature*, vol. 478, octobre 2011, p. 49-56.
- ⁷⁷ Les champignons mycorrhiziens sont particulièrement importants pour la séquestration du carbone dans le sol. Wilson et coll., « Soil aggregation and carbon sequestration are tightly correlated with the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi: results from long-term field experiments », *Ecology Letters*, vol. 12, 2009, p. 452-461.
- ⁷⁸ Ces principes sont décrits en détail sur la page Web du NRCS sur la gestion du sol. <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/>
- ⁷⁹ Davis, Adam S., Jason D. Hill, Craig A. Chase, Ann M. Johanns et Matt Liebman, « Increasing Cropping System Diversity Balances Productivity, Profitability and Environmental Health », *PLoS|One*, vol. 7, n° 10, octobre 2012.
- ⁸⁰ Vukicevich, Eric, Tom Lowery, Pat Bowen, Jose Ramon Orbez-Torres et Miranda Hart, « Cover crops to increase soil microbial diversity and mitigate decline in perennial agriculture. A review. », *Agronomy for Sustainable Development*, 2016, p. 36-48.
- ⁸¹ Jill Clapperton, vidéo sur les principes liés à la santé du sol. <https://www.youtube.com/watch?v=-z-r3omKP3c>
- ⁸² Lancaster University, « Mix up plant species to keep soil healthy », *Science Daily*, 27 juillet 2016.
- ⁸³ Mulhollem, Jeff, « First-of-kind study suggests cover crop mixtures increase agroecosystem services », Penn State, 7 septembre 2016.
- ⁸⁴ American Society of Agronomy, « More for less in pastures », *Science Daily*, 20 juillet 2016.
- ⁸⁵ Pour consulter un exemple, voir : Basche et coll., « Soil water improvements with the long term use of a winter rye cover crop », *Agriculture Water Management*, 172, 2016, p. 40-50.
- ⁸⁶ Rillig, Matthias C., « Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation », *Can. J. Soil Science*, 84, 2004, p. 355-363.
- ⁸⁷ En fait, les champignons mycorrhiziens pourraient être l'un des facteurs clés qui déterminent la quantité de carbone qu'un sol peut séquestrer. Dr Christine Jones, une écologiste australienne qui se spécialise dans le sol, défend cette idée depuis de nombreuses années et les récentes découvertes scientifiques semblent venir appuyer sa théorie. Voir : Jones, Christine, « Mycorrhizal fungi – powerhouse of the soil », *Evergreen Farming Newsletter*, septembre 2009.
- ⁸⁸ Jones, Christine, Ph.D. *From light to life: restoring farmland soils*, 2016. www.amazingcarbon.com
- ⁸⁹ Stika, Jon. *A Soil Owner's Manual*, chapitre 4.
- ⁹⁰ Magdoff, Fred et Harold Van Es, *Building Soils for Better Crops*, Sustainable Agriculture Research and Education (SARE) Program, 3^e édition, Handbook Series Book 10, 2009, p. 213.
- ⁹¹ Magdoff, Fred et Harold Van Es, *Building Soils for Better Crops*, Sustainable Agriculture Research and Education (SARE) Program, 3^e édition, Handbook Series Book 10, 2009, p. 235.
- ⁹² Russel, Ann E., Cynthia A. Cambardella, David A. Laird, Dan B. Jaynes et David W. Meek, « Nitrogen fertilizer effects on soil carbon balances in Midwestern U.S. agricultural systems », *Ecological Applications*, vol. 19, n° 5, 2009.
- ⁹³ Hepperly, Paul, « The Organic Farming Response to Climate Change », *Pesticides and You*, vol. 27, n° 1, 2007.
- ⁹⁴ Orgiazzi, A., et coll. (éditeurs), *Global Soil Biodiversity Atlas*, Commission européenne, Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg, 2016, p. 122-3.
- ⁹⁵ Townsend, Lee et Dan Potter, *Earthworms: Thatch-Busters*, University of Kentucky – College of Agriculture, [Entfact-402](http://entfact-402).
- ⁹⁶ Tsiafouli et coll., « Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe », *Global Change Biology*, vol. 21, 2015, p. 973-985.
- ⁹⁷ Beck, Dwayne, *Managing Agricultural Ecosystems*, Dakota Lakes Research Farm, South Dakota State University.

- ⁹⁸ « Use integrated fertilizer and cropping systems to help manage weeds », *Top Crop Manager*, 29 novembre 1999. <http://www.topcropmanager.com/>
- ⁹⁹ Doornbos, Roger F., Leendert Cornelis van Loon et Peter A. H. M. Bakker, « Impact of root exudates and plant defense signaling on bacterial communities in the rhizosphere. A review », *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 32, 2012, p. 227-243.
- ¹⁰⁰ Stika, Jon, *A Soil Owner's Manual*, p. 30.
- ¹⁰¹ Townsend, Lee et Dan Potter, *Earthworms: Thatch-Busters*, University of Kentucky – College of Agriculture, [Entfact-402](#).
- ¹⁰² Sullivan, Preston, *Sustainable Management of Soil-Borne Plant Diseases*, National Centre for Appropriate Technology: National Sustainable Agriculture Information Service (ATTRA), 2004.
- ¹⁰³ Karlsson, Ida, Hanna Friberg, Christian Steinberg et Paula Persson, « Fungicide Effects on Fungal Community Composition in the Wheat Phyllosphere », *PLOS ONE*, novembre 2014.
- ¹⁰⁴ Kelley, Emily C., « NMSU researcher's carbon sequestration work highlighted in 'The Soil Will Save Us' », *New Mexico State Newsletter*, 7 août 2014.
- ¹⁰⁵ Wilson et coll., « Soil aggregation and carbon sequestration are tightly correlated with the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi: results from long-term field experiments », *Ecology Letters*, vol. 12, 2009, 452-461.
- ¹⁰⁶ Read, David J., Jonathon R. Leake et Jesus Perez-Moreno, « Mycorrhizal fungi as drivers of ecosystem processes in heathland and boreal forest biomes », *Canadian Journal of Botany*, vol. 82, 2004, p. 1243-1263.
- ¹⁰⁷ Johnson, David, Joe Ellington et Wesley Eaton, « Development of soil microbial communities for promoting sustainability in agriculture and a global carbon fix », *PeerJ Preprints*, CC-BY 4.0 Open Access, 13 janvier 2015. <http://dx.doi.org/10.7287/peerj.preprints.789v1>
- ¹⁰⁸ Leifheit, Eva F., « Soil sustainability and arbuscular mycorrhizal fungi », Thèse de doctorat, Freie Universität Berlin, 2014.
- ¹⁰⁹ Rinaudo, Valeria, Paolo Barberi, Manuela Giovannetti et Marcel G.A. van der Heijden, « Mycorrhizal fungi suppress aggressive agricultural weeds », *Plant Soil*, vol. 333, 2009, p. 7-20.
- ¹¹⁰ USDA, NRCS, *Farming in the 21st Century*.
- ¹¹¹ USDA, NRCS, [Grower checklist](#).
- ¹¹² Conant, Richard T., Mark Easter, Keith Paustain, Amy Swan et Stephen Williams, « Impacts of periodic tillage on soil C stocks: A synthesis », *Soil and Tillage Research*, vol. 95, 2007, p. 1-10.
- ¹¹³ Fisher, Madeline, « Sod-based rotations », *Crops & Soils Magazine*, American Society of Agronomy, septembre-octobre 2011.
- ¹¹⁴ Syngenta, « Improving Soil Health and Choosing the Right Cover Crops Can Reduce Soybean Cyst Nematode », 2016.
- ¹¹⁵ Davis, Adam S., Jason D. Hill, Craig A. Chase, Ann M. Johanns et Matt Liebman, « Increasing Cropping System Diversity Balances Productivity, Profitability and Environmental Health », *PLOS ONE*, vol. 7, n° 10, 2012, e47149. [Doi:10.1371/journal.pone.0047149](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047149).
- ¹¹⁶ Thierfelder, Christian et Patrick C. Wall, *The Importance of Crop Rotations*, International maize and Wheat Improvement Centre (CIMMYT).
- ¹¹⁷ Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO), *Cultures couvre-sol : Adaptation et usage des cultures couvre-sol*. http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/facts/cover_crops01/cover.htm
- ¹¹⁸ International Plant Nutrition Institute (IPNI), *4Rs of Nutrient Stewardship*. <http://www.nutrientstewardship.org/4rs>
- ¹¹⁹ Hepperly, Paul, Don Lotter, Christine Ziegler Ulsh, Rita Seidel et Carolyn Reider, « Compost, Manure and Synthetic Fertilizer Influences Crop Yields, Soil Properties, Nitrate Leaching and Crop Nutrient Content », *Compost Science & Utilization*, vol. 17., n° 2, 2009, p. 117-126.
- ¹²⁰ Leu, Andre, *Organics and Soil Carbon: Increasing soil carbon, crop productivity and farm profitability*, présentation à l'occasion d'un atelier à Katanning, mars 2007. www.amazingcarbon.com
- ¹²¹ « Il fut une époque où les végétaux et le bétail cohabitaient sur les mêmes terres, ce qui ne produisant donc aucun surplus de lisier impossible à gérer et assurait qu'il ne soit pas déversé dans la réserve d'eau; de plus, il n'y avait nul besoin de recourir à de telles quantités d'engrais commerciaux. Le génie des agriculteurs américains est démontré dans sa pleine mesure : ils ont réussi à prendre une solution, pour ensuite la diviser en deux problèmes ». Berry, Wendell. *The Unsettling of America: Culture & Agriculture*, 1996, p. 62.
- ¹²² Agriculture et Agroalimentaire Canada, Victoria McPhail, ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario et Jack Kyle, *Rotational Grazing in Extensive Pastures. A Best Management Practice (BMP) Guide*, 2012.
- ¹²³ Hamilton, Lisa S, « The Brown Revolution: Increasing Agricultural Productivity Naturally », *The Atlantic*, 29 septembre 2011.
- ¹²⁴ Pour un exemple spectaculaire en Ontario, consulter l'étude de cas suivante : Islam, Rafiq, Dean C. Glenney et George Lazarovits, « No-till strip row farming using yearly maize-soybean rotation increases yield of maize by 75% », *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 35, 2015, p. 837-846.
- ¹²⁵ Brown, Gabe, présentation d'une (1) heure de Gabe Brown à l'occasion du symposium annuel du Idaho Center for Sustainable Agriculture, « Keys to Building a Healthy Soil », 2014. <https://www.youtube.com/watch?v=gyPjohqYJMK>
- ¹²⁶ Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO), *Estimations provinciales de la superficie, du rendement, de la production et de la valeur agricole de certaines cultures en particulier, 2012-2016* (unités impériales et métriques). http://www.omafra.gov.on.ca/french/stats/crops/estimate_new.htm
- ¹²⁷ USDA/NASS, analyse de l'agriculture dans l'État de New York en 2015.
- ¹²⁸ Les renseignements sur la ferme de la famille Martens sont tirés d'un webinaire enregistré par le Natural Resources Conservation Service (NRCS), du United States Department of Agriculture. Le webinaire est accessible par le lien suivant : <http://www.conservationwebinars.net/webinars/managing-for-soil-health-on-an-organic-farm/?searchterm=None>

- ¹²⁹ Données fournies par la St. Clair Conservation Authority.
- ¹³⁰ « Crops and Conservation », *St. Clair Region Soil and Crop News*, vol. 2, n° 1, mars 2016.
- ¹³¹ Davis, Adam S., Jason D. Hill, Craig A. Chase, Ann M. Johanns et Matt Liebman, « Increasing Cropping System Diversity Balances Productivity, Profitability and Environmental Health », *PLOS|One*, vol. 7, n° 10, octobre 2012.
- ¹³² Knapp, Alex, « These Two Scientists Just Raised \$4 Million to Test Soil Health For Farmers », *Forbes*, 13 juillet 2016.
- ¹³³ Les mesures biologiques de lutte aux organismes nuisibles et aux maladies ont recours aux microbes. Voici un autre exemple : Narisawa et coll., « Effects of Pathogen Density, Soil Moisture, and Soil pH on Biological Control of Clubroot in Chinese Cabbage by *Heteroconium chaetospora* », *Plant Dis.*, vol. 89, 2005, p. 285-290.
- ¹³⁴ Krotz, Dan, « It Takes a Community of Soil Microbes to Protect Plants From Disease », *Berkley Lab Newsletter*, 5 mai 2011.
- ¹³⁵ Pearce, Ralph, « Enhancing the biotechnology of crops with microbials », *Country Guide*, 12 novembre 2015.
- ¹³⁶ Zhang, Sarah, « Pesticides, fertilizers derived from microbes offer new frontier in agriculture », *Genetic Literacy Project*, 22 mars 2016.
- ¹³⁷ Les compagnies agricoles forment aussi des partenariats avec les organismes environnementaux afin d'appuyer les projets liés à la santé du sol. Voir : Enoch, Daniel, « Companies, green groups partner for soil health », *Agri-Pulse*, 31 août 2016.
- ¹³⁸ Natural Resources Conservation Service (NRCS), United States Department of Agriculture (USDA), « 80 Years Helping People Help the Land: A Brief History of NRCS ». <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/>
- ¹³⁹ United States Department of Agriculture (USDA), « Agriculture Secretary Vilsack Announces Climate Smart Agriculture and Forestry Results, Additional \$72.3 Million Soil Health Investment to Support Paris Agreement », *communiqué de presse n° 0112.16*, 12 mai 2016.
- ¹⁴⁰ Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, *Join the 4/1000 initiative*, 2015, p. 2. <http://newsroom.unfccc.int/media/408539/4-per-1000-initiative.pdf>
- ¹⁴¹ Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, *Join the 4/1000 initiative*, 2015, p. 2. <http://newsroom.unfccc.int/media/408539/4-per-1000-initiative.pdf>
- ¹⁴² Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, *Join the 4/1000 initiative*, 2015, p. 2. <http://newsroom.unfccc.int/media/408539/4-per-1000-initiative.pdf>
- ¹⁴³ Pour consulter une bonne discussion sur la façon dont ce projet est censé fonctionner et sur sa faisabilité, voir : Koch, Andrea et coll., « 4/1000 – Soil Carbon to Mitigate Climate Change », *Global Policy Journal*.
- ¹⁴⁴ Voir aussi : Gustin, Georgina, « Looking to the Earth Itself as a Climate Solution », *Inside Climate News*, septembre 2016.
- ¹⁴⁵ Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, *Join the 4/1000 initiative*, 2015, p. 3. <http://newsroom.unfccc.int/media/408539/4-per-1000-initiative.pdf>
- ¹⁴⁶ Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, *Join the 4/1000 initiative*, 2015, p. 3-5. <http://newsroom.unfccc.int/media/408539/4-per-1000-initiative.pdf>
- ¹⁴⁷ La liste des partenaires de l'initiative 4 pour 1000 est accessible sur le site Web <http://4p1000.org/partners>.
- ¹⁴⁸ Basche, Andrea D. et coll., « Soil water improvements with the long-term use of a winter rye cover crop », *Agricultural Water Management*, vol. 172, 2016, p. 40-50.
- ¹⁴⁹ Congreves, K. A., A. Hayes, E.A. Verhallen, L.L. Van Eerd, « Long-term impact of tillage and crop rotation on soil health at four temperate agroecosystems », *Soil & Tillage Research*, vol. 152, 2015, p. 17-28.
- ¹⁵⁰ Van Eerd, Laura L, Katelyn A. Congreves, Adam Hayes, Anne Verhallen et David. C. Hooker, « Long-term tillage and crop rotation effects on soil quality, organic carbon, and total nitrogen », *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 94, 2014, 303-315.
- ¹⁵¹ Ontario Soil and Crop Improvement Association (OSCIA), *Healthy Soil Research First of Kind in North America*, 2016. <http://www.ontariosoilcrop.org/blog/2016/07/26/healthy-soil-research-first-of-kind-in-north-america/>
- ¹⁵² Le taux auquel un sol agricole est en mesure de séquestrer du carbone est un facteur important. Les estimations du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) se situent dans une fourchette de 1,1 à 1,8 tonne d'éq.-CO₂ par hectare par année. Une étude de 2007 sur le potentiel dans l'agriculture canadienne fait état de chiffres moindres pour le centre du Canada : 0,36 tonne d'éq.-CO₂/hectare/année (en passant du labour conventionnel à une méthode sans labour) et 1,1 tonne d'éq.-CO₂/hectare/année (en ayant moins recours à la jachère en été). Ces chiffres sous-entendent-ils que les taux supérieurs de séquestration du carbone dans le sol mesurés par les adeptes de l'approche axée sur la santé du sol tels que Mike Belan et Gabe Brown (4,5 tonnes d'éq.-CO₂/hectare/année et plus) sont inexacts ou simplement que ces derniers font figure d'exceptions? La question est sujette à discussion, et le CEO n'est pas en mesure de fournir une réponse définitive à l'heure actuelle. Toutefois, des données scientifiques récentes semblent venir appuyer la théorie que les estimations actuelles sont possiblement plus représentatives du potentiel du sol à séquestrer le carbone, car les données élevées sur la séquestration du carbone dans le sol publiées de plus en plus dans les revues et les médias pourraient en effet représenter une meilleure idée du potentiel de séquestration du carbone dans le sol. L'aspect clé de cette discussion consiste à comprendre comment sont conçus les modèles actuellement utilisés pour estimer le taux de séquestration du carbone. Voir : Kane, Daniel, « Carbon Sequestration Potential on Agricultural Lands: A Review of Current Science and Available Practices », National Sustainable Agriculture Coalition, novembre 2015.
- ¹⁵³ Li, Xiaomei et Yongsheng Feng, *Carbon Sequestration Potentials in Agricultural Soils*, Alberta Research Council. www.arc.ab.ca
- ¹⁵⁴ Pour consulter une discussion intéressante sur les méthodes agricoles, lire : Pearce, Ralph, « Learning from organic agriculture », *Country Guide*, 9 mai 2016.

-
- ¹⁵⁵ Pour consulter une discussion intéressante sur les enjeux liés au changement des cultures et aux risques, voir : Wilson, Mike, « Soil health just needs one first step », *Farm Futures*, 1^{er} juin 2016.
- ¹⁵⁶ Consultez le document suivant pour trouver l'exemple d'un groupe de gestionnaires de terres en Australie qui se sont regroupés pour fonder une coopérative qui vise à « mieux comprendre et gérer le sol pour en assurer la santé biologique ». Mudgee Microscope Group, « A Case Study: A cooperative approach by land managers to better understand and manage for soil health », *Beyond the Rhetoric*. www.watershedlandcare.com.au.
- ¹⁵⁷ De nombreux tests ont été développés au cours des dernières années pour donner aux agriculteurs une idée générale au moins de ce qu'est la santé du sol. Consultez l'article suivant du *Country Guide* pour lire une discussion qui porte sur ces tests en général : Pearce, Ralph, « A healthier soil test », *Country Guide*, 8 septembre 2016.
- ¹⁵⁸ Pour voir un bon exemple de méthodes d'analyse et d'évaluation de la santé du sol, voir : Al-Kaisi, Mahdi et David Kwaw-Mensah. *Iowa Soil Health Management Manual*, Iowa State University, Extension and Outreach, avec le financement du NRCS, 2016, p. 29-32.
- ¹⁵⁹ Une nouvelle méthode d'analyse de la santé du sol est offerte en Ontario depuis 2016, appelée « SoilOne Report ». Voir : Pearce, Ralph, « Getting down to biology », *Country Guide*, 22 août 2016.
- ¹⁶⁰ De Vries, « The Littlest Farmhands », *Jop. Science*, vol. 349, n° 6249, 2015, p. 680-683.
- ¹⁶¹ Province de l'Ontario, *Plan quinquennal de l'Ontario pour combattre le changement climatique, 2016-2020*.
- ¹⁶² Van Eerd, Laura, « Cornell Soil Health Assessment as a possible soil quality standard for Ontario », rapport de projet soumis à l'organisme Farm and Food Care Ontario, 31 janvier 2015.
- ¹⁶³ L'Australie a déjà un programme exhaustif de crédits de carbone et de compensation. Consultez l'article suivant pour lire une description et une discussion portant sur l'initiative 4 pour 1000 : Koch, Andrea et coll., « 4/1000 initiative— Soil Carbon to Mitigate Climate Change », *Global Policy Journal*.
- ¹⁶⁴ « Carbon Trading Pays for Alberta Farmers », *No-Till Farmer*.
- ¹⁶⁵ « Will it work to pay farmers to sequester carbon? », *Farm and Dairy*, 26 septembre 2016.
- ¹⁶⁶ American Carbon Registry, *Reduced Use of Nitrogen Fertilizer on Agricultural Crops*. Voir : <http://americancarbonregistry.org/carbon-accounting/standards-methodologies/emissions-reductions-through-reduced-use-of-nitrogen-fertilizer-on-agricultural-crops>; Climate Action Reserve, *Nitrogen Management Project Protocol*, vol. 1.1. Voir : <http://www.climateactionreserve.org/how/protocols/nitrogen-management/>; « Quantifying N₂O Emissions Reductions in Agricultural Crops through Nitrogen Fertilizer rate reduction », *Verified Carbon Standard*, vol. 1.1. Voir : <http://database.v-c-s.org/methodologies/quantifying-n2o-emissions-reductions-agricultural-crops-through-nitrogen-fertilizer>.
- ¹⁶⁷ American Carbon Registry, « Changes in Fertilizer Management ». Voir : <http://americancarbonregistry.org/carbon-accounting/standards-methodologies/emissions-reductions-through-changes-in-fertilizer-management>.
- ¹⁶⁸ Pour consulter une bonne discussion sur le potentiel des mesures incitatives, voir : Lovell, Angela, « Counting the full value of farming », *Country Guide*, 14 octobre 2016.
- ¹⁶⁹ Pour consulter une bonne analyse de ce qui doit être fait pour mettre en œuvre l'initiative 4 pour 1000, voir : Chambers, Lal et Paustian, « Soil carbon sequestration potential of US croplands and grasslands: Implementing the 4 per Thousand Initiative », *Journal of Soil and Water Conservation*, mai/juin 2016, p. 68A-74A.