



Organisation des Nations Unies
pour l'alimentation et l'agriculture

CARBONE ORGANIQUE DU SOL

une

richesse
invisible



PARTENARIAT
MONDIAL
SUR LES SOLS

CARBONE ORGANIQUE DU SOL

une richesse invisible

AUTEURS

Lefèvre Clara
Rekik Fatma
Alcantara Viridiana
Wiese Liesl

EDITEURS

Wiese Liesl
Alcantara Viridiana
Baritz Rainer
Vargas Ronald

RÉVISION

Federici Sandro
Taboada Miguel
Cuevas Rosa
Montanarella Luca

DESIGN & PUBLICATION

Sala Matteo
Verbeke Isabelle
Stanco Giulia

TRADUCTION FRANÇAISE

Lefèvre Clara
Ciparisse Gérard
Verbeke Isabelle



Citation recommandée:

FAO 2017. Carbone Organique du Sol: une richesse invisible.

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, Italie.

Les appellations employées dans ce produit d'information et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) aucune prise de position quant au statut juridique ou au stade de développement des pays, territoires, villes ou zones ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

La mention de sociétés déterminées ou de produits de fabricants, qu'ils soient ou non brevetés, n'entraîne, de la part de la FAO, aucune approbation ou recommandation desdits produits de préférence à d'autres de nature analogue qui ne sont pas cités.

Les opinions exprimées dans ce produit d'information sont celles du/des auteur(s) et ne reflètent pas nécessairement les vues ou les politiques de la FAO.

ISBN 978-92-5-209681-8

© FAO, 2017

La FAO encourage l'utilisation, la reproduction et la diffusion des informations figurant dans ce produit d'information. Sauf indication contraire, le contenu peut être copié, téléchargé et imprimé aux fins d'étude privée, de recherches ou d'enseignement, ainsi que pour utilisation dans des produits ou services non commerciaux, sous réserve que la FAO soit correctement mentionnée comme source et comme titulaire du droit d'auteur et à condition qu'il ne soit sous-entendu en aucune manière que la FAO approuverait les opinions, produits ou services des utilisateurs.

Toute demande relative aux droits de traduction ou d'adaptation, à la revente ou à d'autres droits d'utilisation commerciale doit être présentée au moyen du formulaire en ligne disponible à www.fao.org/contact-us/licence-request ou adressée par courriel à copyright@fao.org.

Les produits d'information de la FAO sont disponibles sur le site web de la FAO (www.fao.org/publications) et peuvent être achetés par courriel adressé à publications-sales@fao.org

Photo de couverture ©FAO/Nicoletta Forlano

Cette publication a été imprimée après sélection de produits et procédés assurant un impact environnemental minimal et promouvant la gestion durable des forêts.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé analytique	VI
Remerciements	VIII
Acronymes	IX
1 · Qu'est-ce que le COS ?	1
1.1 · COS: une part spéciale du cycle du carbone global	1
1.2 · COS: un élément de la MOS	3
1.3 · Le sol: une source et un puits de GES à base de carbone	5
1.3.1 · Le dioxyde de carbone	6
1.3.2 · Le méthane	6
1.4 · La séquestration du carbone	7
2 · Rôle du COS dans le bien-être humain	10
2.1 · Atteindre les objectifs pour le développement durable	11
2.2 · COS et biodiversité	12
2.2.1 · Importance de la biodiversité du sol	12
2.2.2 · Perte de biodiversité du sol	13
2.3 · COS, production alimentaire et approvisionnement en eau	14
2.3.1 · Fertilité du sol et production alimentaire	14
2.3.2 · Influence du COS sur la capacité de rétention d'eau et de la porosité du sol	14
2.4 · Effets du changement climatique sur le COS	15
2.4.1 · Effets de l'augmentation de la température et de l'augmentation des précipitations sur les stocks de COS	16
2.4.2 · Effets de l'augmentation de la concentration en CO ₂ dans l'atmosphère	17
2.4.3 · Incertitudes quant aux réponses du COS au changement climatique	17
2.5 · Importance du COS dans le contexte international de l'atténuation et de l'adaptation au changement climatique	20
3 · Quels sont les stocks mondiaux de COS	22
3.1 · Les stocks actuels de COS	23
3.2 · Points stratégiques et points d'importance pour le COS: zones majeures à considérer	25
3.2.1 · Sols noirs	25
3.2.2 · Permafrost	25
3.2.3 · Tourbières	27
3.2.4 · Prairies	28
3.2.5 · Sols de forêts	29
3.2.6 · Zones arides	30
4 · Mesurer, compter, rendre compte et vérifier le COS	32
4.1 · Mesure, rapport et vérification (MRV)	33
4.1.1 · Qu'est-ce que la MRV et quelle est son utilisation ?	33
4.1.2 · Conseils pour le rapport du COS dans les inventaires de GES	34

4.1.2.1 · Utilisation d'une matrice d'utilisation et de changement d'utilisation du territoire	34
4.1.2.2 · Calculs différents pour différents types de sols	35
4.1.2.3 · Différents niveaux d'information: utilisation des niveaux de méthodologie	36
4.2 · Mesurer et contrôler le COS	38
4.2.1 · Mesurer le COS	38
4.2.1.1 · Méthodes de mesure du contenu en COS	38
4.2.1.2 · Calcul des stocks de COS	39
4.2.1.3 · Eléments importants à prendre en compte dans le calcul des stocks de COS.	40
4.2.1.4 · Extrapoler les données de COS	41
4.2.1.5 · Suivre les variations du stock de SOC dans le temps	42
4.2.1.6 · Réseaux de surveillance des sols (RSS)	42
4.2.2 · Difficultés dans la mesure et le contrôle du COS	43
4.2.3 · Vérification des estimations du stock de COS	44
5 · Gestion du COS	46
5.1 · Gestion du COS pour une production alimentaire durable	47
5.2 · Gestion du COS pour limiter et atténuer le changement climatique	48
5.3 · Défis de la séquestration du COS	51
5.3.1 · Obstacles à l'adoption de mesures visant à l'adaptation au changement climatique et à l'atténuation de ses effets	51
5.3.1.1 · Obstacles financiers	51
5.3.1.2 · Obstacles techniques et logistiques	52
5.3.1.3 · Obstacles institutionnels	52
5.3.1.4 · Barrières de connaissances	53
5.3.1.5 · Barrières en termes de ressources	54
5.3.1.6 · Barrières socio-culturelles	54
5.3.2 · Facteurs non humains limitant la séquestration du COS: facteurs abiotiques	55
6 · Et la suite ? Points à examiner	58
Références	60
Annexes	73
Annexe 1 : Méthodes principales pour déterminer la teneur en COS	73
Annexe 2 : Exemples de systèmes actuels de suivi du COS (non exhaustif)	75

ENCADRÉS

Encadré 1 · Sensibilité des zones d'importance en termes de COS face au changement climatique.	18
Encadré 2 · Accords et décisions clés sur le changement climatique en ce qui concerne les sols.	21
Encadré 3 · Calcul des stocks de COS pour différents types de sols.	39
Encadré 4 · Solutions proposées pour surmonter les obstacles.	55

TABLEAUX

Tableau 1 · Vue d'ensemble des principaux organismes du sol en fonction de leur taille.	12
Tableau 2 · Fonctions du sol liées au cycle de l'eau et aux services écosystémiques.	15
Tableau 3 · Revue des estimations de stocks de COS globaux.	24
Tableau 4 · Estimations récentes des stocks de COS dans la région de permafrost.	26
Tableau 5 · Exemple d'une matrice de conversion simplifiée d'utilisation du territoire.	35
Tableau 6 · Différents niveaux pour le suivi du COS.	37
Tableau 7 · Vue d'ensemble des principales méthodes d'extrapolation pour la comptabilisation du COS.	41

FIGURES

Figure 1 · Le COS dans le cycle du carbone global.	2
Figure 2 · Contributions apportées par le COS aux objectifs de développement durable	11
Figure 3 · Impact des décisions de gestion du territoire sur la biodiversité du sol.	13
Figure 4 · Extrapolation spatiale de la vulnérabilité des stocks de COS en fonction de la température.	16
Figure 5 · Estimations issues de modèles des émissions potentielles cumulées dues au dégel du permafrost d'ici 2100, 2200 et 2300.	18
Figure 6 · Diagramme schématique de la rétroaction positive des cycles et de l'expansion des zones arides dues au changement climatique et à la diminution du COS.	19
Figure 7 · Carte la plus récente du contenu en COS à 1 m de profondeur ($\text{MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$).	23
Figure 8 · Répartition des tourbières dans le monde.	27
Figure 9 · Répartition des prairies dans le monde.	28
Figure 10 · Distribution des forêts dans le monde.	29
Figure 11 · Masse de carbone par hectare dans les zones arides.	30
Figure 12 · Sommaire du cadre de travail pour la mesure, rapport et vérification (MRV) du COS.	45
Figure 13 · Stratégies de gestion suggérées et déconseillées pour la séquestration du carbone du sol et leur impact sur la productivité alimentaire, l'adaptation et l'atténuation du changement climatique.	50

RÉSUMÉ ANALYTIQUE

Avec le changement climatique, la dégradation des terres et la perte de biodiversité, les sols sont devenus l'une des ressources les plus vulnérables du monde. Les sols sont un réservoir majeur de carbone. Ils contiennent plus de carbone que l'atmosphère et la végétation terrestre réunis. Cependant, le carbone organique du sol (COS) est dynamique et les actions anthropogéniques sur le sol peuvent en faire un puits ou une source nette de gaz à effet de serre (GES). Bien que d'énormes progrès scientifiques aient été réalisés dans la compréhension et l'explication des dynamiques du COS, la protection et la surveillance des stocks de COS au niveau national et international continuent d'affronter de nombreux défis qui compromettent la mise en œuvre de politiques sur le terrain, qui soient adaptées à chaque région.

Une fois intégré au sol sous forme de matériel organique provenant de la faune et de la flore du sol, le carbone persiste dans le sol pendant des dizaines, des centaines voire même des milliers d'années. Finalement, le COS peut être perdu sous la forme de dioxyde de carbone (CO_2) ou de méthane (CH_4) émis dans l'atmosphère, érodé, ou sous la forme de carbone organique dissous (COD), lessivé vers les rivières ou les océans. Les dynamiques de ces processus soulignent l'importance de quantifier les flux globaux de carbone pour assurer les avantages maximum que peuvent produire le COS pour le bien-être des populations, la production alimentaire, ainsi que pour la régulation de l'eau et du climat.

Le COS est le principal composant de la matière organique du sol (MOS). En tant qu'indicateur de la santé du sol, le COS est important pour ses contributions à la production alimentaire, la réduction et l'adaptation au changement climatique et la réalisation des Objectifs pour le Développement Durable (ODD). Un fort taux de MOS fournit les nutriments aux plantes et améliore la disponibilité de l'eau. Tous deux améliorent la fertilité du sol et conduisent à l'amélioration de la production alimentaire. De plus, le COS améliore la stabilité structurelle du sol en promouvant la formation d'agrégats qui, en association avec la porosité, assurent une aération suffisante et l'infiltration de l'eau qui permettent la croissance des plantes. Avec une quantité suffisante de COS, la capacité de filtration des sols permet une meilleure fourniture en eau potable. Cependant, les sols peuvent devenir une source substantielle de GES vers l'atmosphère lorsque la décomposition du COS est accélérée. Bien que l'impact global du changement climatique sur les stocks de COS soit hautement variable en fonction de la région ou du type de sol, l'augmentation des températures ainsi que la fréquence accrue des événements extrêmes est susceptible de mener à de plus importantes pertes de COS.

Globalement, les stocks de COS sont estimés à environ 1 500 PgC pour le premier mètre de sol, même si leur distribution est spatialement et temporellement variable. Les aires d'importance de COS, respectivement celles où le taux de COS est élevé (comme les tourbières ou sols noirs) ou les larges surfaces à faible taux de COS (comme les terres arides) constituent des zones majeures de préoccupation.

Avec le changement climatique et une mauvaise gestion, ces régions sont susceptibles de devenir des sources nettes d'émissions de GES. Cependant, si elles sont gérées de manière durable, elles ont le potentiel de séquestrer de grandes quantités de carbone dans leurs sols, contribuant ainsi à l'adaptation et l'atténuation du changement climatique.

Dans le cadre de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), des accords internationaux tels que le Protocole de Kyoto et l'Accord de Paris ont posé les règles pour définir des limites quant aux émissions de GES. Une composante de ces efforts, doit consister dans l'établissement d'inventaires précis des émissions dues aux changements de stocks de COS qui devraient être rapportés. Le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) fournit des lignes directrices pour la mesure, le compte-rendu et la vérification des stocks nationaux de COS, tout en suivant le cadre Mesure, Rapport et Vérification (MRV). Ce dernier assure que les inventaires contiennent les critères d'intégralité, de transparence, de cohérence, d'exactitude et de comparabilité. Pour assurer une plus grande spécificité et exactitude, des méthodes améliorées sont nécessaires pour mesurer, prendre en compte, surveiller et rapporter sur ce réservoir spécifique de carbone.

Le changement climatique menace au plus haut niveau la sécurité alimentaire de par son fort impact sur l'agriculture. Il présente des effets négatifs sur les cultures, l'élevage et la production piscicole en entraînant des réductions de rendement, des migrations biologiques et la perte de services écosystémiques qui, à terme, mènent à la réduction des revenus agricoles et à l'augmentation des prix des denrées alimentaires. La séquestration du COS permet cependant d'atténuer ces problèmes tout en offrant une partie de la solution au réchauffement climatique. Par conséquent, un nombre de pratiques permettant de conserver le COS doivent être mises en place de manière à atteindre le potentiel maximum de production alimentaire, ainsi que d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. Cependant, un nombre d'obstacles à l'adoption de ces pratiques existent. Ils peuvent être financiers, techniques/logistiques, institutionnels, de connaissances, de ressources, ou socio-culturels, aussi bien que des interactions entre ces derniers. Lorsque ces barrières sont combinées à des facteurs abiotiques qui restreignent l'accumulation du COS, elles empêchent l'adoption de pratiques favorables à l'atténuation et à l'adaptation au changement climatique. Malgré quelques solutions permettant de dépasser les obstacles humains, le taux d'adoption global de gestion durable des sols reste relativement bas.

Cette publication vise à fournir une vue d'ensemble des principaux faits scientifiques et informations concernant les connaissances actuelles et les lacunes de connaissances sur le COS, pour les preneurs de décision et praticiens. Elle éclaire sur la manière dont une meilleure information et de bonnes pratiques peuvent être mises en place pour soutenir la lutte contre la faim, l'adaptation et l'atténuation du changement climatique et atteindre un développement global durable.

REMERCIEMENTS

La préparation de «Carbone organique du sol: une richesse invisible» a bénéficié du soutien et des apports de plusieurs collaborateurs. Un remerciement spécial revient à (par ordre alphabétique): Martial Bernoux (FAO) et Lucrezia Caon (FAO).

Notre gratitude s'adresse également à la Confédération Suisse, la Commission Européenne, au Ministère des Affaires Etrangères d'Islande, ainsi qu'au Ministère des Affaires Etrangères des Pays-Bas, qui ont financièrement soutenu la publication de cet ouvrage.



ACRONYMES

AFOLU	Agriculture, foresterie et autres affectations des terres
AR	Rapport d'évaluation du GIEC (<i>Assessment report</i>)
C	Carbone
CDN	Contributions déterminées au niveau national
CdP	Conférence des Parties de la CCNUCC
CH ₄	Méthane
CO ₂	Dioxyde de carbone
COD	Carbone organique dissous
COS	Carbone organique du sol
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CNUDB	Convention des Nations Unies sur la diversité biologique
CNULCD	Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification
D _{app}	Densité apparente
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat
GPD	Base de données mondiale sur les tourbières (<i>Global Peatland Database</i>)
ITPS	Groupe technique intergouvernemental sur les sols
MOS	Matière organique du sol
MRV	Mesure, rapport et vérification
N ₂ O	Oxyde nitreux
ODD	Objectifs de développement durable
OMM	Organisation météorologique mondiale
PgC	Pétagrammes de Carbone ¹
PK	Protocole de Kyoto
PMA	Pays les moins avancés
PPN	Production primaire nette
PRG	Potentiel de réchauffement global
QA/QC	Garantie de qualité/contrôle de qualité
RSS	Réseau de surveillance des sols
UT	Utilisation du territoire
Vis-NIR	Infrarouges proches du (seuil) visible
WRB	Base de référence mondiale (<i>World Reference Base</i>)

1 1 PgC = un milliard de tonnes de carbone = 3.7 milliard de tonnes de CO₂ = 1GtC (gigatonnes de carbone)

1 - QU'EST-CE QUE LE COS ?



1.1 · COS: UNE PART SPÉCIALE DU CYCLE DU CARBONE GLOBAL

Le grand cycle du carbone, dans lequel entre le carbone organique du sol (COS), prend en compte le cycle du carbone dans le sol, mais aussi dans la végétation, l'océan et l'atmosphère (Figure 1). On estime le contenu de COS à environ 1 500 PgC entre 0 et 1 mètre de profondeur. Cela représente plus de carbone que ce qui est actuellement contenu dans l'atmosphère (environ 800 PgC) et dans la végétation terrestre (500 PgC) réunis (FAO et ITPS, 2015) (Voir section 3.1 pour plus d'informations sur les réserves de COS). Cette quantité phénoménale de COS n'est pas statique, mais évolue en permanence au travers de cycles entre les différentes réserves de carbone, sous des formes moléculaires diverses (Kane, 2015).

Le dioxyde de carbone (CO_2) et le méthane (CH_4) sont les principaux gaz atmosphériques contenant du carbone. Dans le sol, les organismes autotrophes (principalement les plantes), ainsi que les microbes photo- et chémi-autotrophes synthétisent du CO_2 provenant de l'atmosphère et produisent ainsi du matériel organique. Le matériel organique mort (principalement sous forme de résidus de plantes ou exsudats) est incorporé au sol par le biais de la faune du sol. Au travers de la transformation du matériel organique par les microorganismes hétérotrophes, du carbone supplémentaire est intégré au sol. Ce processus de transformation du matériel organique résulte en une mixture biogéochimique complexe de composés de la litière des végétaux et de produits de la décomposition microbienne à différents degrés de décomposition (Von Lützow *et al.*, 2006; Paul, 2014). Ces produits peuvent être associés aux minéraux du sol ou bloqués au sein d'agrégats, permettant ainsi la persistance du COS dans le sol pendant des dizaines, des centaines, voire des milliers d'années (Schmidt *et al.*, 2011). Lorsque la matière organique du sol (MOS) est décomposée (ou minéralisée) par les microorganismes, du CO_2 est émis en retour dans l'atmosphère. Les exsudats racinaires tels que l'acide oxalique, qui libère des composés organiques à partir d'associations minérales protectrices peuvent aussi entraîner des pertes de carbone (Keiluweit *et al.*, 2015). Finalement, une partie du carbone du sol est aussi exportée vers les rivières et océans sous la forme de carbone organique dissous (COD) ou dans le matériel d'érosion.

En principe, la quantité de COS stockée dans un sol donné dépend d'un équilibre entre la quantité de C qui entre dans le sol et celle qui en sort, comme résultat de la minéralisation microbienne et, dans de moindres proportions, celle qui est lessivée sous forme de COD. A l'échelle locale, du paysage ou de la région, l'érosion ou des dépôts sur le sol peuvent aussi entraîner un gain ou une perte de C, amenant une redistribution du C dans le sol. La quantité de COS stocké est donc principalement contrôlée par la gestion de la quantité et du type de résidus organiques qui entrent dans le sol (c'est-à-dire les apports de C organique dans le système sol) et par la minimisation des pertes du C du sol (FAO et ITPS, 2015).

La température du sol et son contenu en eau sont deux facteurs (principalement déterminés par les conditions climatiques) contrôlant la décomposition de la MOS. Ils influencent grandement le stock de C du sol au travers de leur effet sur l'activité

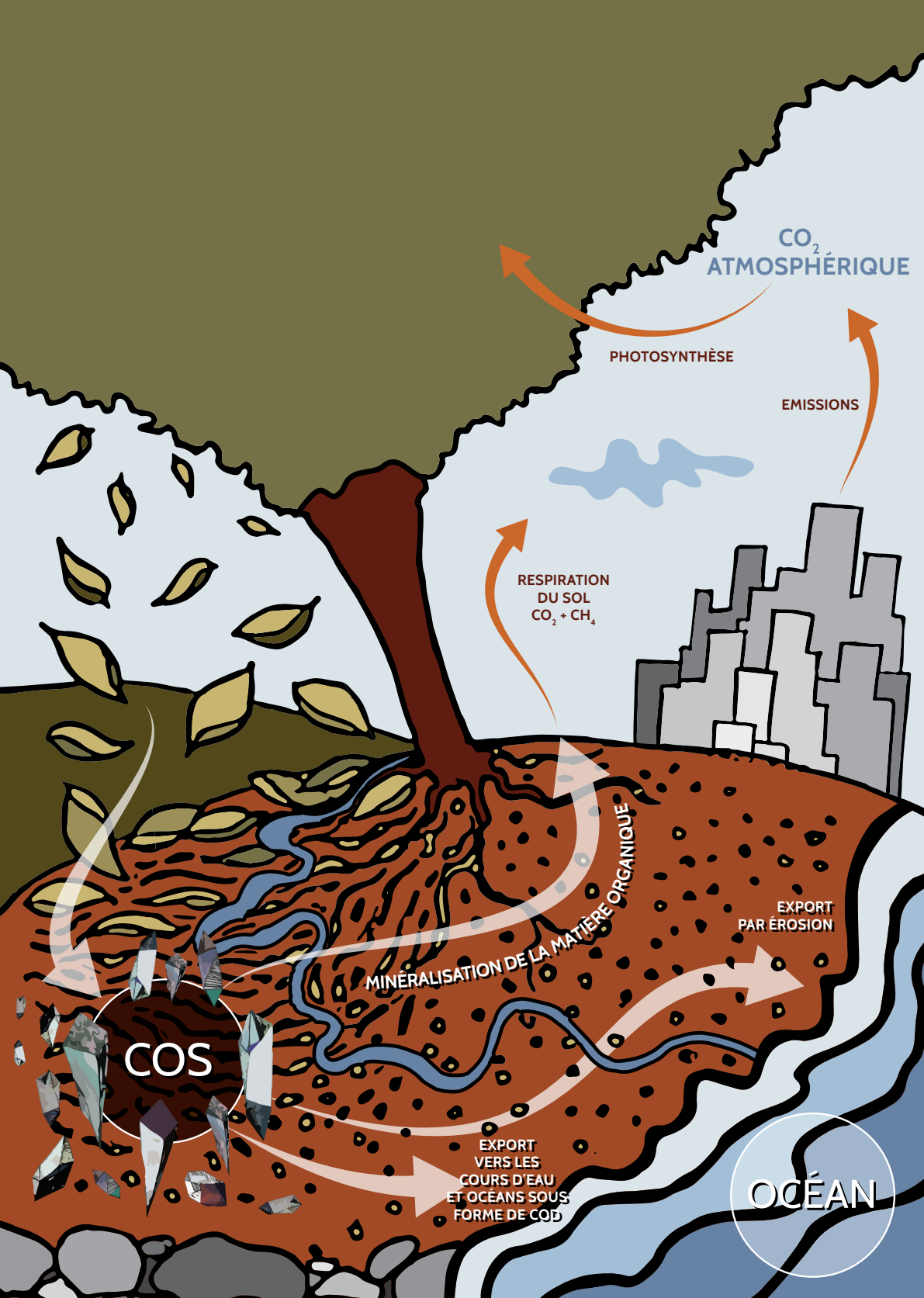


Figure 1 - Le COS dans le cycle du carbone global.

microbienne. La composition de la communauté microbienne (ex: le rapport bactéries/champignons) peut aussi impacter la décomposition de certains composés. La récalcitrance chimique présumée de molécules complexes qui accumulent le COS, comme la lignine ou les lipides, ne contribuent pas substantiellement à la persistance de la MOS dans le sol (Marschner *et al.*, 2008; Thévenot *et al.*, 2010). La persistance de la MOS est plutôt liée à la stabilisation du COS dans la matrice du sol au travers de ses interactions et associations avec les minéraux du sol (Schmidt *et al.*, 2011).

Il est nécessaire de quantifier les flux de carbone globaux pour clarifier, entre autres, si les écosystèmes terrestres fixent plus de CO₂ atmosphérique par photosynthèse qu'ils n'en dégagent vers l'atmosphère par respiration. D'une part, le budget de carbone global est déterminé par la concentration en CO₂ atmosphérique et l'assimilation de CO₂ par les océans et les terres et d'autre part, par les émissions dérivées des émissions d'énergie fossile, de l'utilisation et du changement d'utilisation du territoire. L'estimation la plus récente des niveaux de C a indiqué qu'entre 2006 et 2015, les flux allant des terres vers l'atmosphère étaient deux fois supérieurs à la somme des réserves présentes dans les océans et les terres, avec 90 pour cent de ces émissions issues de carburants fossiles et de l'industrie (Le Quéré *et al.*, 2016). Entre 1750 et 2011, un tiers des émissions de gaz à effet de serre (GES) anthropogéniques avaient pour origine les changements d'utilisation du territoire (GIEC, 2014). Depuis la dernière période glaciaire, les niveaux de CO₂ atmosphériques ont augmenté d'environ 180 à 280 ppm, ajoutant environ 220 ppm PgC à l'atmosphère sur une période de 10 000 ans, soit une augmentation d'environ 4.4 PgC/an (Baldocchi *et al.*, 2016).

Les récentes recherches sur la dynamique du carbone du sol et son influence sur le cycle du carbone global ont permis l'amélioration des connaissances liées 1) à l'importance de l'accessibilité du COS, qui à petite échelle permet le renouvellement du C par les microbes à une profondeur de plus de 20 cm (Trumbore et Czimczik, 2008; Schimel et Schaeffer, 2012; Vogel *et al.*, 2014), 2) aux relations entre les communautés microbiennes, la dynamique et les propriétés inhérentes au sol dans le cycle du carbone et les autres cycles biogéochimiques (Trumbore et Czimczik, 2008; Gärdenäs *et al.*, 2011) et 3) à l'influence de la diversité des végétaux dans l'augmentation de l'activité microbienne et le stockage de C dans le sol (Lange *et al.*, 2015).

1.2 · COS: UN ÉLÉMENT DE LA MOS

La matière organique du sol (MOS) décrit les constituants organiques du sol à différents états de décomposition, comme les tissus provenant de végétaux ou d'animaux morts, d'une taille de moins de 2 mm, et organismes du sol. La MOS joue un rôle critique dans la stabilisation de la structure du sol, la rétention et la libération de nutriments pour les végétaux et le maintien de la capacité de rétention des sols. Elle est ainsi un indicateur clé de la productivité agricole, mais aussi de la résilience environnementale. Le renouvellement de la MOS influence le fonctionnement des écosystèmes et le réchauffement climatique (voir aussi section 2.1). La décomposition de la MOS libère des nutriments minéraux. Ces derniers deviennent disponibles et permettent ainsi la

croissance des végétaux (Van der Wal et de Boer, 2017). Une meilleure croissance des végétaux et une plus grande productivité contribuent ainsi à assurer la sécurité alimentaire.

Différents réservoirs de MOS peuvent être identifiés en fonction du temps nécessaire à sa pleine décomposition et au temps de permanence de ses produits dans le sol (temps de renouvellement) (Gougoulias *et al.*, 2014):

- **Le réservoir actif** - renouvellement en quelques mois ou quelques années;
- **Le réservoir passif** - renouvellement pouvant atteindre le millier d'années.

Une longue période pour le renouvellement des composés du sol ne peut pas seulement s'expliquer par la présence de conditions d'anaérobie, comme dans les tourbières. Elle peut aussi être due à l'incorporation d'éléments de la MOS au sein d'agrégats reliant la matière organique aux surfaces minérales protectrices, à la déconnection spatiale entre la MOS et les décomposeurs et les propriétés biochimiques intrinsèques de la MOS. Les micro agrégats sont considérés comme responsables de la stabilisation des réservoirs passifs (agents stabilisateurs permanents), alors que les macro agrégats et les mottes de terre entourant les petits agrégats (Degens, 1997) sont considérés comme des agents stabilisateurs transitoires (Tisdall et Oades, 1982; Dexter, 1988). La stabilisation physique et chimique de la MOS empêche, à différents degrés, la décomposition microbienne (du fait d'une mobilité restreinte et de l'accès des microbes à la matière organique), ainsi que la diffusion de l'eau, des enzymes et du dioxygène. La stabilisation nécessite une grande diversité d'enzymes microbiennes pour dégrader les macromolécules insolubles que peut comporter la MOS (Van der Wal et de Boer, 2017).

La MOS comporte environ 55 à 60 pour cent de C en masse. Dans de nombreux sols, ce C comprend la majeure partie ou le stock entier de C (designé comme COS) sauf lorsque des formes inorganiques de C du sol surviennent (FAO et ITPS, 2015). Similaire à la MOS, le COS est divisé en plusieurs réservoirs en fonction de sa stabilité physique et chimique (FAO et ITPS, 2015; O'Rourke *et al.*, 2015):

- **Le réservoir rapide** (aussi réservoir labile ou actif) – Après addition de carbone organique frais dans le sol, la biomasse initiale est décomposée au bout de 1 à 2 ans.
- **Le réservoir intermédiaire** - Comprend le carbone organique partiellement stabilisé sur des surfaces minérales et/ou protégé au sein d'agrégats après transformation par les microbes. Le temps de renouvellement est de l'ordre de 10 à 100 ans.
- **Le réservoir lent** (réservoir stable ou réfractaire) – COS hautement stabilisé. Le renouvellement très lent (de 100 à plus de 1 000 ans).

Un réservoir lent additionnel de COS qui est présent dans de nombreux écosystèmes est le COS pyrogénique, formé à partir de biomasse partiellement carbonisée (pyrolysée par exemple) durant des feux sauvages (Schmidt et Noack, 2000). Une portion de ce matériel (souvent désigné comme carbone pyrogénique ou carbone noir) a une structure chimique aromatique hautement condensée qui résiste à la dégradation microbienne et donc persiste dans le sol sur de longues périodes (Lehmann *et al.*, 2015).

La séparation du COS en différents réservoirs est plus conceptuelle que véritablement mesurable et se base sur la facilité du COS à être oxydé ou le degré de stabilisation physique au sein d'agrégats ou encore grâce à l'attache aux minéraux déterminés par des protocoles analytiques. Bien que les réservoirs de COS soient souvent utilisés pour modéliser les dynamiques du carbone, les manières pour concilier les réservoirs « mesurables » et « modélisables » ont rarement été signalées (Zimmermann *et al.*, 2007; Luo *et al.*, 2014). Par conséquent, le COS et la MOS devraient être considérés comme un continuum de matériel organique à toutes les étapes de transformation, de décomposition ou de stabilisation (Lehmann et Kleber, 2015).

La proportion de COS labile sur le total de COS, plutôt que le réservoir total de SOC en tant que tel influence la séquestration du COS et la santé du sol (Blair *et al.*, 1995). Il a été montré que la fraction labile de carbone est un indicateur de propriétés chimiques et physiques clés du sol. Par exemple, cette fraction est le premier facteur contrôlant la décomposition des agrégats dans les Ferrosols (argiles rouges ne se fissurant pas). Elle a été mesurée en déterminant le pourcentage d'agrégats mesurant moins de 0.125 mm dans la croûte de surface après une pluie simulée en laboratoire (Bell *et al.*, 1998, 1999). La fraction résistante ou stable de COS contribue principalement à la capacité du sol à retenir les nutriments (capacité d'échange cationique). Cette fraction de carbone organique se décomposant très lentement, elle est intéressante pour la séquestration du COS à long terme.

1.3 · LE SOL: UNE SOURCE ET UN Puits DE GES À BASE DE CARBONE

Le sol peut être une arme à double tranchant lorsqu'on s'intéresse aux flux de carbone. Les impacts humains sur les sols peuvent en faire des sources ou des puits nets de GES. En tant que source, les sols émettent des GES vers l'atmosphère d'où ils piègent les radiations thermiques, augmentant ainsi l'effet de serre et contribuant au réchauffement global. Les GES à base de carbone émis par le sol sont le CO₂ et le CH₄. Ce sont les deux principaux GES dont l'émission est anthropogénique (GIEC, 2014). L'oxyde nitreux (N₂O) est un autre GES pour lequel les émissions sont devenues de plus en plus anthropogéniques, à cause notamment des sols agricoles et des installations d'élevage. Il est important de prendre en compte ces trois gaz dans le bilan en CO₂ du sol puisque les mécanismes entraînant l'émission de ces gaz et les cycles écosystémiques sont interconnectés (carbone-azote, mécanismes aérobie-anaérobie). L'impact potentiel sur le climat de ces gaz diffère en fonction de leurs efficacités relatives à être un puissant gaz à effet de serre, c'est-à-dire leur potentiel de réchauffement global (PRG). Le CO₂ est considéré comme ayant un PRG de 1, suivi par le CH₄, avec un PRG égal à 28 sur une échelle de 100 ans et le N₂O possédant le PRG sur 100 ans le plus élevé, équivalent à 265 (GIEC, 2014).

1.3.1 · LE DIOXYDE DE CARBONE

Le dioxyde de carbone (CO_2) est le gaz composé de carbone le plus abondant dans l'atmosphère. Pendant 2.1 millions d'années, avant l'ère industrielle, la concentration de CO_2 atmosphérique a fluctué entre 180 et 290 ppm (Hönisch *et al.*, 2009). Sur une base cumulée entre 1750 et 2011, l'augmentation de CO_2 atmosphérique a été de 240 PgC. En 2014, l'abondance de CO_2 atmosphérique a dépassé les 397 ppm, ce qui représente une augmentation de plus de 40 pour cent par rapport à l'ère préindustrielle (Le Quéré *et al.*, 2016). L'augmentation dans la concentration en CO_2 est principalement attribuée à la combustion de combustibles fossiles et aux changements d'utilisation des terres, surtout la déforestation (GIEC, 2014).

Dans les sols, il y a émission de CO_2 vers l'atmosphère lorsque des résidus organiques ou MOS sont oxydés. La respiration du sol désigne le flux de CO_2 respiré par la faune du sol ou par les racines souterraines du sol rejeté vers l'atmosphère et représente le second plus grand flux de carbone terrestre (Raich et Potter, 1995). La respiration du sol varie en fonction des saisons puisqu'elle est contrôlée par des facteurs environnementaux comme la température, l'humidité, le contenu en nutriments du sol et la concentration en dioxygène. L'effet du changement climatique (en particulier l'augmentation de température et la modification des régimes de précipitations) sur la respiration du sol est développé dans la section 2.3.1.

1.3.2 · LE MÉTHANE

Sur la base de son PRG, le méthane (CH_4) est un GES 28 fois plus puissant que le CO_2 (GIEC, 2007). Le CH_4 est émis par les sols au travers d'un mécanisme appelé la méthanogénèse qui apparaît lorsque la matière organique est décomposée en milieu d'anaérobie (dépourvu de dioxygène). Dans de tels environnements, les méthanogènes, la forme de bactérie principale produisant du méthane, utilisent le CO_2 , en plus de la fermentation de l'acétate, à la place du dioxygène comme récepteur final d'électrons des activités métaboliques. Le CH_4 rejeté est donc un coproduit. Les sols détremés, en particulier les zones humides, les tourbières et les rizières, sont les principales sources d'émissions de CH_4 (FAO et ITPS, 2015). En 1998, les émissions mondiales de CH_4 provenant des zones humides étaient estimées à 0.15 Pg/an, desquelles 0.09 Pg/an provenaient de zones humides naturelles et 0.05 Pg/an des rizières. De plus, les inventaires de GES ont signalé que les émissions de CH_4 provenant des rizières avaient augmenté de 0.37 Pg CO_2 eq/an en 1961 à 0.50 Pg CO_2 eq/an en 2010 (FAO et ITPS, 2015).

Cela s'oppose à des sols en mesure d'avoir un remarquable potentiel de stockage des principaux constituants de ces GES (principalement de C; ce mécanisme, appelé séquestration du carbone du sol est discuté section 1.4). En condition d'aérobie (en présence de dioxygène), les bactéries méthanotrophes du sol se développent et utilisent le méthane comme source de carbone dans un mécanisme appelé la méthanotrophie, dans lequel le CH_4 est oxydé. Ainsi, en raison de la grande profondeur de la nappe aquifère qui permet aux bactéries de se développer, les sols de forêt tendent à être de

bons puits à méthane (Serrano-Silva *et al.*, 2014). Le niveau de la nappe aquifère est considéré comme le levier grâce auquel le sol agit comme une source ou un puits de méthane. L'azote et la température sont aussi des facteurs constitutifs du potentiel de séquestration de carbone dans le sol puisqu'ils régulent la quantité d'émission de méthane (Kane, 2015).

1.4 · LA SÉQUESTRATION DU COS

La séquestration du COS est un mécanisme par lequel le carbone atmosphérique est fixé et stocké dans le sol grâce aux plantes ou aux résidus organiques. A partir du CO₂, la séquestration du COS comporte trois étapes: 1) prélèvement de CO₂ dans l'atmosphère via la photosynthèse des végétaux, 2) transfert de carbone du CO₂ en biomasse végétale et 3) transfert du carbone de la biomasse végétale vers le sol dans lequel il est stocké sous forme de COS dans le réservoir le plus instable. Ce réservoir est caractérisé par le plus fort taux de renouvellement (de quelques jours à quelques années) et est composé de résidus de plantes récemment incorporés et est rapidement décomposable par la faune du sol, ce qui génère souvent des émissions de CO₂ en retour dans l'atmosphère (voir aussi section 1.1). Par conséquent, lors de la planification d'actions permettant la séquestration du COS il est impératif de prendre en compte un horizon plus large et de ne pas considérer uniquement la capture de CO₂ depuis l'atmosphère. Cela nécessite de trouver de nouveaux moyens pour retenir le C dans le réservoir lent de carbone. En contraste, la recherche montre que le réservoir stable de C possède un potentiel de séquestration du C négligeable du fait de sa résistance au changement et par conséquent, de son insensibilité à la manière dont est géré le sol (Kane, 2015).

Le carbone nouvellement ajouté peut être stabilisé dans le sol au moyen d'un certain nombre de mécanismes (Six *et al.*, 2002; Six *et al.*, 2006; Jastrow *et al.*, 2007; Kane, 2015). Physiquement, le carbone peut être stabilisé par isolation à l'intérieur des micro et macro agrégats du sol d'où il est inaccessible aux organismes du sol. Chimiquement, le carbone peut être fortement fixé aux argiles par liaisons chimiques, ce qui empêche la consommation de carbone par les organismes. Biochimiquement, le carbone peut être re-synthétisé en des structures moléculaires complexes qui peuvent freiner la décomposition. Ces trois mécanismes dépendent d'un certain nombre de facteurs biotiques, abiotiques et associés à la gestion, qui déterminent l'efficacité de la stabilisation du carbone du sol (Six *et al.*, 2006; Kane, 2015).

Le concept de saturation du carbone du sol implique que le stock de carbone dans le sol peut atteindre une capacité de charge maximale (Six *et al.*, 2002; Stewart *et al.*, 2007). Ce seuil dépend de nombreux facteurs incluant les propriétés intrinsèques et dynamiques du sol et leurs interactions avec des facteurs abiotiques. Il est aussi défini dans la littérature comme la capacité maximum de stabilisation du carbone (Beare *et al.*, 2014). La courbe de stabilisation du carbone du sol ne peut donc pas croître à l'infini, et lorsqu'un niveau de saturation de C est atteint, la séquestration du carbone cesse. Les sols arrêtent de se comporter comme des puits nets de carbone et sont susceptibles de

devenir de nettes sources de carbone. La séquestration du COS a des limites spatiales et temporelles et est un procédé réversible (Paustian *et al.*, 2016). Les sols appauvris en COS ont un très grand potentiel pour acquérir du carbone, mais ont aussi la plus faible propension à le faire. Comme dans le monde, la plupart des sols sont loin d'avoir atteint leur seuil de saturation, il représentent un grand potentiel pour incorporer des apports de carbone en promouvant une gestion qui protège les stocks de carbone existants et maximise la séquestration du carbone dans le sol (Kane, 2015).

En général, le cycle du carbone et la séquestration du carbone sont plus actifs dans les horizons supérieurs du sol, alors que le carbone stable a un taux de renouvellement plus long, ce qui signifie qu'une plus grande proportion de COS se trouve dans les horizons de sol plus profonds (Trumbore, 2009; Rumpel *et al.*, 2012). Beare *et al.* (2014) ont estimé que les plus grandes profondeurs de sol avaient une plus grande capacité à stocker du C supplémentaire que les horizons supérieurs car il y existe une plus grande différence entre le contenu en COS et la valeur de saturation du COS. L'accumulation de C stabilisé avec de longues périodes de présidence dans les horizons profonds de sol peut s'expliquer par un transport continu, des immobilisations temporaires et la fabrication de COD par les microorganismes dans le profil de sol (Kaiser et Kalbitz, 2012) et/ou une stabilisation efficace de la matière organique dérivée des racines dans la matrice du sol (Rasse *et al.*, 2005). Lorenz et Lal (2005) ont estimé que le sous-sol avait le potentiel de stocker 760 à 1 520 Pg de carbone supplémentaire.

Il faut également signaler que l'adjonction de nouvelles sources de C dans les sous-sols doit être effectuée avec précaution car elle risque d'augmenter la minéralisation du COS existant. Néanmoins, augmenter les stocks de COS dans les sous-sols est toujours reconnu comme un moyen prometteur pour assurer une séquestration de C considérable dans les sols (Rumpel *et al.*, 2012).



2 · RÔLE DU COS DANS LE BIEN-ÊTRE HUMAIN



2.1 · ATTEINDRE LES OBJECTIFS POUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE

Comme l'indique clairement le premier principe de la version révisée de la Charte mondiale des sols (FAO, 2015a, p.4),

“Les sols sont une ressource essentielle qui sous-tend la création de tout un éventail de biens et de services inhérents aux écosystèmes et au bien-être de l'homme. Il est donc essentiel de maintenir et de développer les ressources pédologiques pour satisfaire aux besoins fondamentaux de l'humanité du point de vue de la sécurité des approvisionnements alimentaires, hydriques et énergétiques, dans le respect des droits souverains de chaque Etat sur ses propres ressources naturelles. En particulier, avec l'augmentation prévue des besoins à satisfaire en termes d'aliments, de fibres et de carburants pour assurer la sécurité alimentaire et énergétique, les sols seront de plus en plus sollicités.”

Les 17 objectifs du développement durable (ODD) de l'Agenda 2030 pour le développement durable, qui ont été adoptés par les dirigeants mondiaux en septembre 2015 ont identifié la nécessité de restaurer les sols dégradés et d'améliorer la santé des sols.

Maintenir la quantité de carbone en équilibre ou augmenter le contenu en COS afin de tendre à un niveau optimal pour l'environnement local peut contribuer à réaliser les ODD (Figure 2). Cet objectif peut être atteint en libérant le potentiel des services écosystémiques du sol pour permettre non seulement le soutien, le maintien ou l'amélioration de la fertilité et la productivité du sol (nécessaire pour réaliser l'ODD 2 « Faim zéro » et l'ODD 3 « Bonne santé et bien-être »), mais aussi pour stocker et fournir plus d'eau (ODD 3 et ODD 6 « Eau propre et assainissement »), maintenir la biodiversité (ODD 15 « Vie terrestre »), et augmenter la résilience écosystémique face au changement climatique (ODD 13 « Mesures relatives à la lutte contre les changements climatiques »). Dans les sections suivantes, une attention particulière sera attachée à la biodiversité qui prend part à l'ODD 15, à la production alimentaire qui contribue à la réalisation de l'ODD 2 et à l'atténuation du changement climatique, comprise dans l'ODD 13.

Figure 2 · Contributions apportées par le COS aux objectifs de développement durable.



2.2 · COS ET BIODIVERSITÉ

La biodiversité du sol correspond au mélange des organismes vivants dans le sol. Ces organismes interagissent les uns avec les autres ainsi qu'avec les plantes et les petits animaux, le tout formant un réseau d'activité biologique (Orgiazzi *et al.*, 2016). D'une part, la biodiversité du sol contribue grandement à la formation de MOS à partir de la litière organique, contribuant ainsi à l'augmentation du contenu en COS. D'autre part, la quantité et la qualité de MOS (par conséquent de la COS) détermine le nombre et l'activité du biotope du sol qui interagit avec les racines des végétaux. La structure de la communauté microbienne du sol est donc largement influencée par la qualité et la quantité de COS et dans une moindre proportion par la diversité végétale (Thiele-Brunh *et al.*, 2012).

2.2.1 · IMPORTANCE DE LA BIODIVERSITÉ DU SOL

L'importance transversale de la biodiversité a été formalisée lors de la création de la Convention des Nations Unies sur la diversité biologique (CNUDB) en 1992. La biodiversité assure le fonctionnement des écosystèmes et tous les organismes, peu importe leur taille, ont un rôle important à jouer. En 2015, la Charte mondiale des sols a énoncé (FAO, 2015a, p.5) :

“Les sols sont un réservoir essentiel de la diversité biologique mondiale – micro-organismes aussi bien que flore et faune. Cette diversité biologique joue un rôle fondamental dans les fonctions des sols et, par conséquent, à l'appui des biens et des services écosystémiques qui sont associés aux sols. Pour sauvegarder ces fonctions, il faut donc préserver la biodiversité des sols.”

Les organismes du sol sont généralement classés en fonction de leur taille, comme indiqué dans le Tableau 1.

Tableau 1 · Vue d'ensemble des principaux organismes du sol en fonction de leur taille

MODIFIÉ DE ORGIAZZI ET AL., 2016; GARDI AND JEFFERY, 2009.

Taille	Microfaune (De 1 à 100 µm)	Mésafaune (De 100 µm-2 mm)	Macrofaune (Plus de 2 mm)
+ -	Protozoaires	Collemboles	Vers de terre
	Nématodes	Mites	Fourmis
	Champignons	Tardigrades	Cloportes
	Bactéries		Termites

La biodiversité du sol (bactéries, champignons, protozoaires, insectes, vers, et autres invertébrés et mammifères), associée au COS forme la capacité métabolique du sol. Elle joue un rôle crucial dans l'amélioration de la production alimentaire et la résilience du sol face au changement climatique. Le complexe formé par la communauté des organismes du sol i) détermine l'ampleur et la direction des flux de C entre l'atmosphère et le sol (soit en facilitant la séquestration du carbone du sol, soit en augmentant les émissions de GES), ii) participe au cycle du COS et influence de manière déterminante la disponibilité des nutriments (à noter que leur acquisition par les plantes est hautement

efficace lorsqu'elle est doublée d'associations symbiotiques avec les micro-organismes), iii) améliore la structure physique du sol en facilitant l'agrégation, et iv) promeut la lutte biologique contre les parasites et la pollinisation des cultures (FAO et ITPS, 2015).

Le rôle de la macrofaune dans l'accumulation de COS a largement été souligné. Par exemple, les mille-pattes et vers de terre dégradent et transforment les particules de matière organique. Plus généralement, la macrofaune du sol permet le transfert du COS vers de plus grandes profondeurs de sol, où le COS possède un temps de présence plus élevé (Rumpel et Kögel-Knabner, 2011)

2.2.2 · PERTE DE BIODIVERSITÉ DU SOL

Les pertes de biodiversité dans le sol affectent de multiples fonctions écosystémiques, dont la décomposition du COS, la rétention des nutriments et le cycle des nutriments (FAO et ITPS, 2015). De mauvaises pratiques de gestion des terres et des changements environnementaux affectent les communautés vivant sous la surface sur sol et le déclin de biodiversité qui en résulte limite et réduit ces avantages (Figure 3) (Wall *et al.*, 2015).

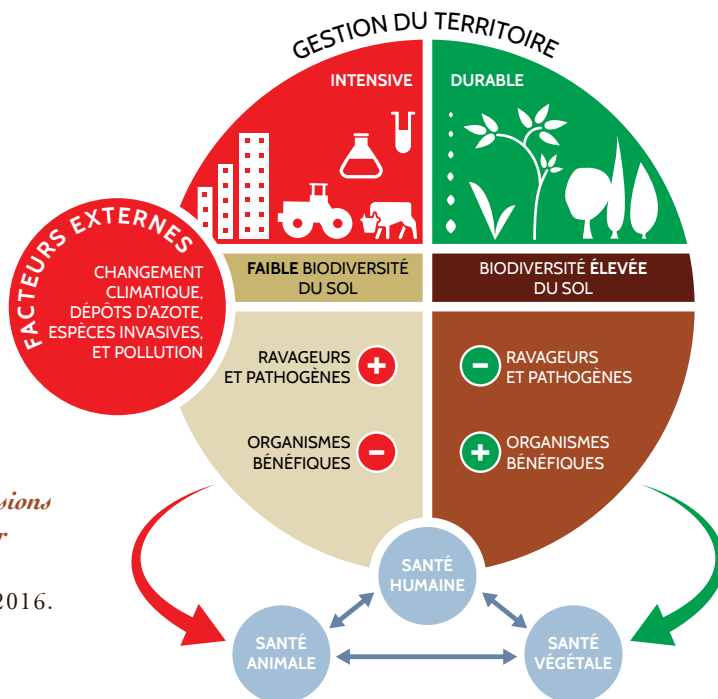


Figure 3 · Impact des décisions de gestion du territoire sur la biodiversité du sol.

Modifié de Wall *et al.*, 2016.

Une gestion agricole non durable telle que pratiquée dans de nombreux agro-écosystèmes (comme la monoculture, l'usage intensif du labour ou les apports chimiques), dégrade le réseau fragile des interactions de communautés entre les ravageurs et leurs ennemis naturels, ce qui influe négativement sur les stocks de COS. Lorsque les pertes de COS ne peuvent pas être complètement expliquées par les propriétés physiques du sol, l'hypothèse qui pourrait être formulée est que la stabilité du COS est dépendante de l'activité et de la diversité des organismes du sol (Gardi et Jeffery, 2009).

Etant donné les pertes actuellement observées au sein de la diversité microbienne du sous-sol, il est important de comprendre les relations entre la biodiversité du sol et

le cycle du C de manière à prévoir de quelle manière ces pertes de biodiversité sous une altération environnementale continue due aux actions humaines impactera les mécanismes du cycle du C global (De Graaf *et al.*, 2015).

Les recherches actuelles indiquent que la biodiversité du sol peut être maintenue et partiellement restaurée si elle est gérée de manière durable. Promouvoir la complexité écologique et la robustesse de la biodiversité du sol au moyen de pratiques de gestion améliorées représente une ressource sous-utilisée qui a le potentiel ultime d'améliorer la santé humaine (Figure 3) (Wall *et al.*, 2015). En ce qui concerne les techniques de gestion des sols propres à atténuer les effets du changement climatique et de s'y adapter dans un contexte de production alimentaire durable, il convient de se reporter à la section 5.

2.3 · COS, PRODUCTION ALIMENTAIRE ET APPROVISIONNEMENT EN EAU

2.3.1 · FERTILITÉ DU SOL ET PRODUCTION ALIMENTAIRE

La fertilité du sol correspond à la capacité du sol à supporter et soutenir la croissance des végétaux, notamment en rendant l'azote, le phosphore, le soufre et d'autres nutriments disponibles pour l'assimilation par les plantes. Ce mécanisme est facilité par 1) le stockage des nutriments dans la MOS, 2) le recyclage des nutriments de la forme organique à une forme minérale disponible pour les végétaux et 3) des mécanismes physiques et chimiques qui contrôlent l'absorption des nutriments, la disponibilité, le déplacement et les éventuelles pertes vers l'atmosphère et l'eau. Les sols gérés représentent un écosystème hautement dynamique. Ce dernier favorise les fonctions du sol et la fourniture en services écosystémiques. En général, la fertilité et le fonctionnement des sols dépendent des interactions entre la matrice minérale du sol, les végétaux et les micro-organismes. Ceux-ci sont responsables de l'accumulation et de la dégradation de la MOS et ainsi de la préservation et de la disponibilité des nutriments dans le sol. Finalement, un cycle équilibré des nutriments dans les sols doit être maintenu pour entretenir les fonctions du sol (FAO et ITPS, 2015).

2.3.2 · INFLUENCE DU COS SUR LA CAPACITÉ DE RÉTENTION D'EAU ET DE LA POROSITÉ DU SOL

La matière organique améliore les agrégats du sol et la stabilité structurelle, qui, de pair avec la porosité, sont importants pour l'aération du sol et l'infiltration de l'eau dans le sol. Même si la croissance végétale et la couverture du sol peuvent aider à protéger la surface du sol, une structure stable, bien agrégée qui résiste à l'imperméabilisation de la surface et continue à infiltrer l'eau lors de pluies intenses diminuera les risques d'inondation en aval. La porosité détermine la capacité du sol à retenir l'eau et contrôle le transfert de l'eau au travers du sol. En plus de la porosité totale, la continuité et la structure du réseau poreux sont importants pour ces fonctions et aussi pour d'autres fonctions telles que la filtration des contaminants (FAO et ITPS, 2015). Les autres fonctions du sol liées à l'eau et leurs

conséquences sur l'amélioration de la qualité de l'eau et la production alimentaire sont répertoriées dans le tableau 2. Enfin, l'eau emmagasinée dans les sols sert de source à 90 pour cent de la production agricole mondiale et représente environ 65 pour cent de l'eau potable mondiale (Amundson *et al.*, 2015).

Tableau 2 · Fonctions du sol liées au cycle de l'eau et aux services écosystémiques

Issu de FAO et ITPS, 2015.

Fonction du sol	Mécanisme	Conséquence	Service écosystémique
Emmagasine (Accumulation)	L'eau contenue dans les pores du sol entretient les communautés végétales et microbiennes	Production de biomasse Protection de la surface	Nourriture Esthétique Contrôle de l'érosion
Permet (Absorption)	L'eau qui s'écoule s'infiltré dans le sol, les excès sont perdus par ruissellement	Réduction du ruissellement	Contrôle de l'érosion Protection contre les inondations
Transmet (Conductivité hydraulique)	L'eau qui pénètre dans le sol est redistribuée et l'excès est transmis par percolation profonde	Percolation dans les eaux souterraines	Recharge de la nappe d'eau souterraine Conservation des écoulements fluviaux
Nettoie (Filtration)	L'eau passant au travers de la matrice du sol interagit avec les particules et le biotope du sol	Les contaminants sont éliminés par dégradation biologique/sites de rétention ou d'absorption	Qualité de l'eau

2.4 · EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE COS

Les projections actuelles suggèrent que face au changement climatique, les réponses du carbone du sol iront de petites pertes à gains modérés. Il est extrêmement difficile de prédire les effets du changement climatique sur les sols, étant donné les interactions complexes entre la température et l'humidité, l'augmentation de la productivité et l'augmentation de la décomposition et les variations dues aux différentes régions et types de sols (FAO et ITPS, 2015; Keestrea *et al.*, 2016).

2.4.1 · EFFETS DE L'AUGMENTATION DE LA TEMPÉRATURE ET DE L'AUGMENTATION DES PRÉCIPITATIONS SUR LES STOCKS DE COS

Les températures et les précipitations sont les facteurs les plus significatifs en matière de contrôle de la dynamique du COS (Deb *et al.*, 2015). Bien qu'une augmentation des températures entraîne une augmentation de la production végétale et donc augmente les apports de carbone au sol, elle tend aussi à augmenter la décomposition microbienne du COS (Keestrea *et al.*, 2016). Une forte conviction empirique véhicule l'idée que l'augmentation des températures stimulera la perte nette de carbone du sol vers l'atmosphère, conduisant à une rétroaction carbone terrestre-climat positive qui pourrait accélérer le changement climatique (Figure 4) (Crowther *et al.*, 2016). De plus, avec le changement climatique, des précipitations et des sécheresses plus fréquentes et plus fortes sont à prévoir, qui pourraient avoir de plus grands impacts sur la dynamique des écosystèmes, comparé à l'effet seul ou combiné de l'augmentation de température et du CO₂ (GIEC, 2014). Cette augmentation de fréquence des événements extrêmes est susceptible d'exacerber la quantité et la vitesse d'érosion, de salinisation et d'autres mécanismes de dégradation, menant à de plus larges pertes de carbone. Au final, le changement climatique, à cause des précipitations, de la température, des microorganismes/biotope et de la végétation peut influencer plusieurs facteurs de formation du sol, affectant ainsi le taux d'accumulation du COS (FAO et ITPS, 2015).

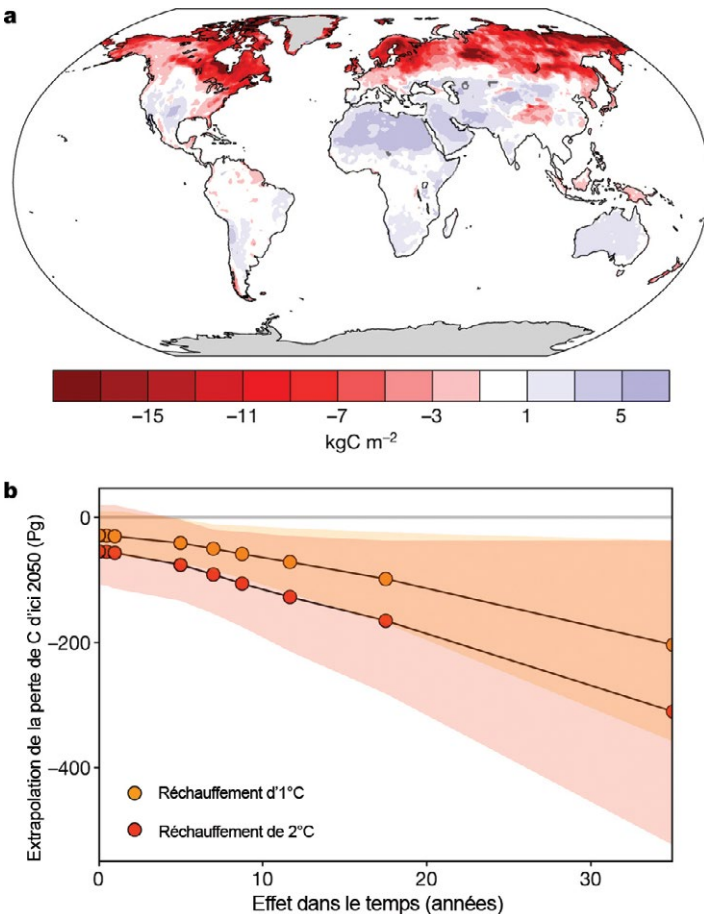


Figure 4 · Extrapolation spatiale de la vulnérabilité des stocks de COS en fonction de la température.

Tiré de Crowther *et al.*, 2016.

a. Carte des changements estimés dans le stock de C du sol (profondeur de 0 à 15 cm) par pixel, d'ici 2050 selon le scénario « pas d'acclimatation » avec une augmentation moyenne des températures à la surface du sol de 1°C.

b. Réductions totales dans le réservoir de C global sous des augmentations moyennes d'1 ou 2°C à la surface du sol d'ici 2050, comme attendu sous différents scénarios d'effets du temps sur le C du sol (axe x). L'effet dans le temps renvoie à la vitesse à laquelle la pleine réponse du C du sol au réchauffement est réalisée. Les zones ombragées indiquent l'intervalle de confiance de 95 pour cent autour de la moyenne des pertes de C (points) pour chaque scénario.

2.4.2 · EFFETS DE L'AUGMENTATION DE LA CONCENTRATION EN CO₂ DANS L'ATMOSPHERE

Les augmentations anthropogéniques de CO₂ atmosphérique peuvent conduire à une augmentation de la production primaire nette (PPN), qui fournit l'apport primaire de carbone au sol, à condition qu'il n'y ait pas de limitation en nutriments et en eau. Il est vraisemblable qu'une telle augmentation de PPN stimule la croissance des végétaux, mais qu'elle entraîne finalement une rétroaction négative sur le CO₂ atmosphérique à cause de l'augmentation des apports en COS (Van Groenigen *et al.*, 2014; Amundson *et al.*, 2015). D'après la théorie du manque progressif en nutriments, la réponse de la PPN face à une augmentation des taux de CO₂ sera limitée par les réserves en nutriments dans le sol et en particulier l'azote. Il reste cependant difficile de savoir si une augmentation de PPN se traduira par une augmentation dans le stockage de COS. Des études d'enrichissement en CO₂ à l'air libre ne mettent souvent en évidence aucun changement en COS malgré une augmentation de la PPN. Ceci est probablement dû à une élévation de la quantité de l'apport en C perdu ou d'une décomposition accélérée du COS par effet primaire (voir section 2.3.3). Au final, l'accumulation de COS liée à des niveaux élevés de CO₂ peut être difficile à mesurer du fait de l'hétérogénéité spatiale dans les réservoirs de COS et de la brève échelle temporelle des expériences, comparée au temps de renouvellement du COS (Todd-Brown *et al.*, 2014).

2.4.3 · INCERTITUDES QUANT AUX RÉPONSES DU COS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

De nombreuses incertitudes demeurent lors de l'établissement de projections sur le comportement du COS comme une fonction du changement climatique. En effet, les conséquences des actions humaines sur le climat global sont encore incertaines, dû en partie à une compréhension limitée de la respiration du sol et de sa représentation dans les modèles du système terrestre (Gougoulas *et al.*, 2014). Il existe par exemple une grande incertitude au sujet de l'effet primaire sur la décomposition de la MOS, qui est l'un des mécanismes cruciaux dans l'équilibre carboné des écosystèmes. L'effet primaire se définit comme une augmentation de la décomposition du stock de COS en résultat de l'addition de composés facilement dégradables (Van der Wal et de Boer, 2017). Cet effet ajoute de l'incertitude à la prédiction des futures réponses du sol à un climat changeant, car son mécanisme est encore peu compris et même peu connu (FAO et ITPS, 2015). Comme souligné par Gougoulas *et al.* (2014), les contributions des microorganismes au changement climatique au travers de rétroactions dans le cycle du carbone sont loin d'être directes et ajoutent de plus grandes incertitudes car des effets directs et indirects agissent simultanément, le tout couplé à des interactions avec d'autres facteurs. En ce qui concerne les microorganismes du sol, de nombreuses questions restent sans réponse au sujet du temps nécessaire pour que les effets du réchauffement soient accomplis et du temps que prendront les communautés du sol pour s'adapter à des environnements plus chauds (Crowther *et al.*, 2016).

ENCADRÉ 1 · SENSIBILITÉ DES ZONES D'IMPORTANCE EN TERMES DE COS FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE.

Les effets du réchauffement climatique dépendent de l'importance du stock de COS, avec des pertes considérables dans les zones de hautes latitudes. Ainsi, la réaction au changement climatique des zones où le COS est présent en grande quantité est inquiétante (FAO et ITPS, 2015). Les zones de permafrost, reconnues posséder les plus grandes réserves permanentes de COS, sont également menacées par le réchauffement climatique (Crowther *et al.*, 2016). Lorsque le dégel a lieu en réaction au réchauffement, les réserves de COS des sols de permafrost, précédemment gelées et donc protégées de la décomposition pendant des millénaires, sont remobilisées et deviennent disponibles pour la décomposition biologique (FAO et ITPS, 2015). De grandes réserves de MOS qui étaient précédemment protégées de la décomposition sont donc susceptibles de devenir disponibles pour la décomposition biologique (minéralisation), menant à une élévation des flux de GES vers l'atmosphère (Figure 5) (Tarnocai *et al.*, 2009; Hugelius *et al.*, 2013; Hugelius *et al.*, 2014; FAO et ITPS, 2015; Batjes, 2016). De manière similaire, les tourbières sont aussi susceptibles d'être très sensibles au changement climatique, du fait de l'augmentation de l'évapotranspiration en réponse à l'élévation des températures. En effet, lorsque ces sols se réchauffent, ou s'ils deviennent plus secs, de grandes quantités de carbone sont susceptibles d'être perdues (Keestrea *et al.*, 2016).

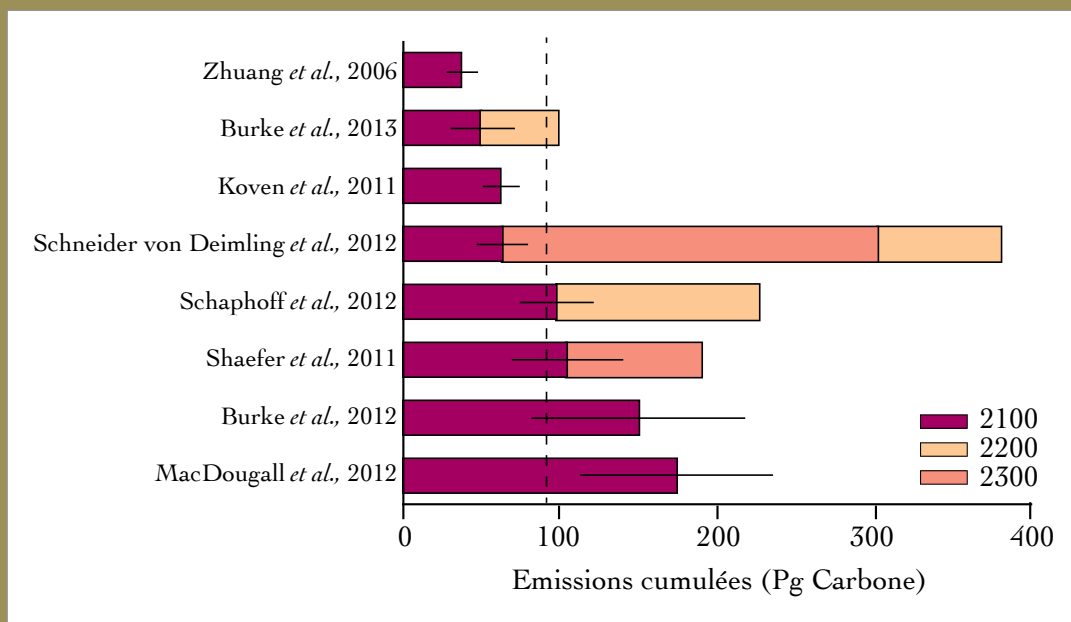


Figure 5 · Estimations issues de modèles des émissions potentielles cumulées dues au dégel du permafrost d'ici 2100, 2200 et 2300.

Tiré de Schuur *et al.*, 2015

Toutes les estimations, mises à part celles de Schaphoff *et al.* (2013) et Schaefer *et al.* (2011) sont basées sur les scénarios les plus pessimistes du GIEC en termes d'atténuation du changement climatique (Profil représentatif d'évolution de concentration (RCP) 8.5 dans le cinquième rapport d'évaluation (AR5, 2013) et A2 dans l'AR4 (2007)). Les barres d'erreurs reflètent les incertitudes pour chaque estimation. Elles sont basées sur un ensemble de simulations considérant différents niveaux de réchauffement pour chaque scénario et différentes quantités de C initial gelé dans le permafrost. La ligne verticale en pointillés indique la moyenne de tous les modèles sous la trajectoire courante de réchauffement d'ici 2100 (Schuur *et al.*, 2015).

En conséquence du changement climatique, il faut s'attendre à ce que les zones arides s'étendent et que leurs stocks de COS soient réduits (Figure 6). De plus hautes températures mèneront à un plus grand déficit de pression de vapeur et à une demande évaporatoire ainsi qu'à une plus faible humidité du sol, qui pourront conduire à un impact encore plus fort des températures extrêmes. L'augmentation moyenne de température devrait être la plus significative dans les zones arides, environ 1.8 fois plus grande que l'augmentation attendue dans les régions humides. De plus, le stockage de COS diminue avec l'augmentation des températures, mais augmente avec l'augmentation de la teneur en eau du sol (décrit en section 2.4). Au final, l'érosion provoquée par la dégradation des terres mène aussi à des émissions de carbone (Huang *et al.*, 2015).

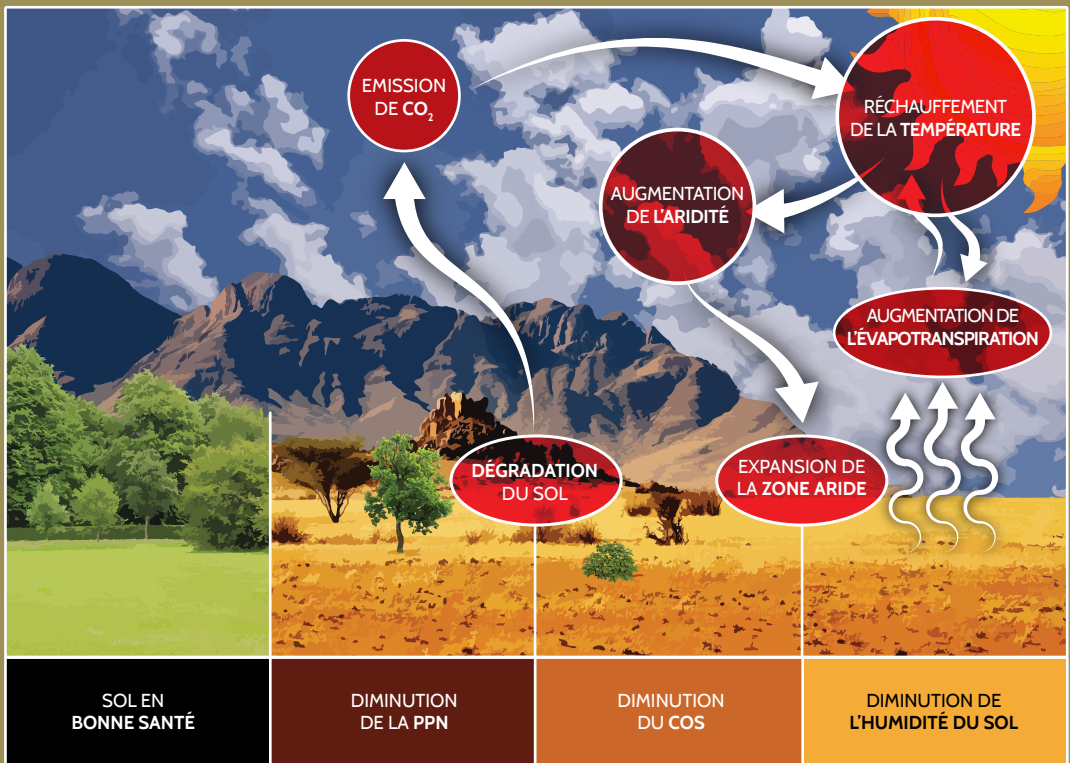


Figure 6 · Diagramme schématisé de la rétroaction positive des cycles et de l'expansion des zones arides dues au changement climatique et à la diminution du COS.

Modifié de Huang *et al.*, 2015

2.5 · IMPORTANCE DU COS DANS LE CONTEXTE INTERNATIONAL DE L'ATTÉNUATION ET DE L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le changement climatique a été au centre de divers accords internationaux depuis les années 1980 (Encadré 2). Les sols, qui constituent le plus grand réservoir de carbone sur terre, sont pris en compte dans un certain nombre de ces accords (voir section 1.1). Par conséquent, à l'avenir, les émissions de GES en provenance des sols devront être davantage étudiées pour permettre un meilleur compte-rendu des inventaires nationaux de GES à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et à l'accord de Paris.

Il est crucial d'avoir de bonnes connaissances de l'actuel stock global de COS et de sa distribution spatiale pour informer les différents acteurs (exploitants agricoles, décideurs politiques, utilisateurs des terres...) afin qu'ils puissent utiliser la terre de la meilleure façon qu'il soit et leur fournir les meilleures opportunités pour la limitation et l'adaptation aux effets du changement climatique, mais aussi pour assurer une production alimentaire et une provision suffisante en eau.



ENCADRÉ 2 · ACCORDS ET DÉCISIONS CLÉS SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE EN CE QUI CONCERNE LES SOLS.

- 1988: Création du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement.
- 1992: Conférence de Rio sur l'environnement et le développement et adoption des trois Conventions des Nations Unies (CNULCD, CCNUCC, CNUDB).

ARTICLE 4 DE LA CCNUCC:

Toutes les Parties établissent, mettent à jour périodiquement, publient et mettent à la disposition de la Conférence des Parties (COP), des inventaires nationaux des émissions anthropiques par leurs sources et de l'absorption par leurs puits† (...) [incluant le CO₂, CH₄ et N₂O] et établissent, mettent en œuvre, publient et mettent régulièrement à jour (...) des mesures visant à atténuer les changements climatiques (...) ainsi que des mesures visant à faciliter l'adaptation voulue aux changements climatiques.

- 1997: adoption du Protocole de Kyoto (PK)

L'ARTICLE 3 DU PK PREND EN COMPTE L'ATTENUATION:

Les variations nettes des émissions de GES par les sources et de l'absorption par les puits† résultant d'activités humaines directement liées au changement d'affectation des terres et à la foresterie depuis 1990, variations qui correspondent à des variations vérifiables des stocks de carbone (...) sont notifiées de manière transparente et vérifiable.

- 2015: Signature de l'Accord de Paris
- 2016: Entrée en vigueur de l'Accord de Paris

ARTICLE 4:

En vue d'atteindre l'objectif de température à long terme énoncé à l'article 2, les Parties cherchent à parvenir au plafonnement mondial des émissions de GES dans les meilleurs délais et à opérer des réductions rapidement par la suite, de façon à parvenir à un équilibre entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits† de GES au cours de la deuxième moitié du siècle;

Chaque Partie établit, communique et actualise les contributions déterminées au niveau national (CDNs) successives qu'elle prévoit de réaliser. Les Parties prennent des mesures internes pour l'atténuation en vue de réaliser les objectifs des dites contributions.

ARTICLE 13:

Chaque Partie fournit régulièrement un rapport national d'inventaire des émissions anthropiques par les sources et des absorptions anthropiques par les puits† de GES.

- Mars 2017: 192 Parties prenantes ont ratifié le Protocole de Kyoto et 197 adhèrent à la CCNUCC; 133 Parties ont ratifié l'Accord de Paris.

† Les sols sont visés, étant les plus grands réservoirs de carbone sur Terre.



©FAO/Ronald Vargas

3 - QUELS SONT LES STOCKS MONDIAUX DE COS ?

3.1 · LES STOCKS ACTUELS DE COS

L'ampleur du stockage de COS est spatialement et temporellement variable et déterminé par différents facteurs biotiques et abiotiques (Weissert *et al.*, 2016). Globalement, les plus grandes réserves de COS sont situées dans les points stratégiques tels que les zones humides et les tourbières, qui se trouvent surtout dans les régions de permafrost ou dans les tropiques (Gougoulias *et al.*, 2014; Köchy *et al.*, 2015). Dans les horizons de sols enterrés (>2 m) ou suite à des mécanismes volcaniques, éoliens, alluviaux, colluviaux, glaciaux, ou anthropogéniques, la teneur en SOC peut être également importante (O'Rourke *et al.*, 2015) (Figure 7).

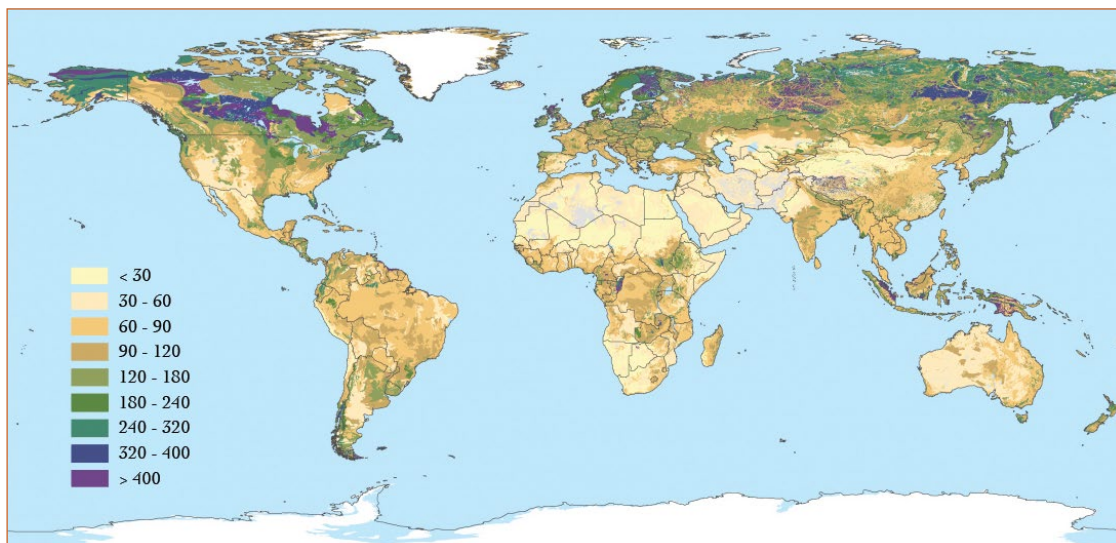


Figure 7 · Carte la plus récente du contenu en COS à 1 m de profondeur (MgC.ba⁻¹).

Tiré de Batjes, 2016.

Note: 1 Mg = 1 t = 10⁹ Pg.

Des informations supplémentaires sur la méthode de calcul des stocks sont indiquées dans le Tableau 2 de la page suivante.

Bien que les stocks de COS mondiaux aient été estimés à environ 1 500 PgC pour le premier mètre de sol (FAO et ITPS, 2015), le tableau 3 rend compte de la variabilité des estimations de COS au cours du temps et en fonction des différents moyens de calculs et méthodes utilisés. Même les cartes de COS mondiales les plus récemment publiées sont basées sur des données historiques collectées sur de longues périodes de temps plutôt que sur des données obtenues à partir d'observations actuelles ou récentes.

Tableau 3 · Revue des estimations de stocks de COS globaux

Référence	Stock de COS (PgC)				Méthode
	0-30cm	0-100cm	0-200cm	0-300cm	
Batjes (1996)	684-724	1 462- 1 548	2 376- 2 456		Base de données géo-référencée (WISE1 – 4 353 profils de sol) + DSMW ²
Jobbágy et Jackson (2000)		1 502	1 993	2 344 ³	2 721 profils de sol groupés par biomes. NSCD ⁴ , WISE et une base de données provenant du service canadien des forêts ⁵
Groupe de travail sur les données mondiales du sol (2000) – Programme international géosphère-biosphère		1 550 (SOC stock x grid cell area)			Données WISE (v.1 – 1 125 profils) + DSMW
Hiederer and Köchy (2011)		1 417			HWSD6 version 1.1
Scharlemann <i>et al.</i> (2014)		1 461 (504-3 000)			Revue de publications allant de 1951 à 2011
Shangguan <i>et al.</i> (2014)		1 455	230 cm: 1 923		DSMW et bases de données nationales/régionales
Köchy <i>et al.</i> (2015)		1 062			HWSD + masse volumique ajustée pour les sols organiques
		1 325			HWSD + masse volumique ajustée pour les sols organiques + améliorée pour les tourbières
Batjes (2016)	755	1 408	2 060		Base de données WISE30sec + HWSD v.1.2 adaptée

1 Inventaire mondial des émissions potentielles du sol;

2 Carte numérique des sols du monde, 1961-1981 publiée conjointement par l'Union internationale des sciences du sol, la FAO et l'UNESCO;

3 D'après Tarnocai *et al.* (2009), cette valeur est susceptible de sous-estimer la masse totale de matériel organique stocké dans les régions de permafrost;

4 Base de données de caractérisation nationale du sol, produite et mise à jour par le Département d'agriculture des États-Unis (1994). Caractérisation de 5 307 profils à travers le monde;

5 Importance donnée aux sols de forêt et de toundra (1997);

6 Base harmonisée de données mondiale sur les sols, fondée sur la DSMW avec des révisions sur l'information du sol dans le monde. Version 1.1 publiée en 2009 et version 1.2, en 2012.

3.2 · POINTS STRATÉGIQUES ET POINTS D'IMPORTANCE POUR LE COS: ZONES MAJEURES À CONSIDÉRER

La distribution du COS est très hétérogène et très fortement dépendante du type de sol, de l'utilisation de la terre et des conditions climatiques. Pour certains types de sols et pour certaines utilisations du territoire, le stockage de COS est très important. Même si elles recouvrent une fraction relativement réduite de la surface terrestre globale, ces zones requièrent une attention particulière: elles sont des concentrations stratégiques de COS. Ces points critiques sont très sensibles au changement climatique et peuvent facilement devenir des sources d'émissions de GES en raison de leur haute teneur en COS (Encadré 1). Au contraire, de grandes étendues caractérisées par une faible teneur en COS au km² représentent un potentiel pour la séquestration du carbone: ils sont des points susceptibles d'emmagasiner des quantités importantes de COS.

3.2.1 · SOLS NOIRS

Les sols noirs, définis de manière globale comme des sols possédant un horizon mullique, couvrent environ 7 pour cent de la surface des terres émergées (916 million d'ha). La plupart sont présents dans trois régions de l'hémisphère nord et dans une région au sud de l'équateur. Les sols noirs se sont développés sur des zones naturelles comme les prairies ou steppes où se manifestent des conditions d'alternance entre été secs et gels (Altermann *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2012). Ces sols sont de couleur marron foncé à noirs en raison de leur forte teneur en humus de haute qualité et leur profondeur peut aller jusqu'à plus de 40 cm, généralement jusqu'à 60 à 80 cm. Cet humus de haute qualité est le résultat d'une importante saturation en bases (c'est-à-dire qu'un fort pourcentage de la capacité d'échange cationique est occupé par les cations basiques Ca²⁺, Mg²⁺ et K⁺), une structure stable en agrégats et un mélange biologique intensif (bioturbations par les vers de terre par exemple) (Altermann *et al.*, 2005). Dans la base de référence mondiale (WRB) pour les ressources en sol, les sols noirs comprennent les tchernozems, kastanozems et phaeozems. Pour les tchernozems, la teneur en COS est comprise entre 2.9 et 3.5 pour cent dans les premiers 10 cm, et dépasse les 1.2 pour cent à la limite inférieure de l'horizon chernique (FAO et ITPS, 2015). Due à leur haute productivité, la plupart de ces sols sont utilisés de manière intensive pour l'agriculture. Cependant, ils sont très sensibles à la dégradation (érosion, encroutement et appauvrissement en éléments nutritifs) et le COS doit être géré avec attention pour conserver le potentiel productif de ces sols (Liu *et al.*, 2012).

3.2.2 · PERMAFROST

Les faibles températures et l'engorgement en eau dans les sols de permafrost réduisent les taux de décomposition et augmentent les cryoturbations, conséquence de l'alternance gel-dégel qui se manifeste dans ces zones. De plus, des environnements sédimentaires remontant à l'ère du Pléistocène ont engendré l'accumulation d'importantes quantités

de COS dans la couche active et sous-jacente au permafrost (Hugelius *et al.*, 2013; Ping *et al.*, 2015). L'accumulation de COS dans ces sols les rend importants pour le système climatique mondial en raison de leur potentiel à dégeler et ainsi à décomposer la matière organique accumulée au cours d'une longue période (Encadré 1) (Ping *et al.*, 2015). Bien que la répartition des zones de permafrost soit globalement connue, les estimations de COS dans les régions de permafrost restent très variables (Tableau 4). Cependant environ 30 pour cent des stocks de COS totaux à 2 m de profondeur se trouvent en contenus dans la région circumpolaire nordique et la région de permafrost contient deux fois plus de carbone que ce qui est actuellement contenu dans l'atmosphère (Schuur *et al.*, 2015).

Tableau 4 · Estimations récentes des stocks de COS dans la région de permafrost

Référence	Stocks de COS (PgC)			Méthode
	0-30cm	0-100cm	0-300cm	
Tarnocai <i>et al.</i> , Pan	191	496	1 024	Région de permafrost circumpolaire nordique en utilisant la NCSCDB ¹
Hugelius <i>et al.</i> , 2014	217 ± 12	472 ± 27	1 035 ± 150	Même méthodologie que Tarnocai <i>et al.</i> (2009), mais en utilisant des données plus complètes et révisées provenant de Hugelius <i>et al.</i> (2013)

¹ Base de données du carbone du sol circumpolaire nordique – inclut des données issues de profils de sols non insérées dans le HWSD.

3.2.3 · TOURBIÈRES

Les tourbières sont des écosystèmes humides caractérisés par l'accumulation de matière organique (tourbe) dérivée de matériel végétal mort et en décomposition sous des conditions de saturation en eau permanente (Parish *et al.*, 2008; Orgiazzi *et al.*, 2016). Les tourbières et les sols organiques contiennent 30 pour cent du carbone du sol mondial mais ne couvrent que 3 pour cent de la surface émergée du globe (3.8 Mm² d'après la base de données mondiale sur les tourbières – GPD) répartis dans 180 pays du monde. La plupart d'entre eux sont présents dans les régions de permafrost et dans les tropiques. Là-bas, la haute productivité végétale se combine avec une faible vitesse de décomposition en conséquence de fortes précipitations et humidité (Figure 8) (Parish *et al.*, 2008; FAO, 2012; Klingenfuß *et al.*, 2014). D'après la GPD, les tourbières, dont la profondeur est généralement égale ou supérieure à 30 cm, contiennent une masse globale de COS de 447 PgC pour leur profondeur totale, même si les incertitudes en ce qui concerne cette estimation restent élevées (Köchy *et al.*, 2015). En particulier, les incertitudes concernant la profondeur des tourbières restent le principal obstacle pour estimer la taille des réservoirs de C régionaux et mondiaux des tourbières. La profondeur moyenne globale estimée des tourbières, de 2.3 m est incertaine et, pour de nombreuses régions, l'information sur la profondeur des tourbières est absente, ce qui contribue à augmenter les incertitudes quant au stockage de carbone dans les tourbières (Buffam *et al.*, 2010).

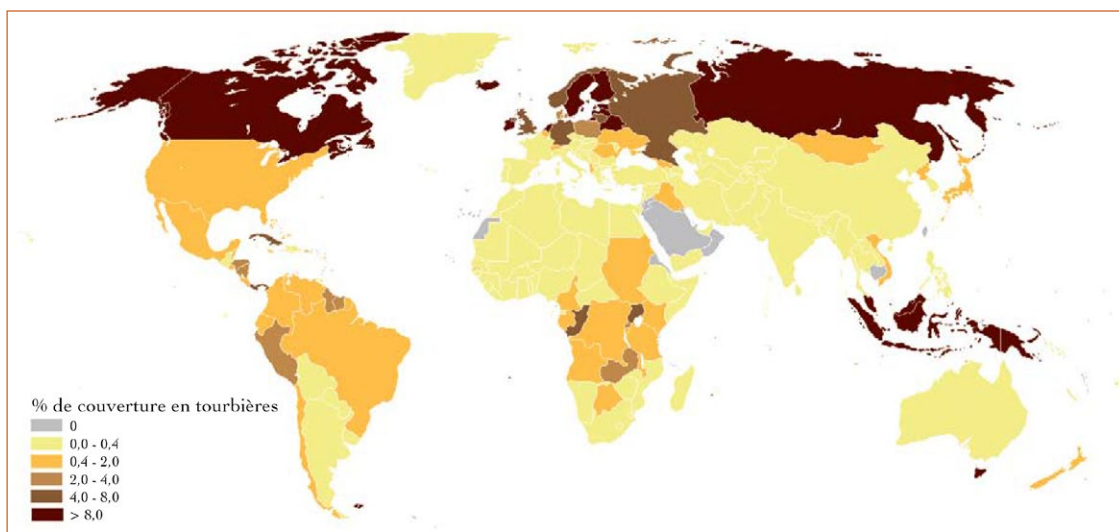


Figure 8 · Répartition des tourbières dans le monde.

Issu de Parish *et al.*, 2008

3.2.4 · PRAIRIES

Les prairies, qui prennent en compte les zones de parcours, arbustives, de pâturage et de cultures semées avec des cultures fourragères ou de pâturages, couvraient approximativement 3.5 milliards d'hectares en 2000 (Figure 9). Les prairies recouvrent environ 40 pour cent de la surface émergée mondiale (McSherry et Ritchie, 2013; Orgiazzi *et al.*, 2016), et représentent 70 pour cent de la surface agricole mondiale. Les prairies contiennent environ 20 pour cent des stocks mondiaux de COS (FAO et ITPS, 2015). Environ 20 pour cent des prairies naturelles originelles ont été converties en cultures et des proportions significatives de la production de bovins laitiers (27 pour cent) ou allaitants (23 pour cent) concernent des prairies gérées pour ces seuls objectifs. Le secteur du bétail (largement basé sur l'exploitation des prairies) fait vivre environ 1 milliard des personnes les plus pauvres au monde et fournit un tiers de l'apport mondial en protéines. Une des raisons pour l'utilisation intensive des prairies est leur grande fertilité naturelle. Les prairies ont de manière inhérente, une grande teneur en COS, de 333 Mg.ha⁻¹ en moyenne. Cependant, l'évaluation de la dégradation des terres dans les zones arides (LADA : Land Degradation Assessment in Drylands) estime qu'environ 16 pour cent des zones de parcours sont actuellement dégradées (Conant, 2010).

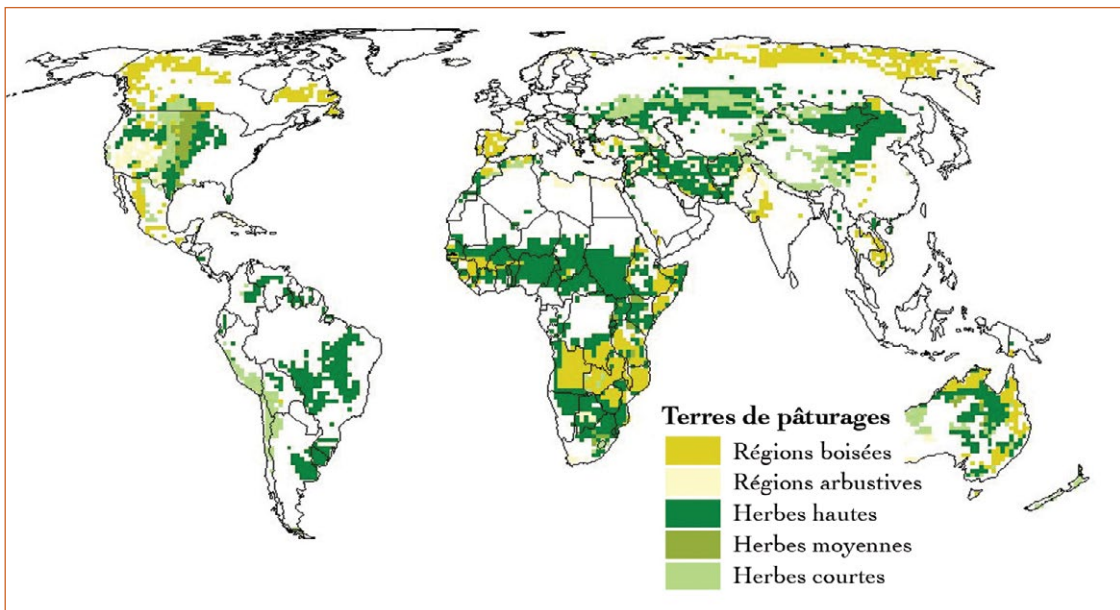


Figure 9 · Répartition des prairies dans le monde.

Tiré de Conant, 2010.

3.2.5 · SOLS DE FORÊTS

4.03 milliards d'ha sont couverts par de la forêt dans le monde, ce qui représente approximativement 30 pour cent des surfaces émergées du globe. La majorité du carbone du sol se concentre dans les tourbières des forêts boréales et tropicales dans l'Asie du Sud-est (Figure 10) (Pan *et al.*, 2013). La végétation forestière et les sols contiennent environ 1 240 PgC et le stock de carbone varie largement au travers des différentes latitudes. Sur la totalité du stock de C mondial dans le biome forestier, 37 pour cent se trouve dans les forêts de basse latitude, 14 pour cent dans les forêts de moyenne latitude et 49 pour cent dans celles de hautes latitudes. Le stock de COS est susceptible de comprendre jusqu'à 85 pour cent du stock de C terrestre dans les forêts boréales, 60 pour cent dans les forêts tempérées et 50 pour cent dans les forêts tropicales. Une grande partie du stock total de COS se trouve dans les sols de toundra, pré-toundra et régions de taïga. Le contenu en COS des sols de forêt peut aller de 0 pour cent pour des sols très jeunes à plus de 50 pour cent dans certains sols humides ou organiques, avec la plupart contenant entre 0.3 et 11.5 pour cent dans les 20 premiers centimètres pour les sols minéraux (Lal, 2005). Dans le monde, la déforestation cause environ 25 pour cent des pertes totales de COS (FAO et ITPS, 2015).

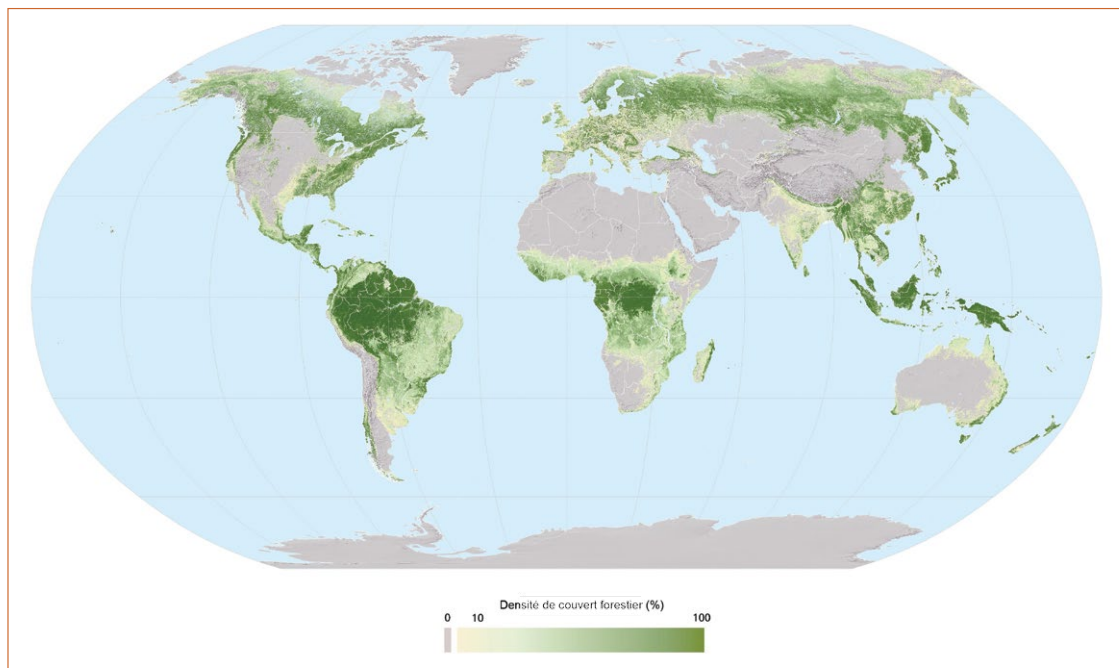


Figure 10 · Distribution des forêts dans le monde.

Tiré de FAO, 2010

3.2.6 · ZONES ARIDES

Les zones arides couvrent environ 430 millions d'hectares, soit 40 pour cent de la surface terrestre (Figure 11) (FAO et ITPS, 2015). Même si les limites ne sont pas claires, les zones arides sont considérées comme étant des zones où les précipitations moyennes sont inférieures aux pertes d'humidité potentielles dues à l'évaporation et la transpiration (FAO, 2004). Les sols des zones arides sont caractérisés par des contraintes hydriques fréquentes, une faible teneur du sol en matière organique et en nutriments. Cependant, le carbone qu'ils contiennent représente plus d'un tiers du stock global, principalement dû à leur large surface et au stockage de COS sur le long terme (lorsque le sol n'est pas dégradé), plutôt qu'au couvert végétal. Les zones arides possèdent le potentiel pour contenir plus de carbone, puisqu'ils sont loin d'être saturés (Nations Unies, 2011), mais le stockage de carbone dans les zones arides est affecté et limité par différents éléments bioclimatiques et se produit lentement. De plus, ces terres sont sujettes à divers types de dégradation, dont l'érosion par le vent et certaines pratiques de gestion peuvent par conséquent facilement entraîner une dégradation. Ainsi, les sols des zones arides doivent être gérés de manière durable pour maintenir leurs niveaux actuels en COS et renforcer leur potentiel de séquestration de COS (Nations Unies, 2011; FAO et ITPS, 2015).

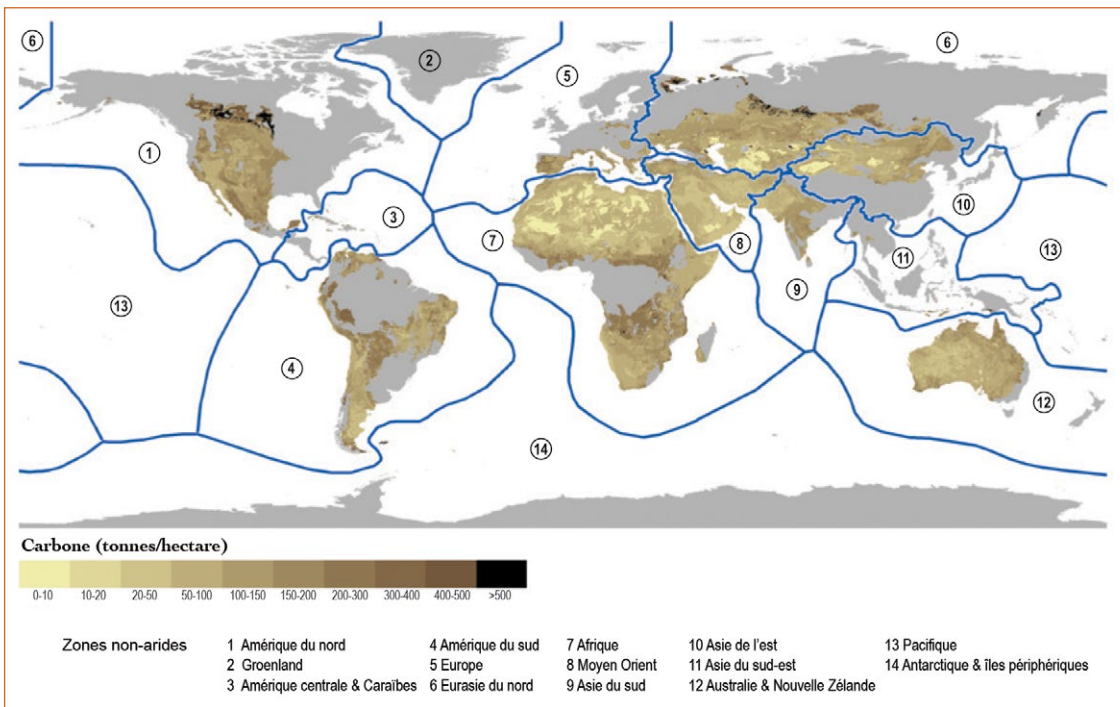


Figure 11 · Masse de carbone par hectare dans les zones arides.

Tiré de Nations Unies, 2011.





©FAO/ Hoang Dinh Nam

4 · MESURER, COMPTER, RENDRE COMPTE ET VÉRIFIER LE COS

4.1 · MESURE, RAPPORT ET VÉRIFICATION (MRV)

4.1.1 · QU'EST-CE QUE LA MRV ET QUELLE EST SON UTILISATION ?

Sous l'égide de la CCNUCC, les pays doivent avoir un système national d'arrangements institutionnels et légaux en place pour assurer la gestion précise et appropriée ainsi que le compte rendu de leurs émissions de GES dans l'atmosphère (par exemple par minéralisation de COS) et leurs retraits de l'atmosphère (par exemple par séquestration du SOC). De tels systèmes de rapport sont désignés comme des systèmes de mesure, rapport et vérification (MRV) dans lesquels:

- La mesure (M) se rapporte à la teneur annuelle des changements dans le stock de COS entraînés par les activités humaines, en incluant les actions d'atténuation, et les émissions et retraits anthropogéniques de GES associés (CCNUCC, 2014).
- Le rapport (R) se réfère à l'analyse et à la compilation des données mesurées au travers de divers rapports, comme les communications nationales, les inventaires nationaux de GES et les rapports biennaux actualisés dans lesquels les pays rendent compte de leurs actions pour faire face au changement climatique (CCNUCC, 2014).
- La vérification (V) se rapporte au contrôle indépendant de la transparence, du caractère complet, de la précision et cohérence de l'information rapportée et des méthodes utilisées pour générer l'information. En fournissant des commentaires sur la qualité de l'information et des méthodes, et des suggestions pour les améliorer, la vérification fournit une garantie et un contrôle de la qualité (QA/QC), ce qui permet d'améliorer toute la procédure de MRV (FAO, 2015).

D'une manière générale, le MRV a pour objectif d'assurer que les données collectées dans les inventaires nationaux de GES (et par conséquent dans les inventaires des stocks de COS) soient (GIEC, 2006):

- **Transparentes:** la documentation est suffisante et assez claire pour permettre à chacun (différent du compilateur de l'inventaire) de comprendre la manière dont l'inventaire a été compilé et comment les critères de bonnes pratiques (voir section 4.1.2) sont respectés.
- **Complètes:** les estimations sont rapportées pour chaque catégorie pertinente de sources et puits (par exemple pour le réservoir de carbone) et les différents gaz. Lorsque des éléments font défaut, leur absence doit être clairement documentée, ainsi qu'une justification de leur exclusion.
- **Cohérentes:** les estimations sont faites de telle façon que les différences dans les résultats entre les années et catégories reflètent de réelles différences dans les émissions. Les tendances des inventaires annuels doivent être calculées en utilisant les mêmes méthodes et sources de données pour toutes les années. Elles devraient refléter les fluctuations annuelles réelles dans les émissions ou retraits et ne pas être sujettes à des variations résultant de différences méthodologiques.

- **Comparables:** l'inventaire est communiqué de telle manière qu'il puisse être comparé avec des inventaires provenant d'autres pays.
- **Précises:** l'inventaire ne contient jamais de sous- ou surestimations, pour autant qu'on puisse le vérifier.

Avec l'Accord de Paris (Nations Unies, 2015), tous les pays signataires se sont engagés à contribuer à l'échelon national à l'atténuation du changement climatique, à rendre compte de leurs émissions et suppressions anthropogéniques, et à poursuivre leurs efforts pour limiter le changement climatique. Le cadre MRV permet d'effectuer le suivi et évalue la mise en place de contributions d'atténuation, ainsi que les politiques et les mesures articulées autour des contributions nationales de chaque pays (WRI, 2016). L'article 13 de l'Accord de Paris présente un nouveau cadre de transparence pour le compte-rendu, permettant une meilleure transparence dans le rapport sur les émissions de GES.

4.1.2 · CONSEILS POUR LE RAPPORT DU COS DANS LES INVENTAIRES DE GES

Chaque pays doit régulièrement référer à la CCNUCC/Accord de Paris sur son niveau d'émissions de GES (CO₂, CH₄ et N₂O par exemple). Même si la forme de ces rapports réguliers est susceptible de varier en fonction du statut du pays (annexe I, non-annexe I, ou pays les moins avancés), il est demandé à chaque pays de fournir de l'information de qualité sur son niveau d'émissions de GES et sur les évolutions de façon à démontrer sa volonté et ses efforts pour atteindre les exigences internationales pour limiter le réchauffement global (CCNUCC, 2016).

Pour estimer les changements de COS et les émissions de GES anthropogéniques associées et retraits du réservoir de COS, les pays doivent suivre la méthodologie fournie par le GIEC dans ses lignes directrices pour les inventaires nationaux de GES. Les méthodologies par défaut et les facteurs par défaut pour rendre compte sur les stocks de COS sont donnés dans la section 4 (« Agriculture, foresterie et autres affectations des terres » - AFOLU) qui fait partie des lignes directrices du GIEC pour les inventaires nationaux de GES, publiées en 2006, ainsi que son supplément pour les zones humides (qui se concentre sur les sols organiques, sols côtiers et sols minéraux en zone humide). Les cinq autres réservoirs de carbone pour lesquels des estimations de GES doivent être rapportées sont la biomasse aérienne, la biomasse souterraine, le bois mort, la litière ainsi que les produits ligneux récoltés (GIEC, 2006).

4.1.2.1 · UTILISATION D'UNE MATRICE D'UTILISATION ET DE CHANGEMENT D'UTILISATION DU TERRITOIRE

Les lignes directrices du GIEC stratifient le compte rendu de la MOS (par conséquent du COS) en six catégories différentes d'utilisations du territoire (UT) et en trente catégories de changement d'utilisation du territoire, comme montré par exemple dans la matrice d'utilisation du territoire du tableau 5 (GIEC, 2006).

Tableau 5 · Exemple d'une matrice de conversion simplifiée d'utilisation du territoire

Adapté des lignes directrices volontaires pour les inventaires de GES du GIEC, 2006.

Les nombres représentent des unités d'aire (par exemple Mha)

UT initial \ UT final	Terres forestières	Prairies	Terres cultivées	Terres humides	Etablissements	Autres terres	Somme finale
Terres forestières	15	3	1				19
Prairies	2	80					82
Terres cultivées			29				29
Terres humides				0			0
Etablissements	1	1	1		5		8
Autres terres						2	2
Somme initiale	18	84	31	0	5	2	140

4.1.2.2 · CALCULS DIFFÉRENTS POUR DIFFÉRENTS TYPES DE SOLS

Le calcul des stocks de COS diffère selon le type de sol (sol organique ou minéral) (GIEC, 2006). Les sols organiques sont identifiés sur la base des critères 1 et 2, ou 1 et 3 repris ci-dessous (FAO, 1998):

1. L'épaisseur de l'horizon organique est supérieure ou égale à 10 cm. Un horizon de moins de 20 cm doit avoir au moins 12 pour cent de carbone organique lorsqu'il est mélangé à une profondeur de 20 cm.
2. Les sols qui ne sont jamais saturés en eau pour plus de quelques jours doivent contenir plus de 20 pour cent de carbone organique en poids (c'est-à-dire environ 35 pour cent de matière organique).
3. Les sols qui sont sujets à des épisodes de saturation hydrique et ont soit:
 - a. Au moins 12 pour cent de carbone organique en poids (c'est-à-dire environ 20 pour cent de matière organique) si le sol n'a pas d'argile; ou
 - b. Au moins 18 pour cent de carbone organique en poids (c'est-à-dire environ 30 pour cent de matière organique) si le sol a 60 pour cent ou plus d'argile; ou
 - c. Une teneur intermédiaire, proportionnelle de carbone organique pour des teneurs intermédiaires en argile.

Tous les autres types de sol sont considérés comme minéraux. Les sols répertoriés comme minéraux par estimation sont basés soit sur la taxonomie du département d'agriculture des États-Unis, soit sur la classification des ressources en sols WRB (FAO, 1998). Ces deux classifications reprennent les mêmes types estimés de sols pour le GIEC. La classification des sols répertoriés comme minéraux par estimation devrait être utilisée de pair avec les références du GIEC basées sur leur estimation pour les stocks de C et les facteurs de changement de stocks (stratifiés en fonction de l'UT/changement d'UT).

Les lignes directrices méthodologiques du GIEC poursuivent deux approches générales différentes pour leur compte rendu concernant les changements en stocks de carbone:

1. Pour les sols organiques, l'hypothèse est que ces sols échangent des GES avec l'atmosphère seulement lorsqu'ils sont influencés par des activités humaines (par exemple le drainage ou ré-humidification) et ce, tout au long de l'activité humaine, ou jusqu'à ce que le sol perde assez de matière organique pour devenir un sol minéral.
2. Pour les sols minéraux, l'hypothèse est qu'au sein d'une même zone climatique et pour un même type de sol, le COS jouit d'un équilibre sous une utilisation du territoire constante, un même mode de gestion et régime de perturbations. Par conséquent, un seul changement dans l'utilisation du territoire et/ou dans sa gestion et/ou dans la perturbation apporte un changement dans le stock de COS qui est supposé subvenir de manière linéaire au long d'une période de temps, établi sur 20 ans par défaut.

4.1.2.3 · DIFFÉRENTS NIVEAUX D'INFORMATION: UTILISATION DES NIVEAUX DE MÉTHODOLOGIE

Les lignes directrices 2006 du GIEC ont été développées selon une approche à 3 niveaux, qui lie les changements dans les stocks de C et les émissions de GES, incluant ceux de la MOS. Le tableau 6 donne une vue d'ensemble des différences entre ces trois niveaux. En général, passer d'un niveau plus bas à un niveau plus élevé améliore la précision de l'inventaire et réduit les incertitudes, mais la complexité et les ressources nécessaires pour établir les inventaires augmentent également.

Tableau 6 · Différents niveaux pour le suivi du COS

Adapté des Lignes directrices volontaires pour les inventaires de GES du GIEC (2006)

Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
<ul style="list-style-type: none"> • Conçu pour être le plus simple d'utilisation • Les équations et les valeurs des paramètres par défaut (par exemple les facteurs d'émission et de changement de stock) sont fournies dans les lignes directrices du GIEC • Souvent des données spatialement approximatives 	<ul style="list-style-type: none"> • Peut utiliser la même approche méthodologique que le niveau 1, mais s'applique à des facteurs d'émission et de changement de stocks qui sont spécifiques à une région ou un pays pour les catégories les plus importantes d'utilisation du territoire. • Les facteurs d'émissions définis par les pays sont plus appropriés pour les régions climatiques et les catégories d'utilisation du territoire. Une plus grande résolution temporelle et spatiale et des données d'activité plus désagrégées sont utilisées. 	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode de plus grand ordre utilisée • Inclut des modèles et des systèmes de mesure d'inventaires conçus pour répondre aux circonstances nationales, répétées dans le temps et conduites par des données d'activité de haute résolution et désagrégés à un niveau sous-national • Une plus grande certitude que les estimations des niveaux inférieurs • Peut inclure des échantillonnages sur le terrain répétés et plus compréhensibles à des intervalles réguliers et/ou des systèmes basés sur la SIG d'âge, de production de données; de données de sol et d'utilisation du territoire et de données de gestion de l'activité.

Les méthodes par défaut du GIEC limitent la profondeur de sol pour laquelle les changements de COS sont estimés à 30 cm, bien que les pays puissent mesurer le COS et les changements de COS pour des profondeurs plus grandes (dans pareils cas, les facteurs par défaut du GIEC ne sont pas applicables).

En 2019, un affinement de la méthodologie actuelle sera présenté avec un accent particulier sur les méthodes appliquées aux sols. Ce réajustement abordera plusieurs aspects comme la nécessité de réviser 1) les valeurs estimées pour le COS et les facteurs de changement de COS, 2) les facteurs d'émission et de retrait, et 6) des conseils pour les méthodes de niveaux plus élevés pour les six secteurs d'utilisation du territoire, mais avec une attention spéciale portée aux terres cultivées et aux prairies gérées. Les lignes directrices révisées prendront en compte les avancées scientifiques faites pour la mesure et la communication du taux de COS (c'est-à-dire les systèmes d'information géographiques, la télédétection, etc.). Pour soutenir les futures évaluations, les stocks de référence de COS spécifiques à chaque pays sont requis. Les conseils seront aussi focalisés sur la représentation du territoire, spécialement sur l'identification et le suivi des systèmes d'utilisation des terres et leur gestion et des changements associés dans le temps (GIEC, 2015).

4.2 · MESURER ET CONTRÔLER LE COS

4.2.1 · MESURER LE COS

4.2.1.1 · MÉTHODES DE MESURE DU CONTENU EN COS

Pour faciliter et assurer un suivi régulier, les stocks de COS devraient être mesurés grâce à une méthode peu coûteuse et pouvant couvrir une grande diversité de sols. Cependant, analyser le COS avec une méthode pouvant être appliquée dans des circonstances diverses représente un défi puisque le COS n'est pas distribué de manière égale sur de vastes surfaces, profondeurs, types de sols et emplacements de terrain. Par conséquent, plusieurs méthodes pour mesurer et rendre compte des dynamiques du COS ont été développées. A ce jour, il n'existe pas d'approche standardisée pour mesurer la concentration totale de carbone (Lorenz et Lal, 2016). L'annexe 1 offre une vue d'ensemble des principales méthodes de mesure des teneurs en COS et MOS, tout en montrant leurs avantages/désavantages et utilisations actuelles. Les méthodes innovantes qui peuvent caractériser rapidement et de manière économique le COS, comme la spectroscopie par réflectance dans le visible et proche infrarouge (Vis-NIR) et dans l'infrarouge moyen (MIR) ont produit de bons résultats pour la prédiction de la teneur en COS (Viscarra Rossel *et al.*, 2006; Miltz et Don, 2012). Les méthodes développées dans le passé, comme l'oxydation par voie humide ou à sec, sont toujours régulièrement utilisées, surtout dans les pays en voie de développement. Il est recommandé d'utiliser la combustion à sec pour la mesure du COS, plutôt que la méthode plus commune, et moins chère de Walkley et Black, car du fait d'une oxydation incomplète, cette dernière nécessite l'utilisation de facteurs correctifs. Cependant, la combustion à sec a des coûts d'analyse élevés et nécessite une grande préparation et la destruction d'échantillons. L'application de cette méthode analytique dans les laboratoires de référence a été jugée nécessaire pour mettre en place de grands centres de documents spectraux et développer des modèles de calibration précis (Shepherd et Walsh, 2002). Cependant, les approches innovantes de modélisation, comme l'apprentissage basé sur la mémoire combiné avec des analyses stratifiées sont des moyens prometteurs pour optimiser la calibration et libérer le potentiel des techniques spectroscopiques pour déterminer rapidement et précisément le COS (Jaconi *et al.*, accepté).

4.2.1.2 · CALCUL DES STOCKS DE COS

Les stocks de COS sont calculés en multipliant la proportion de carbone organique (c'est-à-dire le pourcentage de C divisé par 100) par la profondeur, la densité apparente (d_{app}), et la proportion de fragments grossiers dans le sol (fragments de moins de 2 mm) dans la profondeur du sol en question. La proportion sans fragments grossiers est identifiée en unité de masse (c'est-à-dire la portion de masse sans fragments grossiers/la masse totale du sol). Cependant, en fonction du type de sol, le stock de COS est calculé en utilisant différents paramètres (Encadré 3). Pour les sols tourbeux et organiques en général, la détermination du stock de COS est relativement compliquée. Pour calculer les stocks de C des tourbières, il est nécessaire de connaître l'étendue (l'aire) de la tourbière, le type de tourbière, sa profondeur, le pourcentage de C et la d_{app} qui sont difficiles à obtenir (Secrétariat du GSP et ITPS, 2016).

ENCADRÉ 3 – CALCUL DES STOCKS DE COS POUR DIFFÉRENTS TYPES DE SOLS.

Equation 1: détermination du stock de COS pour les sols minéraux.

$$COS_{stock} = p * d_{app} * (C_{tot} - C_{min}) * FC_p$$

Où:

COS = stock de carbone organique du sol

C_{tot} et C_{min} = la teneur totale et minérale en carbone (ou inorganique)

[g.g⁻¹], doit être prise en compte pour les sols calcaires et si la combustion à sec est utilisée avec des températures particulièrement hautes (sinon C_{tot} égal C_{min})[†]

p = profondeur de l'horizon/de la classe [m]

d_{app} = densité apparente [kg.m⁻³]

FC_p = facteur de correction pour la pierrosité ((1-%pierres)/100), inclut la soustraction des graviers et des pierres

Equation 2: détermination du stock de COS pour les couches organiques (exemple: couches de sols forestiers).

$$COS_{stock\ dans\ sol\ forestier} = poidsOR * (C_{tot} - C_{min})$$

Où:

$COS_{sol\ forestier}$ = carbone organique du sol dans le sol forestier [kg.m⁻²]

poidsOR = poids sec de la portion de sol échantillonnée [kg.m⁻²]

C_{tot} et C_{min} = la teneur totale et minérale en carbone (ou inorganique) [g.g⁻¹], doit être prise en compte pour les sols calcaires et si la combustion à sec est utilisée avec des températures particulièrement hautes (sinon C_{tot} égal C_{min})[†]

[†] Valeurs obtenues par mesure directe ou indirecte, voir annexe 1.

4.2.1.3 · ÉLÉMENTS IMPORTANTS À PRENDRE EN COMPTE DANS LE CALCUL DES STOCKS DE COS.

La densité apparente (d_{app}) exprime le poids de sol par unité de volume (Secrétariat du GSP et ITPS, 2016). C'est le facteur le plus important pour estimer les stocks de COS, et il est principalement responsable des différences entre les estimations. Les stocks de COS dans les zones où les sols sont riches en carbone organique sont les plus affectés par la variabilité de la d_{app} (Hiederer et Köchy, 2011). Puisque le stock de COS est le produit de plusieurs facteurs, l'incertitude (ou erreurs de mesure) est l'un des facteurs qui affecte tous les autres (voir équations de l'encadré 3). La d_{app} fait partie des paramètres de sol les plus sous-estimés lors de la détermination sur le terrain. Dans de nombreuses études, l'information concernant soit la méthode soit le nombre d'échantillons utilisés pour la détermination de la d_{app} est manquante, ou alors elle n'est ni mesurée, ni rapportée. Ne pas disposer des valeurs de d_{app} impose une grande incertitude sur les estimations des stocks de COS et de changements dans les stocks de COS (Walter *et al.*, 2016). Ainsi, des mesures pour réduire les incertitudes dans les stocks globaux de COS devraient être dirigées vers les sols associés à de larges étendues (aire), de grands niveaux de C organique, une faible d_{app} ou une grande profondeur (Köchy *et al.*, 2015). Les approches suivantes peuvent être utilisées pour obtenir la d_{app} (Secrétariat du GSP et ITPS, 2016; Lorenz et Lal, 2016):

1. Mesure après échantillonnage.
2. Prédiction en utilisant les fonctions de pédotransfert appropriées. Cependant, les fonctions de pédotransfert conduisent à de plus grandes erreurs que les estimations et les méthodes de mesure.
3. Utilisation de valeurs par défaut données par la littérature (Valeurs de niveau 1 ou 2 du GIEC)

Comptabiliser la pierrosité en soustrayant le contenu en pierre (gravier inclus) pour déterminer la quantité de terres fines est aussi crucial pour un calcul précis du stock de COS. L'estimation de la pierrosité est difficile et prend du temps, par conséquent, elle n'est pas effectuée dans de nombreux inventaires de sols, ou seulement estimée visuellement dans le profil (Secrétariat du GSP et ITPS, 2016). Au lieu d'utiliser une valeur constante, déterminer précisément la pierrosité est recommandé lorsque les fragments pierreux dominent le volume total de l'échantillon (par exemple à des profondeurs plus importantes) et ce, de manière à réduire les erreurs potentielles de mesures (Lorenz et Lal, 2016). Des approches pour déterminer la teneur en pierres incluent (Secrétariat du GSP et ITPS, 2016):

1. Une mesure directe à partir d'échantillons de sol (poids des pierres dans un échantillon de volume connu);
2. Estimation lors du travail de terrain;
3. Valeurs citées dans la littérature (par exemple, valeurs typiques par type de sols et profondeurs – Approches de niveau 1 et 2).

A ce jour, il n'existe pas de méthode robuste et pratique pour estimer le contenu en pierres. Ceci doit être développé pour améliorer la précision des calculs (Lorenz et Lal, 2016), étant donné que même les plus petites sur/sous-estimations dans le contenu en pierres ou d_{app} , et donc dans le contenu en terres fines peut avoir un très fort impact sur les estimations du stock de COS (Secrétariat du GSP et ITPS, 2016).

Pour éviter une surestimation des stocks de COS, en particulier dans les sols riches en pierres, un calcul plus simple a récemment été proposé (Poeplau *et al.*, 2017):

$$COS_{stock} = p * (C_{tot} - C_{min}) * \frac{masse_{terrefine}}{volume_{echantillon}}$$

Ce calcul souligne le fait que le volume échantillonné ($volume_{échantillon}$) ne devrait pas être corrigé en fonction de la pierrosité, mais que la priorité devrait être l'estimation juste de la masse de terre fine ($masse_{terrefine}$).

Au final, bien que selon les lignes directrices du GIEC (2006), la profondeur requise pour les inventaires de GES soit de 30 cm, il n'existe pas de consensus scientifique sur la profondeur de sol à laquelle les mesures et estimations du stock de COS devraient être conduites (GIEC, 2006; Lorenz et Lal, 2016). Il est bien connu que l'utilisation des terres et leur gestion est susceptible d'avoir une incidence majeure sur les couches plus profondes du sol (GIEC, 2006).

4.2.1.4 · EXTRAPOLER LES DONNÉES DE COS

Pour les rapports nationaux de GES, des données nationales d'échelle sont requises. Par conséquent, il est nécessaire d'extrapoler les données disponibles d'une échelle locale à nationale. Différentes méthodes existent pour ce faire et une vue d'ensemble des méthodes communes d'extrapolation est donnée dans le tableau 7 (Secrétariat du GSP et ITPS, 2016).

Tableau 7 · Vue d'ensemble des principales méthodes d'extrapolation pour la comptabilisation du COS
Tiré du Secrétariat du GSP et ITPS, 2016

Extrapolation conventionnelle	Class-matching	Calcule les stocks de COS par hectare par « classe ». Cette approche est utilisée en l'absence de coordonnées spatiales de la donnée d'origine.
	Geomatching	Les points d'emplacement avec références spatiales sont superposés aux couches de SIG d'importantes covariables.
Cartographie numérique du sol (toutes les méthodes nécessitent la géoréférence)	Exploration de données (Data mining)	Régression multiple, arbre de classification, réseau de neurones artificiels
	Géostatistiques	Régression-kriging, avec dérive externe
	Systèmes basés sur les connaissances	Systèmes d'inférence flous, arbres de décision, réseaux bayésiens

4.2.1.5 · SUIVRE LES VARIATIONS DU STOCK DE SOC DANS LE TEMPS

Les changements temporels de stocks de SOC peuvent être évalués soit en effectuant des inventaires de sols répétés, grâce à des programmes de suivi sur des sites représentatifs avant et après un changement d'utilisation de territoire ou de gestion, ou par échantillonnages répétés à des intervalles de temps réguliers lorsqu'aucun changement n'apparaît (Lorenz et Lal, 2016). Les propriétés du sol sensibles aux opérations de gestion peuvent être contrôlées assez facilement. Par contre, les changements de COS qui peuvent aussi être affectés par le changement climatique, sont sujets à des variabilités interannuelles dues à la rotation des pratiques ainsi qu'à l'irrégularité du régime de perturbations et des cycles dans les variables climatiques. Par conséquent, les stocks de COS doivent être suivis sur de longues périodes. De plus, les changements dans le stock de COS sont minimes en comparaison de l'importance des stocks de COS, ainsi qu'à leur variabilité dans le temps et dans l'espace, ce qui exige des techniques de mesure sensibles et la prise en considération des plus petites différences détectables, ainsi que des plans et des tailles d'échantillonnages représentatifs. Par conséquent, des protocoles de suivi doivent être mis en place pour détecter les changements dans les propriétés du sol à des échelles spatiales ou temporelles adaptées, avec une précision adéquate et une forte représentativité statistique. Par exemple, l'effet du changement climatique sur le COS est observé plus facilement à grande échelle qu'à une échelle spatiale plus petite (Batjes et Van Wesemael, 2014).

Un suivi continu du COS à des intervalles de temps de 10 ans est recommandé. Cela peut être un compromis entre la détectabilité des changements et les changements de tendances dans le temps. Cependant, cette durée est plus longue que celle de nombreux projets d'utilisation de la terre ou de gestion qui impliquent la mesure des changements de stocks de COS (c'est-à-dire entre la base de référence et la fin du projet). Certains pays utilisent un intervalle de 5 ans (Batjes et Van Wesemael, 2014).

4.2.1.6 · RÉSEAUX DE SURVEILLANCE DES SOLS (RSS)

Au sein des réseaux de surveillance des sols (RSS), les informations sur les changements directs de stocks de COS peuvent être fournies au travers de mesures répétées sur un site donné, ainsi que les données pour paramétrer et tester les modèles biophysiques à l'échelle de la parcelle. Les RSS doivent être conçus pour détecter les changements dans les propriétés du sol à des échelles spatiales et temporelles adaptées, avec une précision adéquate et un pouvoir statistique. Mais la plupart des RSS sont toujours en planification ou au stade initial de leur mise en œuvre. Peu de réseaux sont présents dans les pays en voie de développement, là où la déforestation et les changements d'utilisation du territoire ont lieu. Au sein de ces réseaux de suivi, les sites peuvent être organisés autour de différents plans d'échantillonnages, par exemple des grilles ordinaires, des approches stratifiées ou un échantillonnage aléatoire. Des méthodes statistiques aléatoires devraient être associées à chacun de ces plans d'échantillonnages (Batjes et Van Wesemael, 2014). Des exemples de RSS nationaux sont repris dans l'annexe 2 (liste non exhaustive).

4.2.2 · DIFFICULTÉS DANS LA MESURE ET LE CONTRÔLE DU COS

Tout d'abord, les changements dans le COS sont faibles comparés au stock global de COS et ces stocks sont grandement variables sur l'ensemble du paysage. Les changements dans l'équilibre du carbone imputables à des projets ne peuvent être détectés qu'après 5 à 10 ans (FAO, 2015). De plus, il reste douteux que les données existantes pour effectuer le suivi des changements dans les stocks de COS soient toujours appropriées. Il existe actuellement un grand besoin de réviser les méthodologies, en incluant celles d'échantillonnages du sol et de mettre à jour les informations provenant du terrain et de la télédétection pour améliorer la crédibilité de l'ensemble des données (Lorenz et Lal, 2016). Globalement, pour permettre à un programme de suivi de représenter les principaux types d'écosystèmes et permettre l'estimation des changements de stocks ainsi que les stocks globaux de COS, plusieurs défis doivent être relevés:

1. **L'harmonisation:** comme l'information sur le COS est géographiquement déséquilibrée, un défi immédiat est l'harmonisation des RSS existants et des bases de données sur les sols (Batjes et Van Wesemael, 2014; Jandl *et al.*, 2014; Secrétariat du GSP et ITPS, 2016). L'harmonisation correspond à la minimisation des différences systématiques entre les différentes sources de mesures environnementales (Batjes et Van Wesemael, 2014).
2. **Métrique universelle:** l'identification d'une métrique universelle pour le suivi du COS est requise. Typiquement, l'information est disponible pour la teneur globale en C, qui est ensuite convertie en réservoir total de COS (Jandl *et al.*, 2014).
3. **Résolution spatiale et temporelle universelle:** l'adoption d'une résolution spatiale et temporelle scientifiquement et politiquement (par exemple pour la CCNUCC) appropriée pour la mesure du COS, ainsi que des protocoles globaux cohérents sont requis (Batjes et Van Wesemael, 2014).
4. **Mesure de la profondeur de sol:** une approche standardisée pour la profondeur de sol rapportée pour les estimations de réservoirs de COS est requise, puisque le COS peut être distribué inégalement pour différentes profondeurs de sol (Jandl *et al.*, 2014; Lorenz et Lal, 2016).
5. **Protocoles et échantillonnages sur le terrain:** des protocoles spécifiques pour le travail sur le terrain et des systèmes efficaces d'échantillonnages pour l'évaluation des dynamiques du COS sont requis. La grande hétérogénéité spatiale du COS en comparaison à ses changements temporels modérés nécessite de trouver des protocoles d'échantillonnages économiques de façon à saisir correctement les dynamiques du COS à l'échelle d'un paysage et d'identifier de petits changements de COS dans un réservoir hautement variable (Batjes et Van Wesemael, 2014; Jandl *et al.*, 2014; Lorenz et Lal, 2016).
6. **Besoin d'inclure le COS dans les études de sol:** les programmes de suivi du COS doivent être en liaison avec études de sol de long terme qui offrent une base de référence pour le réservoir de COS et peuvent comprendre un ensemble de sites où la recherche centrée sur les mécanismes du sol et leurs impacts sur le COS peut être entreprise (Jandl *et al.*, 2014).
7. **Compréhension améliorée:** la compréhension des mécanismes de stabilisation du COS est incomplète. Il n'existe pas d'accord global sur les méthodes de fractionnement du COS pour estimer le degré de stabilisation obtenu (Jandl *et al.*, 2014).

4.2.3 · VÉRIFICATION DES ESTIMATIONS DU STOCK DE COS

Les procédures de garantie de qualité et de contrôle qualité (QA/QC) contribuent à l'amélioration de la transparence, à la cohérence, l'intégralité et l'exactitude et donc à la comparabilité des inventaires de GES. La procédure de QA/QC fait partie de la procédure de vérification interne. QA est un système planifié de revue des procédures conduit par un parti tiers qui n'est pas directement impliqué dans la procédure du suivi/rapport. Les revues sont effectuées sur l'inventaire complet en utilisant les méthodes de QC. Les revues vérifient que les objectifs mesurables sont atteints, assurent que l'inventaire représente les meilleures estimations possibles des émissions et des retraits, étant donné de l'état actuel du savoir scientifique et de la disponibilité des données et contribuent à l'efficacité du programme de QC. Les activités de QC incluent des méthodes générales telles que des vérifications de l'exactitude dans l'acquisition et du calcul des données, et l'utilisation de procédures approuvées et standardisées pour la collection des données, pour les calculs des émissions et des retraits, en incluant les incertitudes associées, l'archivage et le rapport des données (GIEC, 2006).

Concernant la collecte des données (c'est-à-dire les mesures), les RSS devraient être inclus dans un plus large programme de validations croisées pour rendre possible les comparaisons spatiales et temporelles validées aussi bien au sein d'un pays qu'entre différents pays (Batjes et Van Wesemael, 2014). Finalement, selon le GIEC, la vérification inclut la comparaison des estimations des inventaires nationaux de GES avec des estimations alternatives. Cela est aussi un moyen d'assurer la qualité des estimations préparées (GIEC, 2006). Un sommaire de la procédure de MRV dans le cadre du COS est donné sur la figure 12.

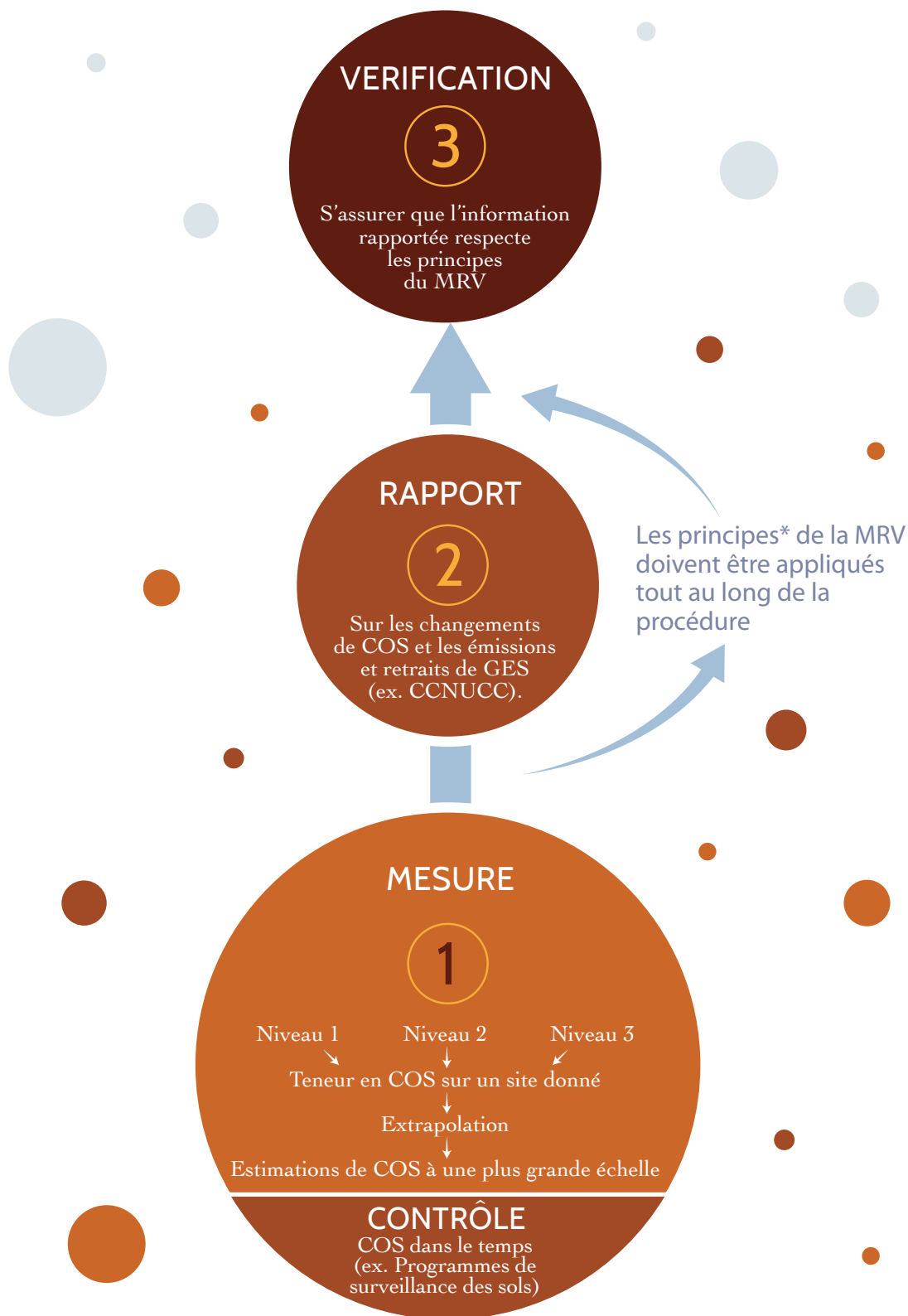


Figure 12 • Sommaire du cadre de travail pour la mesure, rapport et vérification (MRV) du COS.

* Principes de la MRV: exactitude, cohérence, intégralité, comparabilité et transparence (voir section 4.1.1).

5 · GESTION DU COS



5.1 · GESTION DU COS POUR UNE PRODUCTION ALIMENTAIRE DURABLE

Il est largement reconnu que la séquestration du COS peut être de grande importance comme mesure d'adaptation et d'atténuation du changement climatique. Mais le COS (proxy pour la MOS) joue un rôle tout aussi important dans l'assurance de la sécurité alimentaire. En effet, il permet d'augmenter la productivité du sol et de maintenir en permanence de hauts rendements, notamment en augmentant les capacités de rétention d'eau et de nutriments et en améliorant la structure du sol, favorisant ainsi les conditions de croissance des végétaux (Zdruli *et al.*, 2017).

Le changement climatique est susceptible d'avoir un fort impact sur l'agriculture, menaçant la sécurité alimentaire (FAO, 2015). La projection du GIEC d'une augmentation de température de 4°C d'ici la fin du 21^{ème} siècle indique des conséquences désastreuses pour la sécurité alimentaire étant donné l'augmentation de la demande globale en produits alimentaires (GIEC, 2007). En fait, le changement climatique est l'un des principaux défis auxquels le monde agricole doit faire face pour assurer les besoins alimentaires. La sécurité alimentaire étant donnée le changement climatique, est affectée dans les quatre dimensions suivantes (FAO, 2015):

- la disponibilité alimentaire;
- l'accessibilité alimentaire;
- la stabilité de la fourniture alimentaire;
- la capacité des consommateurs à utiliser la nourriture de manière adéquate (sûreté alimentaire et nutrition).

Le changement climatique, attesté par l'augmentation des températures, le changement des schémas de précipitation ainsi que des événements météorologiques plus fréquents et plus extrêmes conditionnent grandement les cultures et l'élevage. De plus, l'augmentation de température des masses d'eau, la baisse des niveaux de pH et les changements dans les schémas actuels de la productivité des océans affectent les productions halieutiques. Par conséquent, de grands inconvénients sont attendus, qui incluent la réduction des rendements agricoles, des migrations biologiques, des déclinés dans l'agro-biodiversité et les services écosystémiques, la perte de revenus agricoles de même qu'une augmentation des prix alimentaires et du coût des transactions (FAO, 2015). Par conséquent, il est nécessaire de mettre en place des mesures qui limitent les risques affectant la sécurité alimentaire globale. Vital comme il l'est pour l'adaptation et l'atténuation du changement climatique, le COS est un élément indispensable pour garantir une fourniture alimentaire globale suffisante.

La teneur en COS est l'une des propriétés fondamentales du sol associée à de nombreuses fonctions du sol. C'est la source indispensable de nutriments pour la production agricole. Une augmentation dans le stock de COS permet l'augmentation des rendements des cultures dans l'agriculture commerciale à forts intrants, mais aussi et surtout

dans les terres dégradées avec peu d'intrants. Dans des zones telles que l'Afrique subsaharienne, où les agriculteurs de subsistance font face à un manque de disponibilité de la fertilisation et d'une véritable irrigation, le COS est la clé pour augmenter la production (Lal, 2004). De nombreuses études ont quantifié les contributions du COS en termes de production alimentaire. De Moraes Sá *et al.* (2017) a rapporté que l'adoption de pratiques agricoles conservant le COS peut augmenter la production alimentaire de 17.6 Mt/an. Lal (2004) a spécifié qu'une tonne d'augmentation dans le réservoir de COS des terres cultivées dégradées pourrait augmenter les rendements en blé de 20 à 40 kg.ha⁻¹, de 10 à 20 kg.ha⁻¹ pour le maïs, et de 0.5 à 1 kg.ha⁻¹ pour les pois. Par conséquent, une gestion durable des sols qui augmente les stocks de COS devrait être développée à l'échelle locale et globale et devrait être adoptée pour des systèmes alimentaires plus durables.

5.2 · GESTION DU COS POUR LIMITER ET ATTÉNUER LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

L'atténuation du changement climatique renvoie aux efforts visant à limiter, arrêter et/ou inverser la tendance du changement climatique par le biais de stratégies de gestion, de changements de comportement et d'innovations techniques qui réduisent l'émission de GES. En raison des activités humaines, le CO₂ est l'un des GES les plus émis de nos jours (Kane, 2015). Avec des actions d'atténuation véritables et proactives, le sol peut jouer un rôle intégral dans la réduction des émissions de CO₂ du fait de son potentiel comme puits de carbone (Lal, 2004). Les avantages émergeant de telles actions d'atténuation tendent à être mondiaux et à porter sur le long terme (GIEC, 2007).

L'adaptation au changement climatique se rapporte aux efforts visant à atteindre une meilleure préparation face à des événements et conditions climatiques sans précédents. Cela implique l'anticipation du changement climatique et ses effets négatifs et réclame de gérer ces derniers avec des actions qui minimisent les risques associés. En résumé, elles sont les actions qui aident les humains et les systèmes naturels à s'ajuster à un climat changeant (GIEC, 2014). Contrairement à l'atténuation, les mesures d'adaptation peuvent être à la fois réactives et proactives et les avantages présentés sont généralement locaux et visibles à court terme (GIEC, 2007). Les mesures d'adaptation peuvent souvent inclure le sol: dans un effort pour vaincre la vulnérabilité et créer la capacité à résister à des conditions météorologiques extrêmes comme les tempêtes, les inondations et les sécheresses, des sols en bonne santé et bien gérés sont capables d'agir comme un tampon. Par exemple, les sols avec une teneur optimale en COS peuvent absorber et stocker plus d'eau lors de fortes pluies et la rendent disponible pour la végétation dans des conditions de sécheresse. Des sols en bonne condition peuvent assurer une bonne aération et une fourniture régulière en dioxygène pouvant éviter de plus amples émissions de carbone résultant de la méthanogénèse (FAO et ITPS, 2015). Les mesures d'atténuation et d'adaptation offrent toutes les deux des solutions qui répondent au changement climatique et peuvent être mises en relation avec les ODD. Cependant, elles ne sont pas toujours considérées comme complémentaires à l'échelle locale; parfois elles peuvent être substituées, en compétition/conflict ou indépendantes les unes des

autres. Par exemple, certaines mesures d'adaptation au changement climatique comme la fertilisation ou l'irrigation optimisée, ont une grande demande en énergie et donc peuvent conduire à de plus grandes émissions de CO₂. D'autre part, l'adaptation ne sera jamais un parfait substitut à l'atténuation puisque cette dernière sera toujours requise pour éviter de plus grands changements dans le système climatique. Actuellement, en raison du réchauffement déjà perceptible, les mesures d'adaptation sont requises malgré les plus grands coûts associés, indépendamment de l'échelle des efforts d'atténuation (GIEC, 2007).

Etant donné le rôle des sols dans l'atténuation et l'adaptation au changement climatique et les limites présentées par la saturation en COS pour séquestrer plus de carbone, une gestion judicieuse du sol doit être mise en place pour assurer qu'un sol devienne bien un puits et non une source de CO₂ atmosphérique (Paustian *et al.*, 2016). Par conséquent, il est idéal d'étudier et de déterminer, pour n'importe quel écosystème donné, à la fois les stocks actuels de COS et les points respectifs de saturation en carbone pour déterminer le potentiel de séquestration d'un sol. Seulement après cela, il sera possible d'atteindre une efficacité maximum pour la séquestration du COS grâce à des stratégies de gestion adaptatives. La figure 13 montre les stratégies de gestion du COS recommandées et à éviter pour assurer une production alimentaire optimale, atténuer et adapter au changement climatique. Ces pratiques répondent aux défis mentionnés plus haut au moyen d'un certain nombre de mécanismes qui visent à (i) augmenter le potentiel de séquestration du COS et de photosynthèse (grâce à la reforestation, l'afforestation et les cultures sous couvert), (ii) diminuer les émissions de GES et les pertes de COS (grâce au labour réduit/de conservation et à l'agriculture biologique) et (iii) augmenter la production alimentaire en améliorant les propriétés du sol pour un meilleur pouvoir de rétention en eau, en nutriments et de pH (en ajoutant des amendements organiques comme le compost ou le biocharbon).



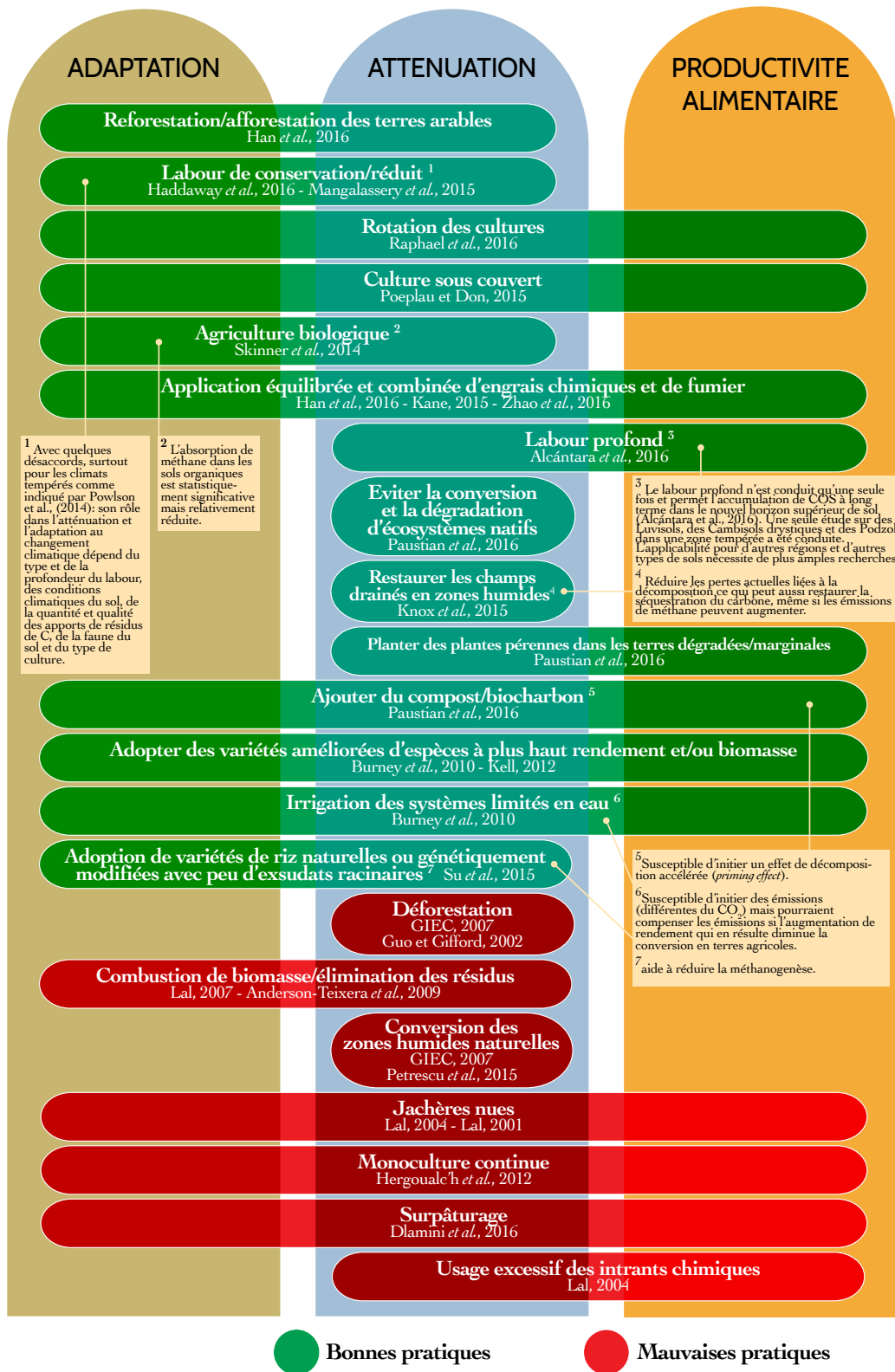


Figure 13 · Stratégies de gestion suggérées et déconseillées pour la séquestration du carbone du sol et leur impact sur la productivité alimentaire, l'adaptation et l'atténuation du changement climatique.

Les couleurs indiquent les bonnes et les mauvaises pratiques (respectivement en vert et en rouge). Partiellement adapté et modifié de Ogle *et al.*, 2014, et Descheemaeker *et al.*, 2016.

5.3 · DÉFIS DE LA SÉQUESTRATION DU COS

Les défis de la séquestration et de la préservation du COS sont multiples. Certains découlent de facteurs humains comme un faible taux d'adoption des pratiques de gestion durable du sol, qui ont pour causes des raisons diverses (FAO et ITPS, 2015). D'autres sont liées à des facteurs abiotiques et dépassent le contrôle de l'Homme. Dans cette section, sont abordées les questions des différents obstacles à l'adoption de mesures adéquates et des facteurs abiotiques qui freinent la séquestration du COS.

5.3.1 · OBSTACLES À L'ADOPTION DE MESURES VISANT À L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET À L'ATTÉNUATION DE SES EFFETS

5.3.1.1 · OBSTACLES FINANCIERS

Les barrières financières sont l'un des obstacles les plus importants qui restreignent la mise en place de stratégies d'adaptation (Antwi-Agyei, 2012; Antwi-Agyei *et al.*, 2015; Takahashi *et al.*, 2016; Azhoni *et al.*, 2017). En fait, chaque forme de pratique d'adaptation et d'atténuation du changement climatique engendre des coûts directs et/ou indirects (Takahashi *et al.*, 2016). Un exemple de coût direct lié à une pratique d'adaptation serait l'utilisation de variétés améliorées onéreuses qui offrent une meilleure tolérance à des conditions de cultures défavorables ou l'application d'intrants carbonés produits à l'extérieur de l'exploitation agricole. D'autre part, les coûts indirects incluent les pratiques à coûts élevés qui nécessitent un investissement en temps qui pourrait sinon être dirigé vers des activités plus rémunératrices (ex. incorporation des résidus de culture dans le sol comme, par exemple, s'occuper des cultures ou les vendre comme biomasse) (Boon, 2013).

Les barrières financières qui peuvent décourager les agriculteurs de mettre en place des pratiques qui permettraient l'accumulation de COS peuvent être l'apparition de déficits budgétaires, des capacités limitées pour financer ou accéder au capital, aux niveaux national, provincial ou à l'échelle de la ferme (UN-HABITAT, 2010; Takahashi *et al.*, 2016). D'autres barrières incluent les hauts risques de change dus aux fluctuations des taux de change étrangers, les coûts d'investissement initiaux comme ceux de l'équipement, des machines ou du labour, les coûts associés aux biens des ménages, coûts associés au temps et aux déplacements pour accéder aux conseils ou apports techniques et potentiellement le peu de retour sur investissement étant donné de l'incertitude quant aux bénéfices éventuels (FAO, 2015). Dans une étude effectuée par Takahashi *et al.* (2016) sur les obstacles rencontrés par les agriculteurs pour mettre en œuvre des mesures d'adaptation au changement climatique, la réponse la plus fréquente se rapportait aux conditions économiques et en particulier au risque économique de mettre en place de nouvelles pratiques ou à l'incertitude quant aux conditions changeantes du marché en fonction du changement climatique. C'est pourquoi l'aspect financier doit être envisagé comme un facteur essentiel des critères opérationnels des agriculteurs (Takahashi *et al.*, 2016).

5.3.1.2 · OBSTACLES TECHNIQUES ET LOGISTIQUES

Malgré le fait que les développements techniques comme les nouvelles variétés végétales, les équipements de conservation du sol et les systèmes d'irrigation soient considérés comme déterminants pour l'action de l'agriculture contre le changement climatique (Smit et Skinner, 2002), l'absence de technologie est souvent un obstacle à l'adoption des mesures d'adoption ou d'atténuation (FAO, 2015). Ces barrières à l'adoption sont surtout visibles dans les régions les moins développées comme l'Afrique subsaharienne (Kithiia, 2011; Antwi-Agyei, 2012) où les agriculteurs n'ont pas accès à de tels outils (Kolikow *et al.*, 2013). Ces limitations restreignent les opportunités pour les agriculteurs d'être mieux préparés et en mesure d'améliorer la sécurité alimentaire grâce à des pratiques d'adaptation et d'atténuation qui promeuvent la séquestration du COS (Antwi-Agyei, 2012).

Les barrières techniques peuvent apparaître sous diverses formes comme l'indisponibilité des technologies adaptées, de capacité technique et/ou d'équipements et la faible détectabilité des changements à court terme comme ceux rencontrés lors de mesures périodiques des dynamiques de COS (FAO, 2015). Les barrières logistiques se réfèrent à la difficulté et à la complexité de l'adaptation aux tendances climatiques à long terme, vu leur grande variabilité annuelle, étant donné le grand risque d'échec sur le court terme et la non viabilité des pratiques adaptatives d'une année à l'autre (Takahashi *et al.*, 2016).

5.3.1.3 · OBSTACLES INSTITUTIONNELS

Les institutions telles que les gouvernements ont le pouvoir d'amplifier ou de diminuer ces barrières et peuvent agir comme un facilitateur ou comme un obstacle à la mise en œuvre de pratiques d'adaptation et d'atténuation du changement climatique (Agrawal et Perrin, 2009; Biesbroek *et al.*, 2013). Par exemple, le faible taux d'adoption de pratiques d'adaptation ou d'atténuation du changement climatique dans de nombreux pays d'Afrique subsaharienne peut être attribué aux politiques inefficaces des gouvernements qui souvent restreignent ces pratiques aux niveaux local et national (Sietz *et al.*, 2011; Antwi-Agyei, 2012). De ce fait, les barrières institutionnelles peuvent prendre la forme de réglementations politiques nationales, mais aussi de régimes fonciers incertains, de marchés imparfaits et d'une faible capacité à prendre des risques, de services de recherche et de vulgarisation limités, d'une faible coordination entre les institutions, de conditionnements culturels concernant le genre et une importance attribuée seulement aux avantages liés à la réduction du changement climatique sans considérer les bénéfices qui n'y sont pas liés non liés (FAO, 2015).

Les prises de décision et les pratiques au sein de l'exploitation agricole sont largement conditionnées par la disponibilité du marché et les modèles stratégiques des opérations (Antwi-Agyei *et al.*, 2015). Par exemple, les agriculteurs conçoivent que du fait de leurs liens préétablis depuis longtemps avec des marchés spécifiques, trouver de nouveaux marchés pour de nouvelles cultures, des hybrides ou des variétés qui séquestrent plus de carbone, est une tâche difficile, puisqu'il est peu probable qu'un agriculteur change

de cultures ou d'intercultures à moins que n'existe un marché garanti (Takahashi *et al.*, 2016). Le manque de marchés facilement accessibles se traduit également par un faible développement des infrastructures physiques, comme celui du réseau routier ou de l'absence de bâtiments de stockage appropriés pour certaines cultures. Ceci décourage l'adoption en affaiblissant la capacité de négociation de certaines communautés de petits exploitants qui, même s'ils le souhaitent, ne peuvent pas stocker leurs cultures dans leurs fermes quand les prix du marché sont bas (Antwi-Agyei *et al.*, 2015).

De plus, dans de nombreuses communautés de petits exploitants, surtout dans les pays en développement, le seul accès que les agriculteurs ont aux nouvelles connaissances et aux innovations techniques sur la gestion durable des sols se fait à travers des services de vulgarisation. Puisque le rôle des techniciens de vulgarisation est de faciliter et transférer les moyens scientifiques de pratiquer l'agriculture, ils se trouvent souvent débordés par le nombre de communautés dont ils sont responsables. Cela compromet l'efficacité de la réponse aux besoins des agriculteurs et freine l'adoption de pratiques de conservation des sols. Ainsi, les faibles capacités institutionnelles mènent à un manque ou une non-fiabilité de l'information sur l'adaptation au climat qui, en combinaison avec la variabilité climatique, risque de menacer la sécurité alimentaire de nombreux pays en développement (Antwi-Agyei, 2012).

5.3.1.4 · BARRIÈRES DE CONNAISSANCES

Les insuffisances des connaissances se manifestent sous la forme d'un manque d'information ou de sensibilisation. Elles sont l'un des obstacles majeurs à la réduction de la dégradation des terres, à l'amélioration de la productivité agricole et à la possibilité d'adoption de la gestion durable des terres parmi les petits agriculteurs (Liniger *et al.*, 2011). Dans les pays en voie de développement, le manque d'équipements météorologiques modernes se traduit par une carence d'information sur les conditions climatiques et conduit à une faible adoption de stratégies de gestion qui limitent et favorisent l'adaptation au changement climatique par les agriculteurs (Antwi-Agyei, 2012). Il est important de noter que des informations fiables sur le climat, comme les prédictions annuelles, sont tout aussi importantes pour la sécurité alimentaire, car de nombreux systèmes agricoles dépendent globalement de la programmation sur le long-terme de leurs activités (Ziervogel *et al.*, 2010). Un savoir suffisant des différentes options disponibles est aussi crucial pour les agriculteurs, afin qu'ils puissent prendre des décisions informées sur les meilleures pratiques de gestion (Lee, 2007).

Dans certains cas, le problème n'est pas lié au type des connaissances transmises, mais plutôt à qui transmet le savoir aux agriculteurs. Dans une enquête conduite par Takahashi *et al.* (2016), de nombreuses personnes interrogées ont exprimé leurs doutes quant à la véracité des informations provenant de certaines sources, notamment celles politiquement affiliées et ont souligné le besoin de pouvoir accéder à l'information à partir de sources fiables, cohérentes, objectives et apolitiques. Il est généralement désirable et même attendu que les agriculteurs fassent partie d'associations ou de commissions sur la gestion durable des sols pour la formation des politiques, puisque

les agriculteurs eux-mêmes avec les agents de vulgarisation des coopératives sont jugés comme étant les sources les plus sûres en ce qui concerne l'information sur les situations locales (Takahashi *et al.*, 2016).

5.3.1.5 · BARRIÈRES EN TERMES DE RESSOURCES

Les contraintes en matière de ressources peuvent être vues comme une absence de terres suffisantes, de labour, d'intrants, d'eau et/ou de plantes disponibles pour commencer à s'adapter et à atténuer le changement climatique (Takahashi *et al.*, 2016). Dans une étude, le plus grand obstacle à l'amélioration des fonctions du sol et les autres services écosystémiques en Afrique subsaharienne a été identifié comme provenant du manque de production de résidus de cultures du fait de la faible productivité des sols (Palm *et al.*, 2014). En termes de travail par exemple, de nombreux agriculteurs, principalement dans les pays en voie de développement, s'appuient sur un emploi en dehors de la ferme pour avoir une source supplémentaire de revenu qui, en retour, limite le temps passé à travailler dans leurs fermes à y mettre en place des pratiques innovantes et de gestion durable des terres (Takahashi *et al.*, 2016).

5.3.1.6 · BARRIÈRES SOCIO-CULTURELLES

Les barrières sociales, qui peuvent être cognitives ou normatives, sont l'une des principales barrières qui influencent les actions pour faire face au changement climatique (Swim *et al.*, 2011 ; Antwi-Agyei *et al.*, 2015). Antwi-Agyei *et al.* (2015, p.19) a écrit que « les systèmes de croyances d'un groupe particulier de personnes peut constituer l'une des plus grandes barrières à la mise en place de stratégies d'adaptation au climat ». La mise en place volontaire de pratiques de gestion durable des sols dépend largement de la façon dont les agriculteurs perçoivent le changement climatique et de l'identification des risques, ce qui est fondamentalement influencé par les croyances personnelles, les normes culturelles, les systèmes de valeurs et les visions du monde (Jones et Boyd, 2011; Smith *et al.*, 2011; Antwi-Agyei, 2012; Adger *et al.*, 2013). Différents groupes culturels avec des systèmes de croyance préexistants distincts au sein d'une même région géographique peuvent répondre différemment aux risques générés par le changement climatique (Moser, 2010; Adger *et al.*, 2013).

Interconnexion des obstacles

Les différentes barrières à l'adoption de pratiques permettant l'adaptation et l'atténuation du changement climatique sont grandement entrelacées, ce qui amplifie les difficultés de la promotion de la séquestration du COS. Par exemple, les obstacles techniques et logistiques sont grandement connectés et reliés aux contraintes financières, socio-économiques et institutionnelles (Klein *et al.*, 2001). Ces dernières peuvent être l'illustration d'un manque de fonds pour une agence gouvernementale ou l'absence de structure à même de permettre le compte rendu efficace, ce qui se traduit par des contraintes techniques, logistiques et de connaissance. De plus, les barrières financières sont strictement liées aux contraintes institutionnelles. En particulier, le manque de facilité de crédit est considéré comme l'un des obstacles principaux à la mise en place de

stratégies appropriées de gestion par les agriculteurs, notamment en Ethiopie (Bryan *et al.*, 2009). Il est également clair que le manque d'accès facile aux marchés est une barrière institutionnelle qui renforce d'autant plus les barrières financières. L'absence de marchés nourrit le cercle vicieux liant les faibles prix des matières agricoles à l'incapacité de remboursement des emprunts, ce qui empêche l'obtention d'autres prêts et conduit à de faibles taux d'adoption de pratiques de gestion durable des terres (Antwi-Agyei *et al.*, 2015).

Dans certains cas, les différentes barrières à l'adoption de stratégies en faveur de la lutte contre le changement climatique (adaptation et/ou atténuation) peuvent être surmontées en utilisant différentes approches. L'encadré 4 contient une liste de stratégies en mesure de surmonter certaines de ces contraintes.

ENCADRÉ 4 · SOLUTIONS PROPOSÉES POUR SURMONTER LES OBSTACLES

- Les barrières financières peuvent être surmontées par des incitations financières ou des régulations valables dans des conditions locales, en incluant les incitations faites pour les marchés locaux (FAO et ITPS, 2015).
- Les barrières socio-culturelles peuvent être surmontées grâce à des stratégies d'adaptation qui reconnaissent le contexte local, tel que celui des systèmes de croyance ou des savoirs indigènes (Jennings et Magrath, 2009).
- Les barrières de connaissances peuvent être surmontées grâce à des politiques permettant le maintien d'un suivi climatique, qui assurent une communication de l'information efficace et régulière (Easterling *et al.*, 2003; Howden *et al.*, 2007). Cela peut aussi être atteint en renforçant les politiques qui soutiennent les acteurs de la recherche, des systèmes d'analyse, des services de vulgarisation, de l'industrie ou des réseaux régionaux et qui fournissent d'importantes informations en lien avec le climat (Howden *et al.*, 2007).
- Les barrières techniques et logistiques peuvent être surmontées en rendant disponibles les technologies déjà existantes pour mettre en place une gestion durable des sols et investir dans de nouvelles stratégies techniques ou de gestion telles que les variétés améliorées. Des politiques qui supportent l'« apprendre en faisant » pour opérer des ajustements et améliorer des connaissances, par exemple en assurant un suivi ciblé des pratiques d'adaptation et d'atténuation du changement climatique et leurs coûts, avantages et effets, devraient aussi être mises en place (Burton et Nations, 2005; Howden *et al.*, 2007)
- Les barrières institutionnelles et de ressources pourraient aussi être surmontées en développant de nouvelles infrastructures (structures d'irrigation, technologies d'utilisation efficace de l'eau, systèmes de transport et de stockage, etc.), révision des politiques (accords sur les régimes fonciers, droits de propriété) et établissement de marchés accessibles et efficaces pour les produits et les intrants (semences, engrais, travail, etc.) et pour les services financiers, qui incluent les assurances (Turvey, 2001; Howden *et al.*, 2007).

5.3.2 · FACTEURS NON HUMAINS LIMITANT LA SÉQUESTRATION DU COS: FACTEURS ABIOTIQUES

En plus des barrières humaines, certains facteurs abiotiques incontrôlés comme les conditions climatiques et la texture du sol peuvent limiter le potentiel du sol à séquestrer le carbone, en particulier en influençant les mécanismes du cycle du carbone conditionnés

par le biote du sol (FAO et ITPS, 2015). Des températures plus chaudes dans les latitudes nord accélèrent la décomposition du COS. Cela s'observe par de grands flux de CO₂ apparaissant l'été, lorsque les mécanismes biologiques sont favorisés. Sous de telles conditions, maintenir les stocks de COS peut être un défi encore plus grand. Les taux de séquestration du COS dans les sols agricoles et écosystèmes restaurés varient de 0 à 26. kgC.ha⁻¹/an dans les climats chauds et secs, en comparaison aux 100 à 1 000 kgC.ha⁻¹/an dans les climats frais et humides (Lal, 2001). Ceci peut s'expliquer du fait que lors des mois d'hiver ou dans les climats froids, peu de flux de CO₂ sont observés puisque des températures froides suppriment les mécanismes de décomposition (Ward *et al.*, 2007; Clark *et al.*, 2009; Armstrong *et al.*, 2015). Cependant, lors d'événements extrêmes comme la sécheresse, la décomposition du COS peut d'abord diminuer, mais est susceptible d'augmenter à posteriori après une ré-humidification (Borken et Matzner, 2008). Bien qu'il soit établi que dans les modèles de cycle du C du sol, la température contrôle fortement le stockage de MOS, la sensibilité de la décomposition de différentes fractions de MOS à la température reste une zone d'incertitude (Conant *et al.*, 2011).

L'eau influence aussi le stockage du COS selon plusieurs mécanismes. Puisque des sols bien aérés et assez humides sont optimaux pour l'activité microbienne, le taux de décomposition diminue lorsque les sols deviennent plus secs. En revanche, le taux de décomposition de la matière organique diminue dans les sols inondés, du fait d'une aération restreinte, souvent dans des sols très riches en COS (par exemple les sols tourbeux) (FAO et ITPS, 2015). Dans ces sols saturés en eau, d'autres propriétés abiotiques, comme les propriétés physiques telles que la profondeur de tourbière et la densité apparente influencent aussi le traitement biologique du cycle du C. Ces propriétés contrôlent, par exemple, la disponibilité du substrat et la cadence de distribution de l'eau, des composés et du gaz tout au long du profil de la tourbière, ce qui influence au final le COS du sol (Dorrepaal *et al.*, 2009; Levy *et al.*, 2012). Cependant, de telles conditions d'inondation peuvent causer un afflux d'émissions de CH₄ (Blodau *et al.*, 2004). Armstrong *et al.* (2015) ont montré qu'un pic d'émissions de CH₄ dans les tourbières survient surtout en automne (saison caractérisée par une nappe aquifère et des températures relativement hautes), ce qui promet une plus grande méthanogénèse (production de CH₄) alors que la méthanotrophie est limitée (Oxydation du CH₄). Dans les sols minéraux, la quantité et la composition du COS est largement dépendante du type de sol, qui peut différer à l'échelle de la parcelle. Dans les sols riches en argile, une plus grande teneur en matière organique et une plus grande concentration en carbone O-alkyle dérivé des polysaccharides peut se manifester. Au contraire, les sols sableux sont souvent caractérisés par des teneurs en C plus faibles et de plus grandes concentrations en carbone alkyle (Rumpel et Kögel-Knabner, 2011), diminuant ainsi leur potentiel pour augmenter les stocks de COS. D'autres barrières abiotiques à la séquestration du COS peuvent inclure l'érosion du sol et les feux, qui peuvent en premier lieu diminuer le stockage de C (Knicker, 2007).



6 · ET LA SUITE ? POINTS À EXAMINER



CYCLE DU COS...

- La véritable portée du cycle du carbone global et son interdépendance avec les dynamiques du COS et ses relations avec les autres cycles biogéochimiques doit encore être pleinement comprise. Une précision accrue de la mesure, cartographie, suivi et rapport du COS peut contribuer à une meilleure connaissance du cycle.
- Les systèmes et pratiques de gestion des terres qui favorisent la séquestration du COS devraient chercher à retenir le carbone dans le sol sur le long-terme. Le seuil de saturation du COS reste un concept théorique qui nécessite des informations spécifiques à un site donné, en ce qui concerne le contenu en COS additionnel qui puisse être séquestré et la manière d'y parvenir.

SÉCURITÉ ALIMENTAIRE ET CHANGEMENT CLIMATIQUE...

- Il existe un besoin d'améliorer les connaissances sur l'action immédiate qui permette de gérer de manière efficace le COS pour améliorer la production alimentaire, l'adaptation et l'atténuation du changement climatique et puisse également contribuer aux ODD d'ici 2030.
- Une prévision juste de l'impact de l'activité humaine sur le changement climatique est actuellement limitée, surtout en raison d'une compréhension incomplète de la respiration du sol et des incertitudes concernant l'effet primaire, les contributions microbiennes à la rétroaction du carbone ou l'adaptation des communautés microbiennes.
- L'identification de concentrations stratégiques de COS et une compréhension accrue de leur potentiel pour atténuer le changement climatique est nécessaire pour sensibiliser la population concernant la nécessité de les gérer de manière durable.

STOCK DE COS ET ÉVALUATION DES CHANGEMENTS DE STOCKS DE COS...

- La plupart des cartes actuellement disponibles et les estimations globales du COS sont basées sur des données historiques plutôt que sur les suivis actuels ou récents. Une nouvelle compilation des stocks de COS spécifiques à chaque pays est nécessaire pour développer des bases de références nationales de COS en soutien à la réussite des ODD et des évaluations liées aux effets du changement climatique.
- Des méthodes innovantes qui rendent possible le suivi fréquent et à prix raisonnable du COS doivent être mises en place dans chaque pays. Il reste difficile de calculer de manière précise les stocks de COS, surtout en raison de la difficulté de mesurer les paramètres de densité apparente et de contenu en pierres.
- Rappporter sur le statut et les tendances du COS basé sur des mesures est une tâche qui comporte des défis qui doivent être affrontés avec des méthodologies harmonisées, l'utilisation de techniques d'échantillonnages standardisées, l'exploitation de solutions innovantes à la collecte et au partage de données et en considérant les différentes pratiques agricoles mises en place à différentes échelles.

GESTION...

- Des recommandations solidement justifiées et basées sur des résultats de recherche pour maintenir et/ou augmenter les stocks de COS par des pratiques de gestion judicieuses à différentes échelles sont cruciales pour tous les types d'utilisation de la terre, surtout dans les zones riches en COS et autres points d'importance.
- De meilleures stratégies, de grande portée et globales pour dépasser les entraves à l'adoption de pratiques de COS sont nécessaires pour créer et mettre en place de nouvelles politiques.

REFERENCES

- Adger, W. N., Barnett, J., Brown, K., Marshall, N. & O'Brien, K. 2013. Cultural dimensions of climate change impacts and adaptation. *Nature Climate Change*, 3(2): 112-117.
- Agrawal, A. & Perrin, N. 2009. Climate adaptation, local institutions and rural livelihoods. Dans: *Adapting to climate change: thresholds, values, governance*. s.l.:Cambridge University Press, pp. 350-367.
- Alcántara, V., Don, A., Well, R. & Nieder, R. 2016. Deep ploughing increases agricultural soil organic matter stocks. *Global Change Biology*, 22(8): 2939-2956.
- Altermann, M., Rinklebe, J., Merbach, I., Korschens, M., Langer, U. & Hofmann, B. 2005. Chernozem-Soil of the Year 2005. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 168: 725-740.
- Amundson, R., Berhe, A. A., Hopmans, J. W., Olson, C., Sztein, A. E. & Sparks, D. L. 2015. Soil and human security in the 21st century. *Science*, 348(6235).
- Anderson-Teixera, K. J., Davis, S. C., Masters, M. D. & Delucia, E. H. 2009. Changes in soil organic carbon under biofuel crops. *GCB Bioenergy*, 1(1): 75-96.
- Antwi-Agyei, P. 2012. *Vulnerability and adaptation of Ghana's food production systems and rural livelihoods to climate variability*. University of Leeds (Thèse de Doctorat).
- Antwi-Agyei, P., Dougill, A. J. & Stringer, L. C. 2015. Barriers to climate change adaptation: evidence from northeast Ghana in the context of a systematic literature review. *Climate and Development*, 7(4): 297-309.
- Armstrong, A., Waldron, S., Ostle, N. J., Richardson, H. & Whitaker, J. 2015. Biotic and abiotic factors interact to regulate northern peatland carbon cycling. *Ecosystems*, 18(8): 1395-1409.
- Arrouays, D., Richer de Forges, A., Morvan, X., Saby, N.P.A., Jones, A.R. & Le Bas, C. 2008. *Environmental Assessment of Soil for Monitoring, Volume Iib: survey of National Networks*. Ispra: JRC Scientific Reports.
- Azhoni, A., Holman, I. & Jude, S. 2017. Contextual and interdependent causes of climate change adaptation barriers: Insights from water management institutions in Himachal Pradesh, India. *Science of the Total Environment*, 576: 817-828.
- Baldocchi, D., Ryu, Y. & Keenan, T. 2016. Terrestrial Carbon Cycle Variability [version 1; referees: 2 approved]. *FI000Research*, Issue 5.
- Batjes, N. H. 1996. Total Carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 47: 151-163.
- Batjes, N. H. 2016. Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks. *Geoderma*, 269: 61-68.

- Batjes, N. H. & Van Wesemael, B.** 2014. Measuring and Monitoring soil carbon. Dans: *Soil Carbon, Science, Management and Policy for Multiple Benefits*. s.l.:s.n., pp. 188-201.
- Beare, M. H., McNeill, S. J., Curtin, D., Parfitt, R. L., Jones, H. S., Dodd, M. B. & Sharp, J.** 2014. Estimating the organic carbon stabilisation capacity and saturation deficit of soils: a New Zealand case study. *Biochemistry*, 120: 71-87.
- Bell, M. J., Moody, P. W, Connolly, R.D. & Bridge, B. J.** 1998. The role of active fractions of soil organic matter in physical and chemical fertility of Ferrosols. *Australian Journal of Soil Research*, 36: 809–819.
- Bell, M. J., Moody, P. W., Yo, S. A. & Connolly, R. D.** 1999. Using active fractions of soil organic matter as indicators of the sustainability of Ferrosol farming systems. *Australian Journal of Soil Research*, 37: 279–287
- Biesbroek, G. R., Klostermann, J. E., Termeer, C. J. & Kabat, P.** 2013. On the nature of barriers to climate change adaptation. *Regional Environmental Change*, 13(5): 1119-1129.
- Blair, G., Lefroy, R. & Lisle, L.** 1995. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Soil Research*, 46: 1459–1466.
- Blodau, C., Basiliko, N. & Moore, T. R.** 2004. Carbon turnover in peatland mesocosms exposed to different water table levels. *Biogeochemistry*, 67(3): 331-351.
- Boon, H.** 2013. Preparedness and vulnerability: an issue of equity in Australian disaster situations. *Australian Journal of Emergency Management*, 28(3): 12.
- Borken, W. & Matzner, E.** 2008. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils. *Global Change Biology*, 15: 808-824.
- Bryan, E., Deressa, T. T., Gbetibouo, G. A. & Ringler, C.** 2009. Adaptation to climate change in Ethiopia and South Africa: options and constraints. *Environmental Science & Policy*, 12(4): 413-426.
- Buffam, I., Carpenter, S. R., Yeck, W., Hanson, P. C. & Turner, M. G.** 2010. Filling holes in regional carbon budgets: Predicting peat depth in a north temperate lake district. *Journal of Geophysical Research*, 115.
- Burke, E. J., Hartley, I. P. & Jones, C.** 2012. Uncertainties in the global temperature change caused by carbon release from permafrost thawing. *The Cryosphere Discussions*, 6(5): 1063-1076.
- Burke, E. J., Jones, C. D. & Koven, C. D.** 2013. Estimating the Permafrost-Carbon Climate Response in the CMIP5 Climate Models Using a Simplified Approach. *Journal of Climate*, 26: 4897-4909.
- Burney, J. A., Davis, S. J. & Lobell, D. B.** 2010. Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(26): 12052-12057.

- Burton, I. & Nations, D. P. U.** 2005. Developing strategies, policies and measures. Dans: *Adaptation policy frameworks for climate change*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 258.
- CCNUCC.** 2014. *Handbook on Measurement, Reporting and Verification for developing countries*. Bonn: s.n.
- CCNUCC.** 2016. *National Reports*. (Disponible sur: http://unfccc.int/national_reports/items/1408.php). Accès le 13 Février 2017.
- Chatterjee, A., Lal, R., Wielpolski, L., Martin, M. Z. & Ebinger, M. H.** 2009. Evaluation of Different Soil Carbon Determination Methods. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 28(3): 164-178.
- Clark, J. M., Ashley, D., Wagner, M., Chapman, P. J., Lane, S. N., Evans, C. D. & Heathwaite, A. L.** 2009. Increased temperature sensitivity of net DOC production from ombrotrophic peat due to water table draw-down. *Global Change Biology*, 15(4): 794-807.
- Conant, R., Ryan, M. G., Ågren, G. I., Birge, H. E., Davidson, E. A., Eliasson, P. E., Evans, S. E., Frey, S. D., Giardina, C. P., Hopkins, F. M., Hyvönen, R., Kirschbaum, M. U. F., Lavalley, J. M., Leifeld, J., Parton, W. J., Steinweg, J. M., Wallenstein, M. D., Wetterstedt, J. Å. M. & Bradford, M. A.** 2011. Temperature and soil organic matter decomposition rates – synthesis of current knowledge and a way forward. *Global Change Biology*, 17: 3392-3404.
- Conant, R. T.** 2010. *Challenges and opportunities for carbon sequestration in grassland systems: A technical report on grassland management and climate change mitigation*. Rome: Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- Crowther, T. W., Todd-Brown, K. E. O., Rowe, C. W., Wieder, W. R., Carey, J. C., Machmuller, M. B., Snoek, B. L., Fang, S., Zhou, G., Allison, S. D., Blair, J. M., Bridgham, S. D., Burton, A. J., Carrillo, Y., Reich, P. B., Clark, J. S., Classen, A. T., Dijkstra, F. A., Elberling, B., Emmett, B. A., Estiarte, M., Frey, S. D., Guo, J., Harte, J., Jiang, L., Johnson, B. R., Kröel-Dulay, G., Larsen, K. S., Laudon, H., Lavalley, J. M., Luo, Y., Lupascu, M., Ma, L. N., Marhan, S., Michelsen, A., Mohan, J., Niu, S., Pendall, E., Peñuelas, J., Pfeifer-Meister, L., Poll, C., Reinsch, S., Reynolds, L. L., Schmidt, I. K., Sistla, S., Sokol, N. W., Templer, P. H., Treseder, K. K., Welker J. M. & Bradford, M. A.** 2016. Quantifying global soil carbon losses in response to warming. *Nature*, 540: 104-110.
- De Moraes Sá, J.C., Lal, R., Cerri, C. C., Lorenz, K., Hundria, M., Cesar, P. & Carvalho, F.** 2017. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. *Environment International*, 98: 102-112.
- Deb, S., Bhadoria, P. B. S., Mandal, B., Rakshit, A. & Singh, H. B.** 2015. Soil organic carbon: Towards better soil health, productivity and climate change mitigation. *Climate change and Environmental Sustainability*, 3(1): 26-34.
- De Graaf, M. A., Adkins, J., Kardol, P. & Throop, H. L.** 2015. A meta-analysis of soil biodiversity impacts on the carbon cycle. *SOIL*, 1: 257-271.

- Degens, B.** 1997. Macro-aggregation of soils by biological bonding and binding mechanisms and the factors affecting these: a review. *Australian Journal of Soil Research*, 35: 431-459.
- Descheemaeker, K., Oosting, S. J., Homann-Kee Tui, S., Masikati, P., Falconnier, G. N. & Giller, K. E.** 2016. Climate change adaptation and mitigation in smallholder crop–livestock systems in sub-Saharan Africa: a call for integrated impact assessments. *Regional Environmental Change*, 16(8): 2331-2343.
- Dexter, A.** 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research*, 11: 199-235.
- Dlamini, P., Chivenge, P. & Chaplot, V.** 2016. Overgrazing decreases soil organic carbon stocks the most under dry climates and low soil pH: A meta-analysis shows. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 221: 258-269.
- Dorrepaal, E., Toet, S., van Logtestijn, R. S. P., Swart, E., van de Weg, M. J., Terry V. Callaghan, T. V. & Aerts, R.** 2009. Carbon respiration from subsurface peat accelerated by climate warming in the subarctic. *Nature*, 460(7255): 616-619.
- Easterling, W. E., Chhetri, N. & Niu, X.** 2003. Improving the realism of modeling agronomic adaptation to climate change: simulating technological substitution. Dans: *Issues in the Impacts of Climate Variability and Change on Agriculture*. s.l.:Springer Netherlands, pp. 149-173.
- FAO & ITPS.** 2015. *Status of the World's Soil Resources*, Rome: s.n.
- FAO.** 1998. *World reference base for soil resources*. Rome: FAO, ISRIC and ISSS.
- FAO.** 2004. *Carbon sequestration in dryland soils*, Rome: FAO.
- FAO.** 2010. *The world's forests 2010*. (Disponible sur http://foris.fao.org/static/data/fra2010/fao_forest_map_2010.pdf). Accès le 1^{er} mars 2017.
- FAO.** 2012. *Peatlands - guidance for climate change mitigation through conservation, rehabilitation and sustainable use*. Rome: FAO and Wetlands International.
- FAO.** 2015. *Learning tool on Nationally Appropriate Mitigation Actions (NAMAs) in the agriculture, forestry and other land use (AFOLU) sector*. Rome: FAO.
- FAO.** 2015a. *Revised World Soil Charter*. Rome: FAO.
- Gärdenäs, A. I., Ågren, G. I., Bird, J. A., Clarholm, M., Hallin, S., Ineson, P., Kätterer, T., Knicker, H., Nilsson, S. I., Näsholm, T., Ogle, S., Paustian, K., Persson, T. & Stendahl, J.** 2011. Knowledge gaps in soil carbon and nitrogen interactions – From molecular to global scale. *Soil Biology and Biogeochemistry*, 43: 702-717.
- Gardi, C. & Jeffery, S.** 2009. *Soil Biodiversity*. Luxembourg: Centre de recherche commun; Institut pour l'environnement et la durabilité.
- GIEC.** 2006. Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux des gaz à effet de serre, préparé par le Programme pour les inventaires nationaux des gaz à effet de serre, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. et Tanabe K. (éds). Publié: IGES, Japon.

GIEC. 2007. *Changement climatique 2007: l'atténuation du changement climatique. Rapport du Groupe de travail III - L'atténuation du changement climatique.* B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (édition) [Cambridge University Press](http://www.cambridge.org/9780521864614), Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, Etats-Unis.

GIEC. 2014. *Changement climatique 2014: synthèse, rapport des groupes de travail I, II et III au cinquième rapport d'évaluation du Groupement Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.* Genève: GIEC.

GIEC. 2015. *Technical Assessment of IPCC Inventory Guidelines - Results of Questionnaire Survey AFOLU.* Bonn: s.n.

Global Soil Data Task. 2000. *Global Soil Data Products CD-ROM (IGBP-DIS). CDROM. International Geosphere-Biosphere Programme, Data and Information System.* Postdam, Germany: Disponible à Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A.

Gougoulias, C., Clark, J. M. & Shaw, L. J. 2014. The role of soil microbes in the global carbon cycle: tracking the below-ground microbial processing of plant-derived carbon for manipulating carbon dynamics in agricultural systems. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94: 2362-2371.

Guo, L. B. & Gifford, R. M. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a metaanalysis. *Global Change Biology*, 8(4): 345-360.

Haddaway, N. R., Hedlund, K., Jackson, L. E., Kätterer, T., Lugato, E., Thomsen, I. K., Helene B. Jørgensen, H. B. & Isberg, P-E. 2016. How does tillage intensity affect soil organic carbon? A systematic review protocol. *Environmental Evidence*, 5(1).

Han, P., Zhang, W., Wang, G., Sun, W. & Huang, Y. 2016. Changes in soil organic carbon in croplands subjected to fertilizer management: a global meta-analysis. *Scientific Reports*, 6: 27199.

Hergoualc'h, K., Blanchart, E., Skiba, U., Hénault, C. & Harmanda, J-M. 2012. Changes in carbon stock and greenhouse gas balance in a coffee (*Coffea arabica*) monoculture versus an agroforestry system with *Inga densiflora*, in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 148: 102-110.

Hiederer, R. & Köchy, M. 2011. *Global Soil Organic Carbon Estimates and the Harmonized World Soil Database.* Luxembourg: JRC-IES.

Hönisch, B., Hemming, N. G., Archer, D., Siddall, M., McManus, J. F. 2009. Atmospheric Carbon Dioxide Concentration across the Mid-Pleistocene Transition. *Science*, 324(5934): 1551-1554.

Howden, S. M., Soussana, J-F, Tubiello, F. N., Chhetri, N., Dunlop, M. & Meinke, H. 2007. Adapting agriculture to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50): 19691-19696.

Huang, J., Yu, H., Guan, X., Wang, G. & Guo, R. 2015. Accelerated dryland expansion under climate change. *Nature Climate Change*, 6: 166-171.

Hugelius, G., Strauss, J., Zubrzycki, S., Harden, J. W., Schuur, E. A. G., Ping, C.-L., Schirmer, L., Grosse, G., Michaelson, G. J., Koven, C. D., O'Donnell, J. A., Elberling, B., Mishra, U., P. Camill, P., Yu, Z., Palmtag, J. & Kuhry, P. 2014. Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps. *Biogeosciences*, 11: 6573-6593.

- Hugelius, G., Tarnocai, C., Broll, G., Canadell, J. G., Kuhry, P. & Swanson, D. K. 2013. The Northern Circumpolar Soil Carbon Database: spatially distributed datasets of soil coverage and soil carbon storage in the northern permafrost. *Earth System Science Data*, 5: 5-13.
- Jaconi, A., Don, A. & Freibauer, A. in review. Global and stratified models for soil organic carbon prediction by near infrared spectroscopy on regional scale. *European Journal of Soil Science*.
- Jandl, R., Rodeghiero, M., Martinez, C., Cotrufo, M. F., Bampa, F., van Wesemael, B., Harrison, R. B., Guerrini, I. A., de Richter Jr., D., Rustad, L., Lorenz, K., Chabbi, A. & Miglietta, F. 2014. Current status, uncertainty and future needs in soil organic carbon monitoring. *Science of the Total Environment*, 468-469: 376-383.
- Jastrow, J. D., Amonette, J. E. & Bailey, V. L. 2007. Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration. *Climatic Change*, 80: 5-23.
- Jennings, S. & Magrath, J. 2009. *What Happened to the Seasons?* s.l.: Oxfam GB.
- Jobbágy, E. G. & Jackson, R. B. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 10(2): 423-436.
- Jolivet, C., Boulonne, L. & Ratié, C. 2006. *Manuel du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols*, France: Unité InfoSol, INRA Orléans.
- Jones, L. & Boyd, E. 2011. Exploring social barriers to adaptation: insights from Western Nepal. *Global Environmental Change*, 21(4): 1262-1274.
- Kaiser, K. & Kalbitz, K. 2012. Cycling downwards – dissolved organic matter in soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 52: 29-32.
- Kane, D. 2015. *Carbon Sequestration Potential on Agricultural Lands: A Review of Current Science and Available Practices*, s.l.: s.n.
- Keestrea, S. D., Bouma, J., Wallinga, J., Tittonell, P., Smith, P., Cerdà, A., Montanarella, L., Quinton, J. N., Pachepsky, Y., van der Putten, W. H., Bardgett, R. D., Moolenaar, S., Mol, G., Jansen, B. & Fresco, L. O. 2016. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *SOIL*, 2: 111-128.
- Keiluweit, M., Bougoure, J. J., Nico, P. S., Pett-Ridge, J., Weber, P. K. & Kleber, M. 2015. Mineral protection of soil carbon counteracted by root exudates. *Nature Climate Change*, 5: 588–595.
- Kell, D. B. 2012. Large-scale sequestration of atmospheric carbon via plant roots in natural and agricultural ecosystems: why and how. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 367(1595): 1589-1597.
- Kithiia, J. 2011. Climate change risk responses in East African cities: need, barriers and opportunities. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3(3): 176-180.
- Klein, R. J. T., Nicholls, R. J., Ragoonaden, S., Capobianco, M., Aston, J. & Buckley, E. N. 2001. Technological options for adaptation to climate change in coastal zones. *Journal of Coastal Research*, 17(3): 531-543.
- Klingenuß, C., Roßkopf, N., Walter, J., Heller, C. & Zeitz J. 2014. Soil organic matter to soil organic carbon ratios of peatland soil substrates. *Geoderma*, 234-235: 410-417.

Knicker, H. 2007. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review. *Biogeochemistry*, 85: 91-118.

Knox, S. H., Sturtevant, C., Matthes, J. H., Koteen, L., Verfaillie, J. & Baldocchi, D. 2015. Agricultural peatland restoration: effects of land-use change on greenhouse gas (CO₂ and CH₄) fluxes in the Sacramento-San Joaquin Delta. *Global Change Biology*, 21(2): 750-765.

Köchy, M., Hiederer, R. & Freibauer, A. 2015. Global distribution of soil organic carbon - Part 1: Masses and frequency distributions of SOC stocks for the tropics, permafrost regions, wetlands, and the world. *SOIL*, 1: 351-365.

Kolikow, S., Kragt, M. & Mugeru, A. 2013. *An interdisciplinary framework of limits and barriers to agricultural climate change adaptation*. Adelaide, 20^{ème} Congrès international sur la simulation et la modélisation.

Koven, C. D., Ringer, B., Friedlingstein, P., Ciais, P., Cadule, P., Khvorostyanov, D., Krinner, G. & Tarnocai, C. 2011. Permafrost carbon-climate feedbacks accelerate global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(36): 14769-14774.

Lal, R. 2001. World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. *Advances in Agronomy*, 71: 145-191.

Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677): 1623-1627.

Lal, R. 2005. Forest Soils and Carbon Sequestration. *Forest Ecology and Management*, 220: 242-258.

Lange, M., Eisenhauer, N., Sierra, C. A., Bessler, H., Engels, C., Griffiths, R. I., Mellado-Vázquez, P. G., Malik, A. A., Roy, J., Scheu, S., Steinbeiss, S., Thomson, B. C., Trumbore, S. E. & Gleixner, G. 2015. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. *Nature Communications*, 6: 6707.

Lorenz, K. & Lal, R. 2016. *Soil Organic Carbon - An appropriate Indicator to Monitor Trends of Land and Soil Degradation within the SDG Framework?* Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Le Quéré, C., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Sitch, S., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Manning, A. C., Boden, T. A., Tans, P. P., Houghton, R. A., Keeling, R. F., Alin, S., Andrews, O. D., Anthoni, P., Barbero, L., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., Currie, K., Delire, C., Doney, S. C., Friedlingstein, P., Gkritzalis, T., Harris, I., Hauck, J., Haverd, V., Hoppema, M., Goldewijk, K. K., Jain, A. K., Kato, E., Körtzinger, A., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Lombardozzi, D., Melton, J. R., Metzl, N., Millero, F., Monteiro, P. M. S., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S.-I., O'Brien, K., Olsen, A., Omar, A. M., Ono, T., Pierrot, D., Poulter, B., Rödenbeck, C., Salisbury, J., Schuster, U., Schwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I., Stocker, B. D., Sutton, A. J., Takahashi, T., Tian, H., Tilbrook, B., van der Laan-Luijkx, I. T., van der Werf, G. R., Viovy, N., Walker, A. P., Wiltshire, A. J. & Zaehle, S. 2016. Global Carbon Budget 2016. *Earth System Science Data*, 8: 605-649.

Lee, B. L. 2007. Information technology and decision support system for on-farm applications to cope effectively with agrometeorological risks and uncertainties. Dans: *Managing Weather and Climate Risks in Agriculture*. s.l.:Springer Berlin Heidelberg, pp. 191-207.

- Lehmann, J. & Kleber, M.** 2015. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528(7580): 60-68.
- Lehmann, L., Abiven, S., Kleber, M., Pan, G., Singh, B. P., Sohi, S. P. & Zimmerman, A. R.** 2015. Persistence of biochar in soil. Dans: *J. a. J. S. Lehmann, éd. Biochar for Environmental Management - Science, technology*. Routledge: s.n., pp. 235-283.
- Levy, P. E., Burden, A., Cooper, M. D. A., Dinsmore, K. J., Drewer, J., Evans, C., Fowler, D., Gaiawyn, J., Gray, A., Jones, S. K., Jones, T., McNamara, N. P., Mills, R., Ostle, N., Sheppard, L. J., Skiba, U., Sowerby, A., Ward, S. E. & Zielinski, P.** 2012. Methane emissions from soils: synthesis and analysis of a large UK data set. *Global Change Biology*, 18(5): 1657-1669.
- Liniger, H., Mekdaschi Studer, R., Hauert, C. & Gurtner, M.** 2011. *Sustainable Land Management in Practice – Guidelines and Best Practices for Sub-Saharan Africa*. s.l.: Terrafrica, World Overview of Conservation Approaches and Technologies (WOCAT) et Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- Liu, X., Burras, C. L., Kravchenko, Y. S., Duran, A., Huffman, T., Morras, H., Studdert, G., Zhang, X., Cruse, R. M. & Yuan, X.** 2012. Overview of Mollisols in the world: Distribution, land use and management. *Canadian Journal of Soil Science*, 92(3): 383-402.
- Lorenz, K. & Lal, R.** 2005. The Depth Distribution of Soil Organic Carbon in Relation to Land Use and Management and the Potential of Carbon Sequestration in Subsoil Horizons. *Advances in Agronomy*, 88: 35-66.
- Luo, Z., Wanga, E., Fillery, I. R. P., Macdonald, L. M., Huth, N. & Baldock, J.** 2014. Modelling soil carbon and nitrogen dynamics using measurable and conceptual soil organic matter pools in APSIM. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 186: 94-104.
- MacDougall, A. H., Avis, C. A. & Weaver, A. J.** 2012. Significant contribution to climate warming from the permafrost carbon feedback. *Nature Geoscience*, 5: 719-721.
- Mangalassery, S., Sjögersten, S., Sparkes, D. & Mooney, S.** 2015. Examining the potential for climate change mitigation from zero tillage. *The Journal of Agricultural Science*, 153(07): 1151-1173.
- Marschner, B., Brodowski, S., Dreves, A., Gleixner, G., Gude, A., Grootes, P. M., Hamer, U., Heim, A., Jandl, G., Ji, R., Kaiser, K., Kalbitz, K., Kramer, C., Leinweber, P., Rethemeyer, J., Schäffer, A., Schmidt, M. W. I., Schwark, L. & Wiesenberger, G. L. B.** 2008. How relevant is recalcitrance for the stabilization of organic matter in soils? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171: 91-110.
- McSherry, M. E. & Ritchie, M. E.** 2013. Effects of grazing on grassland soil carbon: a global review. *Global Change Biology*, 19(5): 1347-1357.
- Miltz, J. & Don, A.** 2012. Optimising Sample Preparation and near Infrared Spectra Measurements of Soil Samples to Calibrate Organic Carbon and Total Nitrogen Content. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 20(6): 695-706.
- Moser, S. C.** 2010. Communicating climate change: history, challenges, process and future directions. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1(1): 31-53.

Nations Unies. 2011. *Global drylands: A UN system-wide response*. s.l.: Groupe de gestion de l'environnement des Nations Unies.

Nations Unies. 2015. *Accord de Paris*. s.l.: s.n.

Ogle, S. M., Olander, L., Wollenberg, L., Rosenstock, T., Tubiello, F., Paustian, K., Buendia, L., Nihart, A. & Smith, P. 2014. Reducing greenhouse gas emissions and adapting agricultural management for climate change in developing countries: providing the basis for action. *Global Change Biology*, 20(1): 1-6.

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. & Wall, D.H. 2016. *Global Soil Biodiversity Atlas*. Luxembourg: Commission Européenne, Bureau des publications de l'Union Européenne.

O'Rourke, S. M., Angers, D. A., Holden, N. M. & Mcbratney, A. B. 2015. Soil organic carbon across scales. *Global Change Biology*, 21: 3561–3574.

Pallasser, R. 2013. *Technique innovation in soil carbon measurement*. University of Sydney (Thèse de Doctorat).

Palm, C., Blanco-Canqui, H., DeClerck, F., Gatere, L. & Grace, P. 2014. Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 187: 87-105.

Pan, Y., Birdsey, R. A., Phillips, O. L. & Jackson, R. B. 2013. The Structure, Distribution, and Biomass of the World's Forests. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 44: 593-622.

Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silvius, M. & Stringer, L. 2008. *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change*. Kuala Lumpur et Wageningen: Global Environment Center and Wetlands International.

Paul, E. 2014. *Soil microbiology, ecology and biochemistry*. Academic Press. pp. 598.

Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G. P. & Smith, P. 2016. Climate-smart soils. *Nature*, 532(7597): 49-57.

Petrescu, A. M. R., Lohila, A., Tuovinen, J-P., Baldocchi, D. D., Desai, A. R., Roulet, N. T., Vesala, T., Dolman, A. J., Oechel, W. C., Marcolla, B., Friborg, T., Rinne, J., Matthes, J. H., Merbold, L., Meijide, A., Kiely, G., Sottocornola, M., Sachs, T., Zona, D., Varlagin, A., Lai, D. Y. F., Veenendaal, E., Parmentier, F-J. W., Skiba, U., Lund, M., Hensen, A., van Huissteden, J., Flanagan, L. B., Shurpali, N. J., Grünwald, T., Humphreys, E. R., Jackowicz-Korczyński, M., Aurela, M. A., Laurila, T., Grüning, C., Corradi, C. A. R., Schrier-Uijl, A. P., Christensen, T. R., Tamstorf, M. P., Mastepanov, M., Martikainen, P. J., Verma, S. B., Bernhofer, C. & Cescatti, A. 2015. The uncertain climate footprint of wetlands under human pressure. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(15): 4594-4599.

Ping, C. L., Jastrow, J. D., Jorgenson, M. T., Michaelson, G. J. & Shur, Y. L. 2015. Permafrost soils and carbon cycling. *SOIL*, 1: 147-171.

- Poeplau, C. & Don, A. 2015. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops—A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 200: 33-41.
- Poeplau, C., Bolinder, M. A., Eriksson, J., Lundblad, M. & Kätterer, T. 2015. Positive trends in organic carbon storage in Swedish agricultural soils due to unexpected socioeconomic drivers. *Biogeosciences*, 12: 3241-3251.
- Poeplau, C., Vos, C. & Don, A. Accepted. Soil organic carbon stocks are systematically overestimated by misuse of the parameters bulk density and stone content. *SOIL Discuss*.
- Powlson, D. S., Stirling, C. M., Jat, M. L., Gerard, B. G., Palm, C. A., Sanchez, P. A. & Cassman, K. G. 2014. Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 4(8): 678-683.
- Raich, J. W. & Potter, C. S. 1995. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 9(1): 23-36.
- Raphael, J. P., Calonego, J. C., Milori, D. M. B. & Rosolem, C. A. 2016. Soil organic matter in crop rotations under no-till. *Soil and Tillage Research*, 155: 45-53.
- Rasse, D., Rumpel, C. & Dignac, M. 2005. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and Soil*, 269(1): 341-356.
- Rumpel, C., Chabbi, A. & Marschner, B. 2012. Carbon Storage and Sequestration in Subsoil Horizons: Knowledge, Gaps and Potentials. Dans: R. Lal et al. eds. *Recarbonization of the Biosphere*. Dordrecht, Pays-Bas: Springer, pp. 445-464.
- Rumpel, C. & Kögel-Knabner, I. 2011. Deep soil organic matter—a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant and Soil*, 338(1-2): 143-158.
- Schaefer, K., Zhang, T., Bruhwiler, L. & Barrett, A. P. 2011. Amount and timing of permafrost carbon release in response to climate warming. *Tellus*, 63(2): 165-180.
- Schaphoff, S., Heyder, U., Ostberg, S., Gerten, D., Heinke, J. & Lucht, W. 2013. Contribution of permafrost soils to the global carbon budget. *Environmental Research Letters*, 8.
- Scharlemann, J. P., Tanner, E. V., Hiederer, R. & Valerie, K. 2014. Global Soil Carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management*, 5(1): 81-91.
- Schimel, J. & Schaeffer, S. 2012. Microbial control over carbon cycling in soil. *Frontiers in Microbiology*, 3(348): 155-165.
- Schmidt, M. & Noack, A. 2000. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges. *Global Biogeochemical Cycles*, 14(3): 777-793.
- Schmidt, M. W. I., Torn, M. S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I. A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D. A. C., Nannipieri, P., Rasse, D. P., Weiner, S. & E. Trumbore, S. E. 2011. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478: 49-56.
- Schneider von Deimling, T., Meinshausen, M., Levermann, A., Huber, V., Frieler, K., Lawrence, D. M. & Brovkin, V. 2012. Estimating the near-surface permafrost carbon feedback on global warming. *Biogeosciences*, 9: 649-665.

Schuur, E. A. G., McGuire, A. D., Schädel, C., Grosse, G., Harden, J. W., Hayes, D. J., Hugelius, G., Koven, C. D., Kuhry, P., Lawrence, D. M., Natali, S. M., Olefeldt, D., Romanovsky, V. E., Schaefer, K., Turetsky, M. R., Treat, C. C. & Vonk, J. E. 2015. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*, 520: 171-179.

Schweizerische Eidgenossenschaft. 2015. *Nationale Bodenbeobachtung (NABO) 1985 – 2009*. Bern: s.n.

Secrétariat du GSP & ITPS. 2016. *GSP Guidelines for sharing national data/information to compile a Global soil Organic Carbon map (GSOC17)*. Rome: Partenariat mondial sur les sols et le groupe technique intergouvernemental sur les sols.

Serrano-Silva, N., Sarria-Guzmán, Y., Dendooven, L. & Luna-Guido, M. 2014. Methanogenesis and methanotrophy in soil: A review. *Pedosphere*, 24(3): 291-307.

Shangguan, W., Dai, Y., Duan, Q., Liu, B. & Yuan, H. 2014. A global soil data set for earth system modeling. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 6: 249-263.

Shepherd, K. & Walsh, M. 2002. Development of Reflectance Spectral Libraries for Characterization of Soil Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 66(3): 988-998.

Sietz, D., Boschütz, M. & Klein, R. J. 2011. Mainstreaming climate adaptation into development assistance: rationale, institutional barriers and opportunities in Mozambique. *Environmental Science & Policy*, 14(4): 493-502.

Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A. & Paustian, K. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241: 155-176.

Six, J., Frey, S. D., Thiet, R. K. & Batten, K. M. 2006. Bacterial and Fungal contributions to Carbon Sequestration in Agrosystems. *Soil Science Society of America*, 70(2): 555-569.

Skinner, C., Gattinger, A., Muller, A., Mäder, P., Fließbach, A., Stolze, M., Ruser, R. & Niggli, U. 2014. Greenhouse gas fluxes from agricultural soils under organic and non-organic management – a global meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 468: 553-563.

Smit, B. & Skinner, M. 2002. Adaptation options in agriculture to climate change: a typology. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 7(1): 85-114.

Smith, M. S., Horrocks, L., Harvey, A. & Hamilton, C. 2011. Rethinking adaptation for a 4°C world. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1934): 196-216.

Sparling, G. P., Schipper, L. A., Bettjeman, W. & Hill, R. 2004. Soil quality monitoring in New-Zealand: practical lessons from a 6-year trial. *Ecosystems and Environment*, 104: 523-534.

Stevenson, B. A., McNeill, S. & Hewitt, A. E. 2015. Characterising soil quality clusters in relation to land use and soil order in New Zealand: An application of the phenofom concept. *Geoderma*, 239-240: 135-142.

Stewart, C. E., Paustian, K., Conant, R. T., Plante, A. F. & Six, J. 2007. Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation. *Biochemistry*, 86: 19-31.

- Su, J., Hu, C., Yan, X., Jin, Y., Chen, Z., Guan, Q., Wang, Y., Zhong, D., Jansson, C., Wang, F., Schürer, A. & Sun, C. 2015. Expression of barley SUSIBA2 transcription factor yields high-starch low-methane rice. *Nature*, 523(7562): 602-606.
- Swim, J. K., Stern, P. C., Doherty, T. J., Clayton, S., Reser, J. P., Weber, E. U., Gifford, R. & Howard, G. S. 2011. Psychology's contributions to understanding and addressing global climate change. *American Psychologist*, 66(4): 241.
- Takahashi, B., Burnham, M., Terracina-Hartman, C., Sopchak, A. R. & Selfa, T. 2016. Climate Change Perceptions of NY State Farmers: The Role of Risk Perceptions and Adaptive Capacity. *Environmental Management*, 58(6): 946-957.
- Tarnocai, C., Canadell, J. G., Schuur, E. A. G., Kuhry, P., Mazhitova, G. & Zimov, S. 2009. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles*, 23(2).
- Thévenot, M., Dignac, M.-F. & Rumpel, C. 2010. Fate of lignins in soils: a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 42: 1200-1211.
- Thiele-Brunh, S., Bloem, J., de Vries, F. T., Kalbitz, K. & Wagg, C. 2012. Linking soil biodiversity and agricultural soil management. *Environmental Sustainability*, 4: 523-528.
- Thünen Institute. 2016. *National Forest Soil Inventory in Germany – Data quality and data management*. (Disponible sur: <https://www.thuenen.de/en/wo/projects/forest-monitoring/projekte-bodenzustandserhebung/national-forest-soil-inventory-in-germany-dataquality-and-data-management/>). Accès le 12 février 2017.
- Tisdall, J. M. & Oades, J. M. 1982. Organic matter and water – stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33: 141-163.
- Todd-Brown, K. E. O., Randerson, J. T., Hopkins, F., Arora, V., Hajima, T., Jones, C., Shevliakova, E., Tjiputra, J., Volodin, E., Wu, T., Zhang, Q. & Allison, S. D. 2014. Changes in soil organic carbon storage predicted by Earth System Models during the 21st century. *Biogeosciences*, 11: 2341-2356.
- Trumbore, S. 2009. Radiocarbon and soil carbon dynamics. *Annual Review of Earth Planetary Sciences*, 37: 47-66.
- Trumbore, S. & Czimczik, C. 2008. An uncertain future for soil carbon. *Science*, 321(5895): 1455-1456.
- Turvey, C. G. 2001. Weather derivatives for specific event risks in agriculture. *Review of Agricultural Economics*, 23(2): 333-351.
- UN-HABITAT. 2010. *Challenges of Municipal Finance in Africa with special reference to Gaborone City, Botswana*. Nairobi: The Human Settlements Finance Systems Series.
- Uveges, J. B. 2015. *Hungarian Soil Monitoring System*. Ispra: s.n.
- Van Groenigen, K. J., Qi, X., Osenberg, C. W., Luo, Y. & Hungate, B. A. 2014. Faster decomposition under increased atmospheric CO₂ limits soil carbon storage. *Science*, 344: 508-209.

- Van der Wal, A. & De Boer, W.** 2017. Dinner in the dark: Illuminating drivers of soil organic matter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 105: 45-48.
- Viscarra Rossel, R. A., Walvoort, D. J. J., McBratney, A. B., Janik, L. J. & Skjemstad, J. O.** 2006. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, 131(1-2): 59-75.
- Vogel, C., Mueller, C. W., Höschen, C., Buegger, F., Heister, K., Schulz, S., Schloter, M. & Kögel-Knabner, I.** 2014. Submicron structures provide preferential spots for carbon and nitrogen sequestration in soils. *Nature Communications*, 5: 2947.
- Von Lützw, M., Kögel-Knabner, L., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B. & Flessa, H.** 2006. Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review. *European Journal of Soil Science*, 57: 426-445.
- Wall, D. H., Nielson, U. N. & Six, J.** 2015. Soil biodiversity and human health. *Nature*, 528: 69-76.
- Walter, K., Don, A., Tiemeyer, B. & Freibauer, A.** 2016. Determining Soil Bulk Density for Carbon Stock Calculations: a systematic Method comparison. *Soil Science Society of America Journal*, 80(3): 579-591.
- Ward, S. E., Bardgett, R. D., McNamara, N. P., Adamson, J. K. & Ostle, N. J.** 2007. Long-term consequences of grazing and burning on northern peatland carbon dynamics. *Ecosystems*, 10(7): 1069-1083.
- Weissert, L., Salmond, J. & Scwendenmann, L.** 2016. Variability of soil organic carbon stocks and soil CO₂ efflux across urban land use and soil cover types. *Geoderma*, 271: 80-90.
- WRI.** 2016. *MRV 101: Understanding Measurement, Reporting, and Verification of Climate Change Mitigation*, WRI Working Paper. Washington DC: WRI. (disponible sur: https://www.wri.org/sites/default/files/MRV_101_0.pdf). Accès le 21 février 2017.
- Zdruli, P., Lal, R., Cherlet, M. & Kapur, S.** 2017. New World Atlas of Desertification and Issues of Carbon Sequestration, Organic Carbon Stocks, Nutrient Depletion and Implications for Food Security. Dans: *Carbon Management, Technologies, and Trends in Mediterranean Ecosystems*. Springer International Publishing. pp. 13-25.
- Zhao, B., Zhang, J., Yu, Y., Karlen, D. L. & Hao, X.** 2016. Crop residue management and fertilization effects on soil organic matter and associated biological properties. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(17): 17581-17591.
- Ziervogel, G., Johnston, P., Matthew, M. & Mukheibir, P.** 2010. Using climate information for supporting climate change adaptation in water resource management in South Africa. *Climatic Change*, 103(3): 537-554.
- Zimmermann, M., Leifeld, J., Schmidt, M. W. I., Smith, P. & Fuhrer, J.** 2007. Measured soil organic matter fractions can be related to pools in the RothC model. *European Journal of Soil Science*, 58: 658-667.

ANNEXES

ANNEXE 1 : MÉTHODES PRINCIPALES POUR DÉTERMINER LA TENEUR EN COS

Etabli à partir de Lorenz et Lal, 2016; Secrétariat du GSP et ITPS, 2016; Pallasser, 2013; Chatterjee *et al.*, 2009.

Type de méthode	Nom		Avantages	Désavantages
Analytique	Combustion par voie sèche	Analyse automatique du carbone	<ul style="list-style-type: none"> Standard actuel Actuellement le plus fiable Rapide Simple 	<ul style="list-style-type: none"> Coûteux Mesure séparée du carbone organique et du carbone total du sol rarement disponible (seulement pour les nouveaux analyseurs d'éléments qui effectuent une combustion en deux étapes) Nécessité d'un grand nombre d'échantillons Gourmand en énergie Interférence des carbonates
		Perte au feu	<ul style="list-style-type: none"> Auparavant largement utilisée Méthode facile à appliquer Peu coûteuse 	<ul style="list-style-type: none"> Peu fiable dû aux réactions non liées à la MO (ex. interférence des carbonates ou eau interne) Surestime la teneur en MO (susceptible de comptabiliser les oxydes et les carbonates dus aux températures élevées) COS dérivé de la MOS avec un facteur de conversion (0.58) qui s'avère être incorrect pour les couches organiques
	Combustion humide	Walkey-Black	<ul style="list-style-type: none"> Auparavant largement utilisée Peu coûteuse Evaluation approximative rapide Vise en particulier certains réservoirs de MO Petite interférence par les carbonates 	<ul style="list-style-type: none"> Destructive Oxydation incomplète: besoin d'un facteur de correction Tend à sous-estimer le COS Interférence des chlorures et oxydes de Mn²⁺ et Fe²⁺ Utilise des composés chimiques dangereux

Type de méthode	Nom	Avantages	Désavantages
Téledétection	Spatiale ou aérienne	<ul style="list-style-type: none"> • S'utilise sur de grandes zones • Non destructive 	<ul style="list-style-type: none"> • Profondeur d'échantillonnage limitée • Indices de substitution nécessaires
Spectroscopie	Absorbance infrarouge ou spectroscopie par réflectance: spectroscopie dans le visible et proche infrarouge (Vis-NIR) et mi-infrarouge (MIR)	<ul style="list-style-type: none"> • Précise et juste (moins précis dans la région du visible) • Rapide • Relativement peu coûteuse • Non destructive • S'utilise en laboratoire ou sur le terrain • Grande capacité • Potentiel pour téledétection • Rend possible un échantillonnage à haute densité • Technique analytique puissante 	<ul style="list-style-type: none"> • Besoin continu de calibration • Relativement grand nombre d'échantillons requis • L'humidité du sol peut limiter la précision • Données de laboratoire de référence appropriées et correctes requises • Incapacité à gérer directement les interférences non liées aux composants du COS dans les échantillons d'origine inconnue • Analyse chimométrique nécessaire
	Spectroscopie sur plasma induit par laser	<ul style="list-style-type: none"> • Précise (jusqu'à 1mm de résolution) et juste • Grande capacité • Usage possible sur le terrain • Analyse rapide 	<ul style="list-style-type: none"> • Coûteuse • Invasive • Encore en phase de développement • Mesure le carbone total du sol • La présence de racines et de fragments rocheux peut entraîner une variabilité du signal pour le C • Pas de courbe de calibration universelle • Dangereuse pour la santé • Interférence des carbonates, fer et eau
	Diffusion inélastique des neutrons	<ul style="list-style-type: none"> • Précise et Juste • Non destructive (pas d'enlèvement de sol, pas de combustion) • Analyse sur le terrain • Grand potentiel pour le futur de la détermination du C du sol 	<ul style="list-style-type: none"> • Coûteuse • Toujours en développement • Pas de mesure séparée du COS et du C inorganique du sol • Meilleurs résultats pour les sols riches en C • Dangereuse pour la santé • Interférence des carbonates

ANNEXE 2 : EXEMPLES DE SYSTÈMES ACTUELS DE SUIVI DU COS (NON EXHAUSTIF)

Pays (référence)	Région couverte	Sélection du site ¹	Echantillonnage de sol ²	Profondeur des sous-échantillons (cm)	Dates d'échantillonnages
Allemagne <i>(Arrouays et al., 2008 ; Batjes et Van Wesemael, 2014)</i>	Cultures et pâturages Voir aussi Walter, <i>et al.</i> , 2016	Grille	Composite	0-10, 10-30, 30-50 et 50-70 et 70-100	<ul style="list-style-type: none"> • Premier échantillonnage en 1986 • Tous les 10 ans
	Sols de forêt (BZE) Aussi Thunen Institute, 2016	Grille	Composite	0-5, 5-10, 10-30, 30-60, 60-90 cm; si possible 90-140 cm et 140-200 cm	<ul style="list-style-type: none"> • Premier inventaire BZE 1987-1993 • Dernier ré-échantillonnage 2009-2016
Mexique <i>(Batjes et Van Wesemael, 2014)</i>	Sols de forêts et hors forêt (surtout pâturages et zones arbustives)	Grille	Composite	0-30 et 30-60 cm	<ul style="list-style-type: none"> • A démarré en 2003 • Tous les 5 ans (tous les ans 20% des sites sont ré-échantillonnés)
Nouvelle Zélande <i>(Sparling et al., 2004; Batjes et Van Wesemael, 2014; Stevenson et al., 2015)</i>	Toutes les régions	Stratifié (700 sites d'échantillonnage)	Simple	Variable, échantillonnage par horizon de sol; en 2009, 1 235 échantillons à 30 cm	<ul style="list-style-type: none"> • Premier échantillonnage en 1978 • Fin de l'échantillonnage en 2009
Suède <i>(Arrouays et al., 2008 ; Batjes et Van Wesemael, 2014; Poeplau et al., 2015)</i>	Cultures (environ 3 Mha)	Grille	Composite	0-20 cm pour l'horizon superficiel et 40-60 cm pour le sous-sol. En 2003: 500 échantillons 0-20, 20-40 et 40-60 cm	<ul style="list-style-type: none"> • Premier inventaire 1983-1988 • Répétition tous les 10 ans • Nouvel inventaire en cours

Pays (référence)	Région couverte	Sélection du site ¹	Echantillonnage de sol ²	Profondeur des sous-échantillons (cm)	Dates d'échantillonnages
France (RMQS) <i>(Jolivet, et al., 2006)</i>	Toutes les régions	Grille	Composite	0-30 (Cultures: 0-plus petite profondeur de labour), 30-50 (Cultures: 30-plus grande profondeur de labour) cm	<ul style="list-style-type: none"> • Premier inventaire 2001-2006 • Répétition tous les 10 ans • Inventaire forestier depuis 1995
Angleterre et pays de Galles (Inventaire du sol national) <i>(Arrouays, et al., 2008)</i>	Toutes les régions	Grille	Composite	Profondeur fixe 0-15 cm	<ul style="list-style-type: none"> • Premier inventaire 1966-1987 • Répétition tous les 7 à 37 ans
Ecosse (Inventaire du sol national d'Ecosse) <i>(Arrouays, et al., 2008)</i>	Toutes les régions	721 sites de suivi	Simple	Par horizon pédologique jusqu'à 100 cm	<ul style="list-style-type: none"> • Premier inventaire 1970-1980 • Dernier ré-échantillonnage 2007-2010
Suisse (NABO) <i>(Schweizerische Eidgenossenschaft, 2015)</i>	Toutes les régions	103 sites de suivi	4 échantillons composites à partir de 25 échantillons simples sur une surface de 10x10 m	0-20 cm, depuis 2005 20-40 cm, depuis 2010 jusqu'à 100 cm	<ul style="list-style-type: none"> • NABO a débuté en 1985 • Répétition tous les 5 ans
Hongrie (TIM) <i>(Arrouays, et al., 2008; Uveges, 2015)</i>	Tous les types d'occupation du territoire	Stratifié (1 236 sites d'échantillonnage)	1 échantillon composite sur 9 points d'échantillonnage)	0-30, 30-60, 60-90 cm (horizon pédologique jusqu'à 150 cm pour les sols forestiers)	<ul style="list-style-type: none"> • TIM a débuté en 1992 • Répétition tous les 3 ans

1 L'échantillonnage stratifié revient à diviser le site en différentes sections homogènes. Il permet l'attribution d'un plus grand nombre d'échantillons dans les couches avec une plus grande variabilité dans le stock de COS. Pour l'échantillonnage grille, le site est divisé en de petites aires ou blocs. Un même point par bloc est échantillonné plusieurs fois. En général, plus l'unité d'échantillonnage est petite, meilleure est la précision. L'échantillon grille est une technique pratique et efficace et résulte généralement en une meilleure estimation de la variable qui intéresse.

2 Contrairement à l'échantillonnage simple, l'échantillonnage composite rassemble un nombre suffisant d'échantillons, collectés à partir d'un ensemble de matériel pour en faire un échantillonnage homogène aux fins d'analyse.



MINISTRY FOR FOREIGN AFFAIRS
OF ICELAND



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

ISBN 978-92-5-209681-8



9 789252 096818

I6937FR/1/09.17