

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou

Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques

Département des Sciences Agronomiques

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de Master II en Agronomie

Spécialité : Science du sol

Thème

Dynamique et Stockage du Carbone dans les sols

Réalisé par :

M^{me} GUETTARI Samia

Soutenu devant le jury composé de :

Président : M^r MERROUKI K.

M.C.B. à L'U.M.M.T.O.

Promotrice : M^{me} BOURBIA S.

M.C.A. à L'U.M.M.T.O.

Examinatrice : M^{me} OMOURI O.

M.A.A. à L'U.M.M.T.O.

Promotion 2019/2020

Remerciements

Je remercie le Seigneur tout puissant d'avoir guidé chacun de mes pas pour la réalisation de ce mémoire et sans lui ce mémoire n'aurait pu être réalisé.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et mes remerciements les plus vifs à M^{me} BOURBIA S, maitre de conférence à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou pour m'avoir confié ce sujet et qui tout au long de ce travail m'a fait bénéficier de son savoir et de ses conseils.

A M^r MERROUKI K, maitre de conférences à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou qui a accepté de présider le jury.

A M^{me} OMOURI O, maitre assistant à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou qui a accepté d'examiner le jury.

Il m'est très agréable de remercier M^{me} TIBBICHE G, doctorante à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou de m'avoir aidée.

Mes derniers remerciements, et ceux ne sont pas les moindres, vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour l'aboutissement de ce travail.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

CHAPITRE I: Généralités sur le réchauffement climatique

1. Définition	03
2. Causes de réchauffement climatique.....	04
2.1. Causes Naturelles	04
2.2. Causes humaines	05
3. Origine de gaz à effet de serre.....	06
3.1. Le méthane	06
3.2. Le dioxyde du Carbone	06
3.3. L'oxyde d'azote.....	07
4. Conséquences du réchauffement climatique.....	07
Conclusion.....	09

CHAPITRE II: Généralités sur le carbone organique

1. Définition du carbone organique.....	10
2. Effet du changement climatique.....	10
3. Le rôle de la matière organique dan le sol	11
4. Cycle du carbone organique.....	13
5. Dynamique du carbone dans le sol.....	14
Conclusion.....	17

CHAPITRE III : Séquestration du carbone dans les sols

I/ Les Stratégies de séquestrations du carbone dans les sols.....	18
1. La photosynthèse et la séquestration du carbone dans les sols	18
2. Agroforesterie et la séquestration du carbone dans les sols	19
3. Mycorhisation et la séquestration du carbone dans les sols	21

4. Rhizodéposition et la séquestration du carbone dans les sols	24
5. Introduction de l'initiative 4 pour 1000	27
6. Le rôle des sols dans la séquestration du carbone	28
II/Les facteurs du stock du carbone dans les sols.....	29
• La matière organique.....	30
• La profondeur.....	30
• Le type du sol	31
• Le climat.....	32
• Le mode d'occupation.....	34
III principaux Impacts de la séquestration du carbone dans les sols.....	35
• Sur la fertilité du sol	35
• Sur l'environnement.....	36
• Sur la biodiversité.....	36
• Sur le climat	36
• Sur les effets du réchauffement climatique	36
IV/Les pratiques culturales pour mieux stocker le carbone	37
1. Les bonnes pratiques culturales.....	37
• Le travail du sol.....	37
• Les cultures pérennes.....	37
• Culture intercalaires ou associées	38
• Couvert végétal	38
2. Efficacité des pratiques culturales.....	42
Stockage du Carbone dans les zones arides.....	42
• Généralités sur les zones arides.....	42
Conclusion générale	45
Références bibliographiques	

Liste des abréviations

C : Degré Celsius.

‰ : Pour mille.

% : Pourcentage.

C:Carbone.

UV: Ultra-violet.

GES: Gaz à effet de serre.

CO₂: Dioxyde du Carbone.

CH₄:Méthane.

N₂O: Protoxyde d'azote.

NO₂ : Dioxyde d'azote.

H₂O : Vapeur d'eau.

GIEC: Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat.

FAO: Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture.

ONF: Office National des forêts.

ADEME: Agence de développement de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

MDP : Mécanismes de développement propres.

COS: Carbone organique du sol.

MO : Matière organique.

MOS: Matière organique du sol.

PRO : Produits résiduels organiques.

GtC: Gigatonne de carbone.

tC/ha : Tonnes de carbone par hectare.

RMQS : Réseau de mesure de la qualité des sols.

GIS: Groupement d'intérêt scientifique.

CCNUCC : Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques.

OPECST : Office parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques.

OBM : Organisation de banque mondiale.

Da : densité apparente.

m: mètre.

cm : centimètre.

KgC/m²: Kilogramme de carbone par mètre carré.

Mha : million d'hectare.

ppm : partie pour million.

Liste des figures

Figure 1 : Le phénomène naturel de l'effet de serre (DREAL, 2017).

Figure 2 : Concentration atmosphérique des gaz à effet de serre de l'année 0 à l'année 2005 (Cambou, 2018).

Figure 3 : Les fonctions remplies par les matières organiques du sol (Chenu et al., 2001).

Figure 4 : Le cycle du Carbone du sol (adapté d'après Chenu et al., (2014) et Lehmann et Kleber, (2015).

Figure 5 : Modèle de la dynamique du carbone dans le sol d'après Balesdent et al., (2000)

Figure 6 : Les flux et processus de transformation de carbone au sein du verger

(Bopp ,2019).

Figure 7 : Une coupe d'une parcelle agroforesterie (Gayaud, 2009).

Figure 8 : Influence des variations de traits fonctionnels et de cortèges d'associations symbiotiques entre espèces végétales (quel que soit leur type fonctionnel) sur la stabilisation des MO dans le sol. Adapté de (Freschet et al., 2016).

Figure 9 : Représentation simplifiée des sites de production des différentes classes de rhizodépôts le long d'une racine, d'après Rovira et al., (1979) .

Figure 10 : Représentation synthétique de la dynamique des carbohydrates (sucres neutres) du carbone rhizodéposé dans les cultures de blé au stade végétatif du tallage d'après les données de Derrien et al., (2004).

Figure 11 : Stock de carbone dans les sols selon l'usage (Ademe, 2014).

Figure 12 : Surfaces et stocks totaux de carbone par grand mode d'occupation des terres, estimés d'après le RMQS.

Figure 13 : Des cultures serrées paillées, comme ici le café, n'entraînent aucune érosion

(Moeyersons, 2004).

Figure 14 : Pratiques utilisables pour favoriser le stockage de carbone par les sols agricoles (Robert et al., 2003).

Figure 15 : Potentiels d'atténuation unitaire des différentes actions, prenant en compte les émissions de tous GES, directes, indirectes et induites (Pellerin et al., 2014).

Liste des tableaux

Tableau 1 : Le stock de carbone par type de sol en Tunisie (Brahim et al., 2013).

Tableau 2 : Stocks totaux de carbone organique du sol (COS) en GtC et capacité moyenne de séquestration par grande zone agro écologique (pour une profondeur de 30 cm et 1 m) (Robert, 2002).

Tableau 3 : Stock de carbone par mode d'occupation du sol pour l'horizon 0-30 cm (Données RMQS-GIS Sol).

Tableau 4 : Principaux effets des pratiques de gestion du sol ou de l'utilisation des sols sur la séquestration du carbone (tha/an), zones arides et tropicales d'après Lal,(1999).



***Introduction
Générale***

Introduction Générale

Le carbone organique du sol, principal élément des matières organiques et sa présence est un facteur déterminant de la qualité du sol. La perte de la matière organique, donc du Carbone organique, se traduit par la dégradation de la structure du sol, par une grande vulnérabilité à l'érosion et par une réduction de la fertilité (physique, chimique et biologique) des sols (Smith et al., 1995).

La dégradation des terres demeurera un souci mondial important en raison de ses impacts défavorables sur la production agricole. Une gestion inadéquate des terres, en particulier dans les secteurs ayant des densités de population élevées et des écosystèmes fragiles. La dégradation des sols a des effets néfastes sur la sécurité alimentaire et l'agriculture durable (FAO, 2003).

L'accélération de l'évolution climatique est due aux émissions de gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 et N_2O principalement) générées par des activités humaines et les principaux secteurs responsables de cette accélération sont l'énergie, l'industrie et les transports. La gravité de réchauffement climatique est amplement confirmée. La température planétaire s'est accrue de $0,85^\circ\text{C}$ au cours de la période 1880-2012, tandis que la dernière décennie s'avère la plus chaude depuis au moins 1.400 ans ceci est à la concentration dans l'atmosphère des trois principaux des gaz à effet de serre (GES), est sans précédent depuis 800.000 ans (Madignier et al., 2014). Le changement climatique est un problème environnemental majeur pour XXI^{ème} siècle. Les préoccupations sur le réchauffement climatique global et l'augmentation des gaz à effet de serre (GES) de l'atmosphère conduisent à s'interroger sur le rôle des sols en termes de source ou de puits de carbone (Bernoux et al., 2002).

Le stockage de carbone des sols est reconnu actuellement comme l'une des solutions de lutte contre le réchauffement climatique. Plus anciennement étant connu le rôle du carbone dans la préservation et l'amélioration de la fertilité des sols.

Le sol constitue un important réservoir de carbone de la biosphère continentale contenant environ trois fois plus de carbone que la végétation et deux fois de carbone dans l'atmosphère (Rajeew et al., 2006).

Les forêts retiennent le carbone à la fois dans la biomasse vivante et morte, dans les matières organiques en décomposition dans les sols. Ce sont les processus de photosynthèse, la transpiration, de décomposition et de combustion qui entretiennent la circulation naturelle du carbone entre la forêt et l'atmosphère (Kaci, 2014).

Introduction Générale

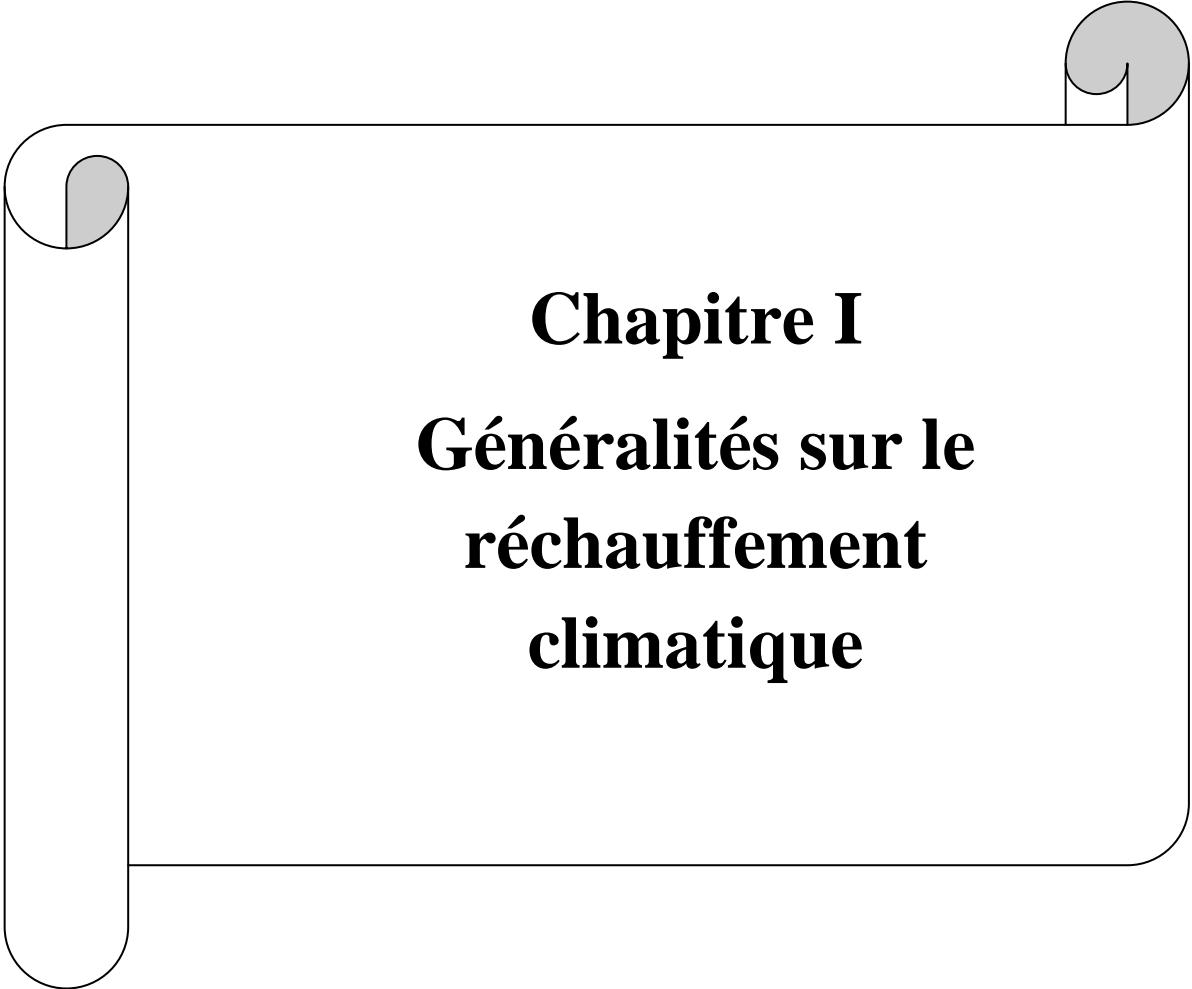
Le travail est divisé en trois chapitres

Chapitre I est consacré pour les généralités sur le réchauffement climatique.

Chapitre II est consacré pour les généralités sur le carbone organique.

Chapitre III est consacré pour la séquestration du carbone organique dans le sol.

Enfin on termine par une conclusion générale.



Chapitre I
Généralités sur le
réchauffement
climatique

1. Définition

En matière du climat, l'effet de serre est un phénomène qui intervient de façon naturelle dans l'atmosphère de la terre, une partie du rayonnement infrarouge émis par la terre vers l'atmosphère terrestre reste piégée par les gaz dits « à effet de serre », augmentant ainsi la température de la basse atmosphère (troposphère). Ces gaz sont essentiellement de la vapeur d'eau (H_2O) et du dioxyde de carbone (CO_2), sans cet effet, la température de surface de la terre serait en moyenne inférieure de $33\text{ }^{\circ}C$ c'est-à-dire $-19\text{ }^{\circ}C$ (Dunglas, 1993).

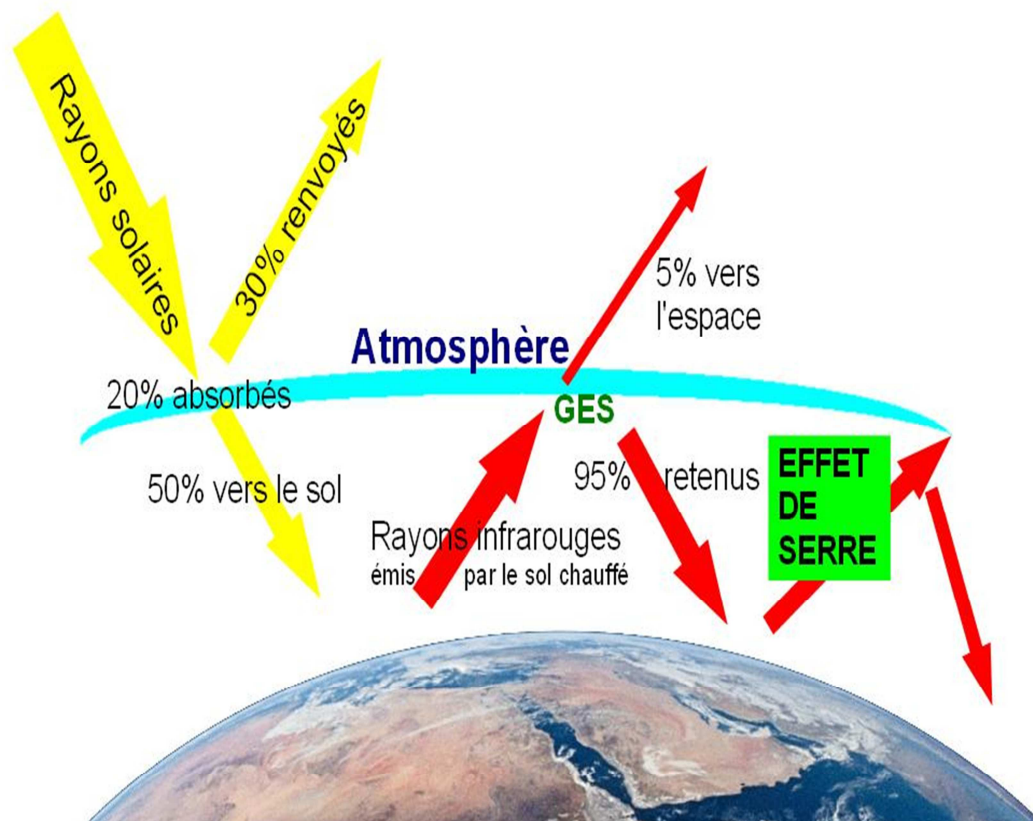


Figure 1 : Le phénomène naturel de l'effet de serre (DREAL, 2017).

Les gaz à effet de serre ce sont tous les gaz qui présentent un spectre d'absorption d'infrarouge thermique et l'augmentation de leur concentration conduit à l'augmentation de l'effet de serre (Fouquart, 2002).

Le réchauffement climatique est une des conséquences du changement climatique.

Il correspond à un phénomène d'augmentation de la température globale de la surface de la Terre qui pourrait atteindre, selon les prévisions des scientifiques du GIEC (le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) 1 à 5°C supplémentaires à la fin du XXI^e siècle.

2. Causes du réchauffement climatique

Les chercheurs au tour du monde se sont mis d'accord que le changement climatique « réchauffement » est réel est que ses causes sont liées au gaz à effet de serre comme le CO₂ et CH₄, NO₂ et N₂O qui enferment la chaleur à l'intérieur de l'atmosphère, en cas normal ils régulent la température de la planète permettant la vie sur terre.

Depuis la création de la terre le climat a été affecté par plusieurs facteurs que ça soit naturels ou anthropiques, due à cela la terre a enduré plusieurs ères différentes de l'âge glacial à l'âge modéré et d'autres ères assez chaudes (Chlighem et al., 2015).

2.1. Causes naturelles

Des événements naturels tel que l'éruption volcanique peut affecter le climat, ils éjectent des quantités énormes de poussière et de gaz dans la partie supérieure de l'atmosphère de large quantités de dioxyde de carbone et dioxyde de soufre y sont inclûtes. Qui, en réaction photochimique causé par le rayonnement UV du soleil sont transformées en acide sulfurique et des particules de sulfates.

Ils restent dans la stratosphère « partie supérieure à 10km dans l'atmosphère » pendant plusieurs années avant de retomber dans les parties inférieures de l'atmosphère sous forme de pluies acétique. Pendant que les particules sont encore dans la stratosphère, elles sont dispersées partout autour du globe renvoyant les rayons du soleil refroidissant les parties inférieurs de l'atmosphère.

2.2 .Causes humaines

Les gaz à effet de serre sont accusés d'être responsables du réchauffement climatique depuis le milieu du XIX siècle, le CO₂ est le principal accusé. Parmi les contributeurs à l'effet de serre, (Chlighemet al., 2015). Le premier rapport du GIEC date de 1990 : il reconnaît la responsabilité humaine dans les dérèglements climatiques (FAO, 2017) ; par l'émission des gaz à effet de serre (GES), qui a fortement augmenté depuis l'ère industrielle (XIX^e siècle ; Figure 1). Ce rapport sert ensuite de base à l'élaboration de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC).

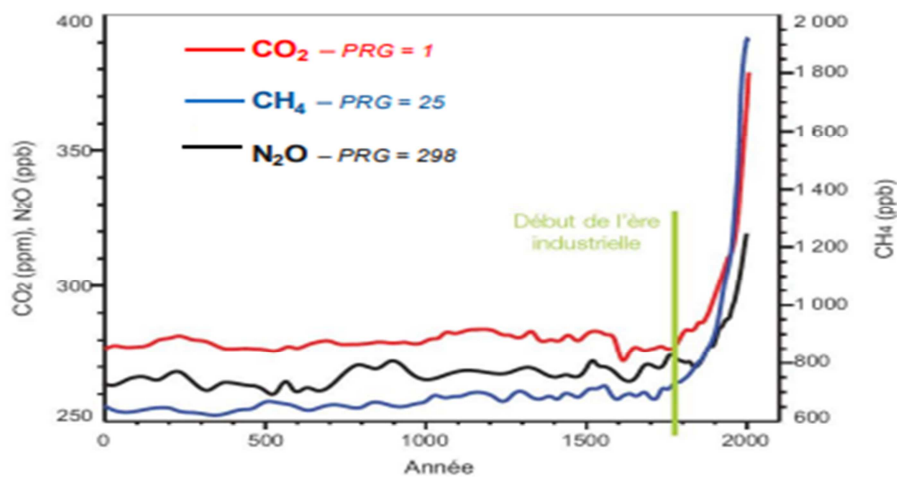


Figure 2 : Concentration atmosphérique de gaz à effet de serre de l'année 0 à l'année 2005 (Cambou, 2018).

La courbe de la (figure 2) présente ces résultats pour une période nettement plus longue. Tous les ans, les concentrations atmosphériques en CO₂ et en NH₄ et N₂O augmentent.

La transformation des écosystèmes est aussi une source d'émissions de CO₂. Par exemple, lorsque l'on coupe des arbres, on affaiblit le potentiel des écosystèmes à stocker du CO₂, donc on augmente indirectement nos émissions. C'est ce que l'on appelle la déforestation. En détruisant certains écosystèmes qui capturent du CO₂, comme les forêts vierges, on augmente donc le réchauffement climatique. C'est le même problème avec l'acidification des océans : nous polluons les océans et cela réduit sa capacité à absorber le CO₂ ce qui augmente indirectement l'effet de serre (Fournier, 2019).

Enfin, certaines activités comme l'agriculture émettent aussi beaucoup de gaz à effet de serre. L'élevage, ou les cultures en milieu humides comme la riziculture (la culture du riz) émettent

beaucoup de méthane, un gaz à effet de serre puissant qui contribue fortement au réchauffement climatique.

3. Origine des gaz à effet de serre

3.1. Le méthane

Le méthane est un puissant gaz à effet de serre. Malgré sa faible durée de vie dans l'atmosphère, il a une influence sur le climat et son évolution. Les sources de méthane sont nombreuses et variées. Elles sont parfois naturelles, parfois humaines (André et al., 2013).

Le méthane provient de la dégradation de la matière végétale par des bactéries méthanogènes, dans un milieu pauvre en oxygène.

Ce gaz est à 60% émis par l'élevage intensif des bovins, les déjections animales, les cultures (comme le riz), la fermentation des déchets organiques, les feux de forêts, l'utilisation du bois pour le chauffage et la cuisson, l'inondation de vallées lors de la mise en eau des barrages (avec la décomposition de la biomasse noyée), lors du transport et de l'exploitation du gaz et du pétrole (fuites de grisou dans les mines de charbon, de gaz avec les gazoducs, torchères...) Et enfin dans les milieux humides, compacts et mal drainés.

40% des émissions de méthane sont imputables à des processus naturels tels ceux liés aux terres humides et aux termites.

Le méthane contribue à hauteur de 20 % au forçage radiatif direct induit par les gaz à effet de serre et ses émissions connaissent une forte augmentation depuis 2007.

3.2. Le dioxyde de Carbone

C'est le principal accusé et le seul dont les médias nous répètent les méfaits, le GIEC nous dit que la concentration du CO₂ dans l'atmosphère croît rapidement, elle n'a jamais été aussi élevée depuis 800 000 ans et qu'elle va continuer à croître dans les prochaines années si rien n'est fait pour le limiter.

Tout cela résulte du traitement et de l'usage des combustibles fossilisés tel que le pétrole, le charbon et le gaz naturel pour générer l'énergie. Ces derniers ont un très grand impact sur l'atmosphère plus que n'importe quelle autre activité humaine.

Globalement, la production d'énergie est responsable pour l'émission de 23 billion de tonnes de CO₂ par an donc plus de 700 tonnes par seconde.

Le charbon est extrêmement plus endommageant pour l'atmosphère relâchant 70% plus de CO₂ que la normale pour chaque unité d'énergie produite.

Et pour les forêts qui sont censés diminuer les dégâts de la pollution « l'émission du CO₂ », sont en train de se faire détruire ou endommager à un rythme alarmant.

3.3. L'oxyde d'azote

Sa concentration est de l'ordre de 300 ppb (ppb équivalent 10⁻³ppm), il provient de la dégradation de la matière organique azotée dans les sols ou les océans comme il peut résulter de la transformation des engrais minéraux ainsi que les fumiers.

Sa faible concentration ne devrait pas conduire à les négliger car une molécule d'oxyde d'azote est 300 fois plus efficace en effet de serre qu'une molécule de CO₂.

4. Conséquences du réchauffement climatique

Le changement climatique modifie l'équilibre thermique de la terre à de nombreuses conséquences sur l'homme et l'environnement. Dans le cadre du réchauffement mondial, le bilan énergétique et la température terrestre sont modifiés en raison de la hausse des concentrations des gaz à effet de serre. Les conséquences humaines et environnementales sont perceptibles à l'échelle planétaire.

Les conséquences directes du changement climatique provoqué par l'activité humaine Selon (Fournier, 2020) sont les suivantes:

- hausse des températures maximales.
- hausse des températures minimales.
- hausse du niveau de la mer.
- hausse de la température des océans.
- intensification des précipitations (fortes pluies et grêle).
- recul et fonte des glaciers.

-dégel du permafrost.

Les conséquences indirectes du changement climatique qui concernent directement la population et l'environnement sont les suivantes:

-augmentation des crises alimentaires et de l'eau, notamment dans les pays en voie de développement.

-risques sanitaires en raison de la hausse des températures et des vagues de canicule.

-conséquences économiques pour l'élimination des conséquences climatiques.

-prolifération des nuisibles et des maladies.

-perte de la biodiversité en raison de la capacité et de la vitesse d'adaptation limitées de la faune et de la flore.

-acidification des océans due aux concentrations de HCO_3 élevées dans l'eau en raison de la hausse des concentrations de CO_2 nécessité d'agir dans tous les secteurs (p. ex. agriculture, sylviculture, énergie, infrastructure, tourisme, etc.)

Le climat mondial étant un vaste système interconnecté influencé par un grand nombre de facteurs, ses effets secondaires peuvent dès lors être positifs ou négatifs. Il s'agit de développements qui se renforcent à l'apparition de certaines conditions.

Outre le réchauffement planétaire, les augmentations de différents gaz à effet de serre ont d'autres effets tels que: la brume de pollution (smog), la destruction de la couche d'ozone ainsi que les changements de croissance et nutrition des plantes.

A cause de la forte chaleur et du stress hydrique, les plantes adoptent des mécanismes de défense qui ralentissent la photosynthèse et donc les quantités de CO_2 absorbées. Ainsi, la végétation sera moins efficace pour limiter l'effet de serre et l'intensité des sécheresses.

A l'échelle de la planète, le couvert végétal permet de capturer entre 10 et 20% des émissions humaines de CO_2 Mais ce bouclier vert risque de se transformer en menace, les écosystèmes pouvant se muer en source de carbone.

Conclusion

Le réchauffement climatique étant en lui-même un phénomène naturel, s'est accéléré avec l'action de l'homme sur son environnement. A ce réchauffement accéléré des problèmes sont constatés tant au niveau environnemental que humain, constitue une véritable menace pour la planète.

Cependant après une analyse consciencieuse de la situation, le GIEC (Groupe Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) a mis en place des solutions qui sont restées jusque là insatisfait.

Le réchauffement étant un phénomène planétaire, concerne tous les gouvernements ; il s'agira donc pour ceux-ci de conjuguer leurs efforts afin de mettre en place des solutions pour ralentir ce phénomène (Rodolphe et al., 2009).

A decorative graphic of a scroll with a black outline and grey shading on the rolled-up ends, framing the text.

Chapitre II

Généralités sur le carbone organique

Introduction:

Le sol est un patrimoine naturel non renouvelable (Chenu et al., 2011), une formation naturelle de surface à structure meuble et d'épaisseur variable, résultat de la transformation de la roche mère sous-jacente sous l'influence de divers processus physiques, chimiques et biologiques (Duchaufour, 2001). Il héberge et nourrit les espèces animales souterraines et il est le support et le réservoir alimentaire de la quasi-totalité des espèces végétales (Prevost, 1999).

1. Définition du carbone organique

Le carbone organique du sol (COS), principal élément (55 à 60%) de la matière organique du sol (MOS), a une importance cruciale pour le fonctionnement des sols. Un sol plus riche en matière organique a généralement une plus grande capacité à retenir l'eau et sera moins sujet à l'érosion. La matière organique est également la ressource trophique des organismes du sol. Sa biotransformation et sa minéralisation par les micro-organismes libèrent des éléments nutritifs (azote, phosphore) indispensables à la croissance des plantes. Par ailleurs, le carbone organique du sol a également un rôle important dans les régulations climatiques. En effet, les sols contiennent environ trois fois plus de carbone que l'atmosphère (2 400 GtC contre 830 GtC) et toute variation des stocks de carbone organique des sols, à la hausse ou à la baisse, influe sur la concentration en CO₂ atmosphérique et donc sur le climat. Le carbone organique du sol est important pour la qualité des sols et la régulation climatique. L'évolution du stock de carbone organique d'un sol dépend du différentiel entre les entrées de carbone, principalement sous forme de litière végétale, et les sorties de carbone du sol, principalement via la respiration hétérotrophe des micro-organismes du sol (Barré et al., 2019).

2. Effet du changement climatique

La biomasse végétale aérienne et racinaire participe à l'apport de carbone organique dans les sols. Les variations de productivité végétale influenceront donc fortement sur les quantités de carbone présentes dans les sols.

L'accroissement de la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre détermine un changement climatique, mais également à une série d'effets complexes et contrastés (Brinkman et al., 1996). Tous les résultats expérimentaux démontrent qu'une augmentation de la biomasse ou de la production primaire nette (NPP) par un effet fertilisant du CO₂ qui joue un rôle important dans la photosynthèse et la croissance de la plante. Le gain dans la fixation

de CO₂ peut être important dans le cas d'un doublement de la concentration de CO₂. L'augmentation de la production de CO₂ entraîne également une diminution de la conductance des stomates ce qui produit une meilleure efficacité de l'eau particulièrement pour les plantes en C4 (Kareb, 2016).

Les sols interagissent avec le changement climatique. Ils échangent en permanence les trois principaux gaz à effet de serre d'origine anthropiques (CO₂, N₂O, CH₄) avec l'atmosphère et peuvent en atténuer l'effet. Ils sont aussi affectés par les changements climatiques mais peuvent contribuer à l'adaptation des écosystèmes et de l'agriculture. Dans ces processus, les microorganismes et les matières organiques du sol ont un rôle crucial à jouer (Chenu et al, 2015).

3. Le rôle de la matière organique

La matière organique du sol représente l'indicateur principal de la qualité des sols, à la fois pour des fonctions agricoles (c'est-à-dire la production et l'économie) et pour les fonctions environnementales (parmi elles la séquestration du carbone et la qualité de l'air) (Robert, 2002).

La matière organique, est le principal déterminant de l'activité biologique. La quantité, la diversité et l'activité de la faune et des micro-organismes sont en relation directe avec la présence de la matière organique qui ont une influence majeure sur les propriétés physiques et chimiques des sols (Robert, 2002).

La MOS assure plusieurs fonctions et services éco systémiques (voir figure 2). La MOS forme avec les argiles le « complexe argilo-humique » qui, grâce à ses charges de surface négatives, adsorbe une part des cations de la solution du sol (ex : ions calcium, potassium, magnésium, sodium, etc...). Cette propriété, désignée, capacité d'échange cationique (CEC) contribue au stockage et à la mise à disposition ultérieure d'éléments nutritifs pour les plantes. La CEC permet en outre de lutter contre les pertes en éléments nutritifs par lixiviation. La MOS constitue également la source principale d'énergie et d'éléments nutritifs pour les organismes du sol, notamment les microorganismes qui minéralisent la MOS et libèrent des ions et des molécules sous une forme soluble et assimilable pour bon nombre d'autres organismes comme les plantes. Une autre fonction assurée par la MOS est celle de l'amélioration des propriétés physiques du sol. En favorisant

l'agrégation des particules et la stabilité de la structure du sol, améliore la perméabilité, l'aération. La MOS joue donc un rôle important dans la lutte contre la battance due aux pluies et contre le tassement notamment dû au travail du sol par les engins agricoles (Lefèvre, 2015).

Pour y parvenir, 3 leviers :

*Lutter contre la dégradation des sols

La dégradation des sols menace plus de 40% des terres émergées et les dérèglements climatiques accélèrent ce processus. Cette dégradation a des effets néfastes sur la sécurité alimentaire et les agricultures familiales.

*Participer à l'objectif de sécurité alimentaire

Capacité à nourrir 9,8 milliards d'humains en 2050 dans un contexte de changement climatique dépendra notamment de notre capacité à garder les sols vivants. La production agricole est fortement corrélée à la santé des sols, dont le principal indicateur est le taux de matière organique. Des sols productifs et stables favorisent directement la résilience des agricultures aux dérèglements climatiques.

*Adapter l'agriculture au changement climatique

Des sols plus riches en matière organique et donc en carbone sont mieux adaptés pour résister à l'impact des dérèglements climatiques, car ils résistent mieux à l'érosion et retiennent mieux l'eau, notamment lors d'événements extrêmes comme les sécheresses.

L'érosion a des conséquences néfastes aux plans agronomique (perte de sol cultivable) et risque de formation d'une croûte de battance, qui limite l'infiltration de l'eau et favorise donc le ruissellement et l'érosion. De manière générale, une teneur accrue en MO réduit la sensibilité du sol à l'érosion, en améliorant sa stabilité structurale, sa résistance à la battance

La teneur dans la couche superficielle du sol est particulièrement importante pour le contrôle de l'aléa érosif. Par ailleurs, la présence d'un mulch protège la surface du sol en réduisant l'énergie cinétique des pluies.

Les principales fonctions de la matière organique sont résumées sur la (figure 3).



Figure 3 : Les fonctions remplies par les matières organiques du sol (Chenu et al., 2001).

Pour ces principales fonctions, les apports exogènes en matières organiques (PRO) sont indispensables tels que les effluents d'élevage et les composts et les boues résiduaires.

4 .Le cycle du carbone

Le cycle de COS correspond à l'entrée de carbone organique dans le sol, à sa transformation et à sa dissipation. De nombreux processus sont en jeu :1) la déposition (addition de COS à la fraction organique du sol), 2) l'altération (la conversion du COS d'une structure chimique en une autre différente, résultant d'attaques enzymatiques ou de réactions chimiques), 3) l'assimilation (incorporation du COS dans les tissus des organismes décomposeurs) et enfin iv) la minéralisation qui correspond à la conversion du COS en CO₂, via la respiration

des organismes du sol (Baldock et Skjemstad, 2000). La somme de ces processus aboutit à la notion de décomposition du COS (Baldock et Skjemstad, 2000). La (figure 4) retrace ce cycle tel qu'il a été validé en milieu « naturel » et agricole.

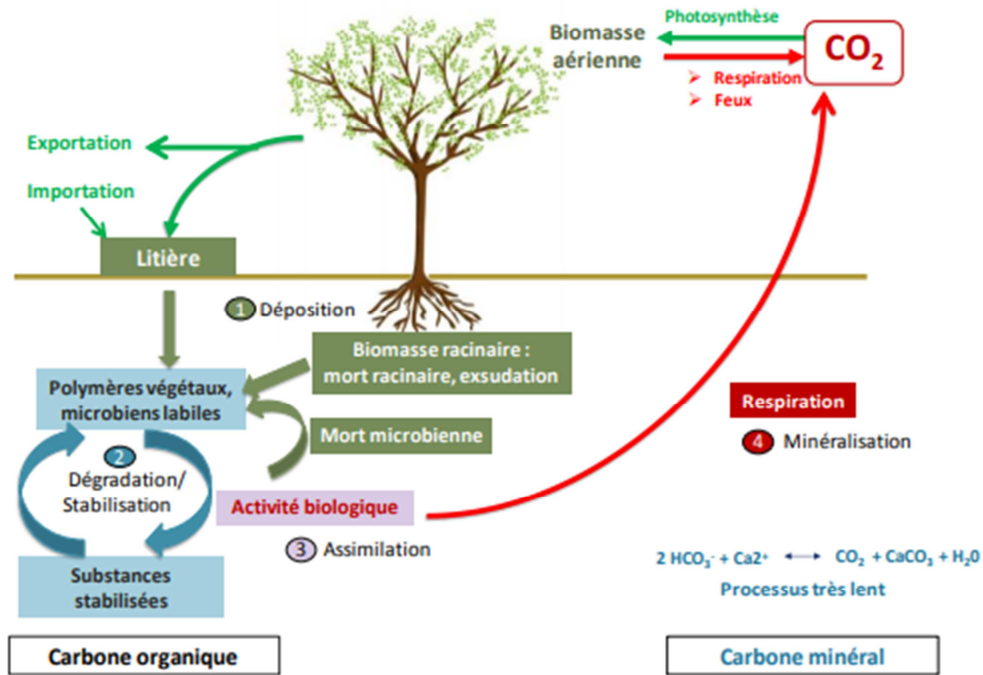


Figure 4 : Le cycle du Carbone du sol adapté d'après Chenu et al., (2014) et Lehmann et Kleber, (2015).

1- L'augmentation de la production primaire, 2- diminution des exportations et augmentation des restitutions, 3- importation de matières organiques exogènes et 4- diminution des pertes par minéralisation. Les pertes par érosion et par lixiviation de C soluble sont en conditions tempérées généralement beaucoup moins importantes que celles par minéralisation. Dans une prairie pâturée il faudrait ajouter à ces flux la consommation d'herbe par le bétail, la respiration des animaux et la restitution de leurs déjections au sol.

5. Dynamique du carbone dans le sol

Le stock de carbone organique présent dans les sols naturels présente un équilibre dynamique entre les apports de débris végétaux et la perte due à leur décomposition (minéralisation), (figure 5).

Selon (FAO, 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 (désigné 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; 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).

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 croute de surface après une pluie simulée en laboratoire (Bell et al., 1998, 1999).

1. Le C organique labile ou carburant du sol est une fraction du pool de C total.
2. Découle des ajouts récents de matière organique (MO).
3. Se décompose (s'attaque) facilement.
4. Très sensible aux changements de régies.

5. Source majeure de nourriture (énergie) des MOG du sol, son temps de résidence quelques mois (Landry, 2019).

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.

Le C organique stable plus sensible à la température que le carbone labile (Chenu, 2014), son temps de résidence allant de plusieurs décennies à plusieurs siècles et le carbone lent quelques années.

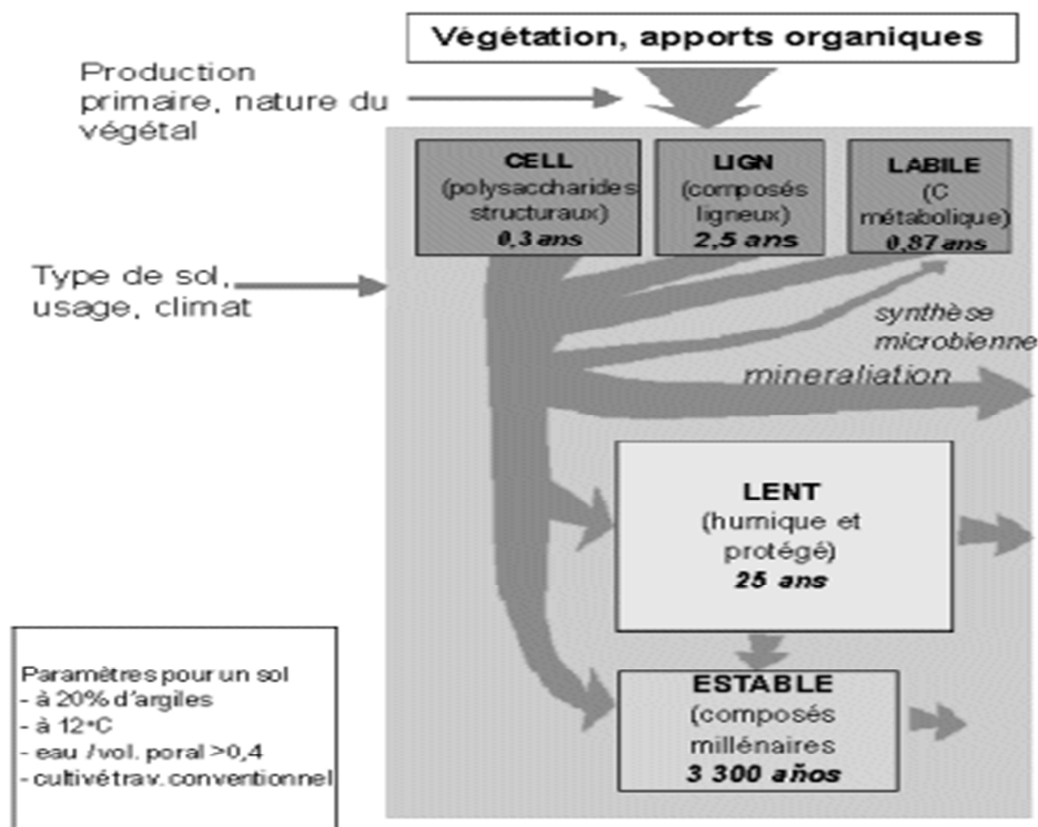


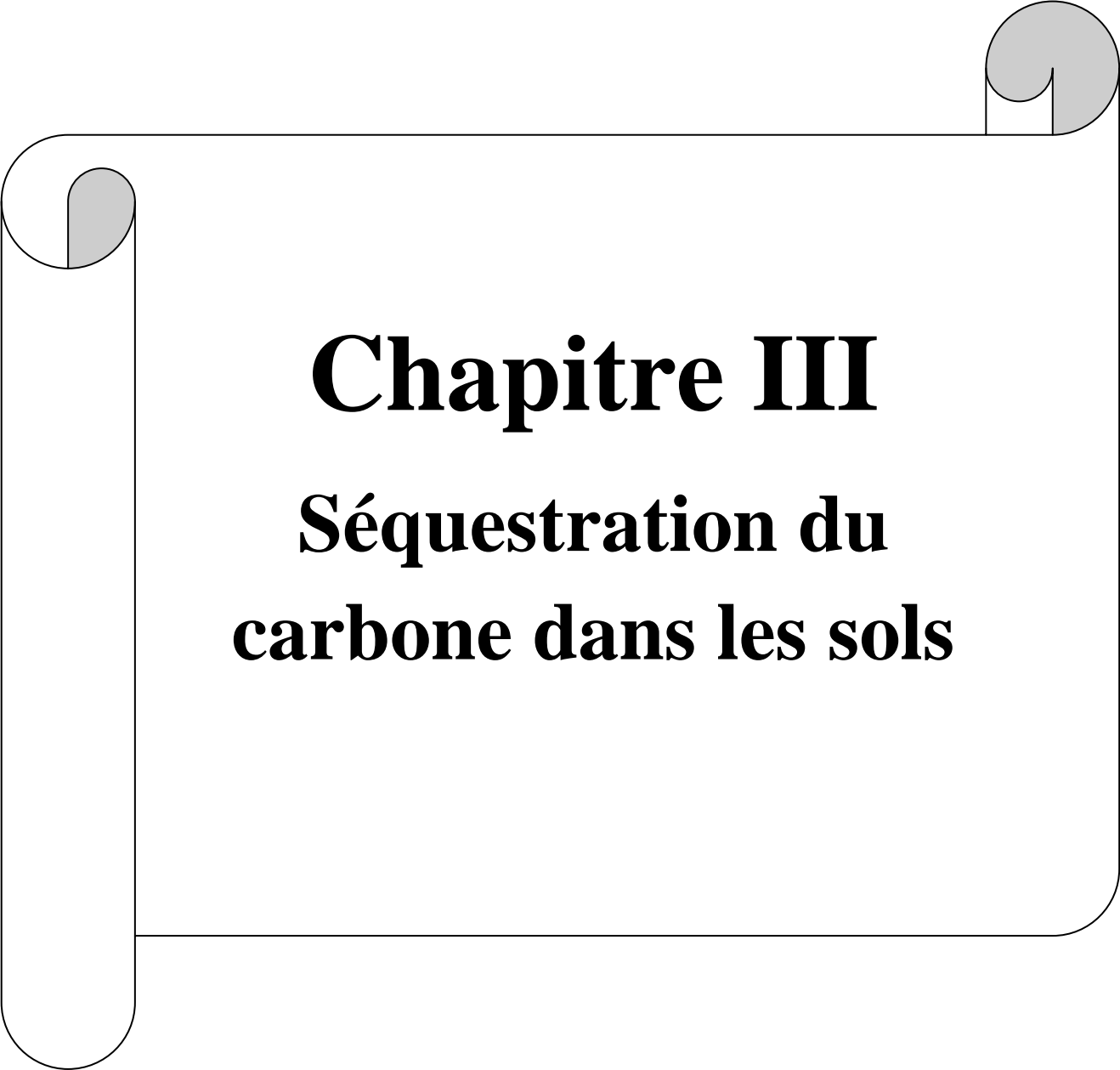
Figure 5 : Modèle de la dynamique du carbone dans le sol d'après (Balesdent et al., 2000).

Conclusion

Le carbone organique est le principal élément de la matière organique. Du fait de son importance pour la qualité des sols et les régulations climatiques, la matière organique du sol (MOS) a fait l'objet de nombreux travaux au cours des dernières décennies. Ces travaux ont permis d'établir que les matières organiques des sols ont des temps de résidence pouvant aller de quelques heures à plusieurs millénaires et qu'une part substantielle (40-60%) du carbone organique persiste dans les sols pendant plus d'un demi siècle. Cependant, la qualité chimique et les mécanismes expliquant la stabilisation pluri-décennale de la MOS demeurent largement méconnus (Barré, 2015).

Le carbone organique des sols (COS) joue un rôle fondamental dans le comportement des sols et des agroécosystèmes. Augmenter sa teneur améliore la qualité et la fertilité des sols contribuant à la résilience et à la durabilité de l'agriculture et, donc, à la sécurité alimentaire des sociétés. De plus, les sols représentent le plus grand réservoir de carbone en interaction avec l'atmosphère. Les systèmes agricoles et forestiers qui réduisent les concentrations en carbone atmosphérique en le piégeant dans les biomasses et dans la matière organique du sol, sont des puits de carbone. La lutte contre la désertification permet de séquestrer du carbone dans les sols et donc d'atténuer le changement climatique, en plus de contribuer à une gestion agronomique durable (Bernoux et al., 2013).

La richesse des sols en matières organiques (MO) est l'un des principaux indicateurs de la fertilité des sols. Elle est aussi une caractéristique de plus en plus appréciée dans un contexte global de changement climatique où le stockage du carbone dans les sols est une alternative sérieuse qui permettra de limiter les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère (Annabi et al., 2009).

A decorative graphic of a scroll with a black outline and a light gray fill. The scroll is unrolled on the left side and has two circular elements at the top corners, resembling the ends of the scroll. The text is centered within the scroll.

Chapitre III
Séquestration du
carbone dans les sols

Introduction

La séquestration ou le stockage du carbone est un mécanisme par lequel le carbone atmosphérique est fixé et stocké dans le sol grâce aux plantes ou aux résidus organiques (FAO, 2017), une augmentation de la matière organique du sol aura un impact direct sur la qualité et la fertilité du sol. Il y aura aussi des effets positifs majeurs sur l'environnement et sur la résilience et la durabilité de l'agriculture (Robert, 2002).

I/ Les stratégies de la séquestration du carbone dans les sols**1. La photosynthèse et la séquestration du carbone**

Les activités humaines émettent d'énormes quantités de gaz carbonique (CO₂) dans l'atmosphère, ce qui renforce l'effet de serre et accélère le changement climatique.

Chaque année, 30% de ce gaz carbonique (CO₂) est récupéré par les plantes grâce à la photosynthèse. Ensuite lorsque les plantes meurent et se décomposent, les organismes vivants du sol, tels que les bactéries, champignons ou vers de terre, les transforment en matière organique. Cette matière organique riche en carbone, est essentielle à l'alimentation des hommes car elle retient l'eau, l'azote, et le phosphore, indispensables à la croissance des plantes la photosynthèse élimine environ 120 Gt de carbone de l'atmosphère. Cependant, la décomposition de la matière biologique ainsi que la respiration des plantes et des microbes du sol retourne environ 120 Gt de carbone à l'atmosphère. Au niveau des océans, la photosynthèse du phytoplancton transforme le CO₂ en carbone organique qui est en grande partie retournée à l'atmosphère sous forme de CO₂ par la respiration microbienne et la décomposition. Cependant, une petite fraction du carbone organique résiste à la dégradation et coule au fond des océans (Stéphanne, 2013).

La photosynthèse permet aux arbres de capter du carbone atmosphérique pendant leur croissance, carbone ensuite stocké dans la biomasse (y compris bois mort et litière) et dans le sol. Dans une forêt tempérée, le stock de carbone se répartit pour environ moitié entre le sol et la biomasse végétale. Les conditions climatiques, les types de forêts et de sols, les perturbations naturelles (tempêtes, parasites, incendies..) et les pratiques sylvicoles menées déterminent le niveau de ce stock de carbone et ses variations (Ademe, 2015).

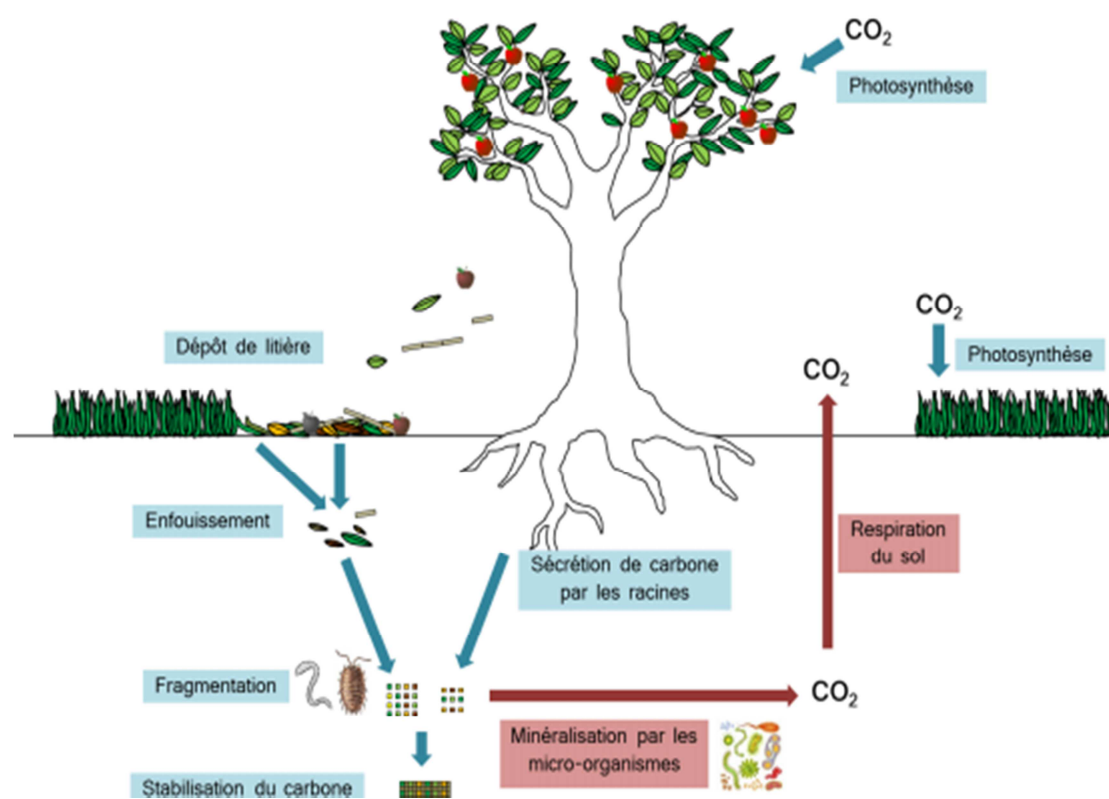


Figure 6 : Les flux et processus de transformation de carbone au sein du verger (Bopp, 2019).

2. Agroforesterie et la séquestration du carbone

La séquestration du CO_2 de l'atmosphère par la forêt prend de l'importance dans la lutte contre les changements climatiques. Les mécanismes de développement propre (MDP) induits dans le protocole de Kyoto admettent aujourd'hui cette séquestration dans des plans de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). Les modèles économiques de gestion de forêt ont commencé à prendre en compte la valeur de cette aménité de la forêt. Cependant, ils se concentrent sur le carbone verrouillé dans les arbres et non pas celui dans le sol, qui a pourtant un potentiel de séquestration plus grand (Durand, 2014).

Les systèmes agroforestiers stockent du carbone dans la biomasse des arbres. Cependant leur intérêt ne se limite pas à ce carbone stocké sous forme de bois. En effet, les arbres produisent de grandes quantités de litières, et apportent également du carbone dans les horizons profonds

du sol par la mortalité et l'exsudation racinaire. Or, les sols agricoles, ayant de très faibles teneurs en matière organique, ont un potentiel de stockage en carbone bien plus important que les sols forestiers (Cardinael, 2015).

Leur enracinement est plus profond. En effet, du fait de l'environnement cultivé et de son relatif isolement, les racines des arbres agroforestiers descendent plus profondément dans les couches du sol que celles des arbres forestiers (Hamon et al., 2009).

Les arbres agroforestiers poussent plus vite et produisent plus de biomasse. Les arbres agroforestiers sont des arbres de pleine lumière et bénéficient d'un environnement qu'il leur est favorable (fertilisation de la culture, faible concurrence entre eux, travail du sol) (Dupraz et Liagre 2008). A âge égal, ils produisent ainsi 3 fois plus de biomasse par arbre (Gavaland et Burnel 2005). L'arbre, pilier naturel de la lutte contre le CO₂ atmosphérique (Sergent., 2015)

L'agroforesterie permet donc une limitation des émissions de gaz à effet de serre grâce à son potentiel de séquestration de carbone. Elle impacte également les bilans « carbone » par substitution de combustibles fossiles ou de matériaux de construction, dotés d'une plus forte empreinte environnementale. Enfin et dans un tout autre registre, on en attend des bénéfices du point de vue de l'adaptation très locale aux changements climatiques en cours.

Les forêts jouent un rôle prédominant dans le cycle du carbone et la déforestation contribue pour plus de 90 % aux émissions issues du changement d'usage des terres et plus de 20 % aux émissions de GES à l'échelle mondiale (Houghton, 2003).

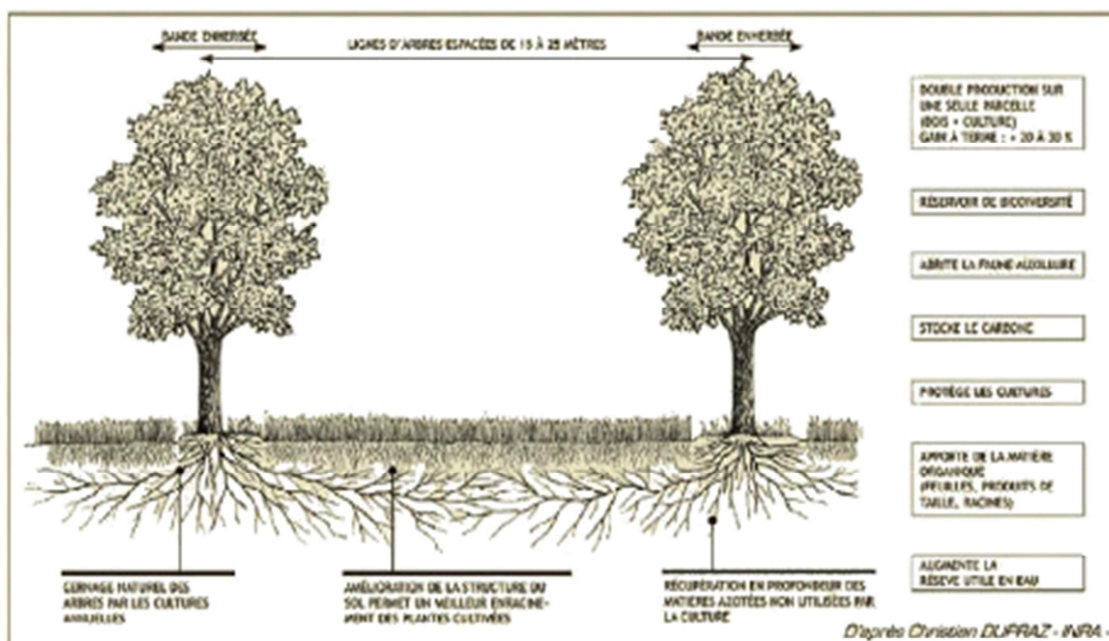


Figure 7 : Une coupe d'une parcelle agroforesterie (Gayaud, 2009).

3. Mycorhisation et la séquestration du carbone

La mycorhisation c'est l'association symbiotique entre les racines des plantes et les champignons.

Les associations mycorhiziennes permettent une meilleure exploration du sol, la plante pouvant aller au-delà des zones de carence en éléments nutritifs (ex : phosphate). Les champignons mycorhiziens pénètrent dans les racines, dans les interstices cellulaires et à l'intérieur même des cellules puis croissent à l'extérieur, dans le sol. Et forment des hyphes mycéliens. Ce « complice fongique », comme le nomme Guillaume Bécard, améliore la nutrition minérale et hydrique de la plante en absorbant N, P, Cu, Zn et eau grâce à une surface d'absorption décuplée par rapport au système racinaire nu (Becard, 2015).

En échange, la plante fournit du carbone aux champignons sous forme de sucres, produits de la photosynthèse. L'absorption des minéraux, et donc l'efficacité de la fertilisation, étant améliorées, l'utilisation de mycorhizes offre donc un fort potentiel d'économie de produits phytosanitaires, d'engrais et d'eau. Permettant à la fois une augmentation du potentiel mycorhizogène du sol en agissant comme paillage mais aussi une amélioration durable de la

structure et des propriétés physico-chimiques de ces sols dégradés par l'apport de matière organique. (Becard, 2015).

Une autre symbiose est largement étudiée pour son importance en agriculture, il s'agit de la symbiose rhizobienne, entre les bactéries fixatrices d'azote avec les légumineuses, cette symbiose se base sur des communications moléculaires fines. Récemment, une analogie structurale a été mise en évidence entre les facteurs Myc et les facteurs Nod, molécules émises par les bactéries rhizobiennes. , la symbiose rhizobienne est dérivée de la symbiose mycorhizienne : les acteurs moléculaires, dont certains gènes, sont donc très proches. Cela ouvre une perspective intéressante : les plantes nonlégumineuses (ex. : blé) seraient donc équipées pour s'associer avec les bactéries rhizobiennes et donc assurer par elles-mêmes leur approvisionnement en azote (Becard, 2015).

Les champignons mycorhiziens jouent un rôle majeur dans l'agrégation du sol par des réseaux d'hyphes et la production de glomaline (colle biologique). Ainsi, leur présence est essentielle au maintien des propriétés physiques du sol (Becard, 2015) :

-Une meilleure structure du sol.

-Plus grande capacité d'infiltration et de rétention d'eau.

-Plus de perméabilité à l'air.

-Meilleur développement racinaire.

-Plus grande activité microbienne et cycle de nutriments.

-Meilleure résistance à l'étanchéité (croûtes.)

-Meilleure résistance à l'érosion (eau/vent).

-Meilleure résistance à la compaction

Donc ils contribuent à l'augmentation de la capacité d'adaptation aux changements climatiques et à la sécurité alimentaire.

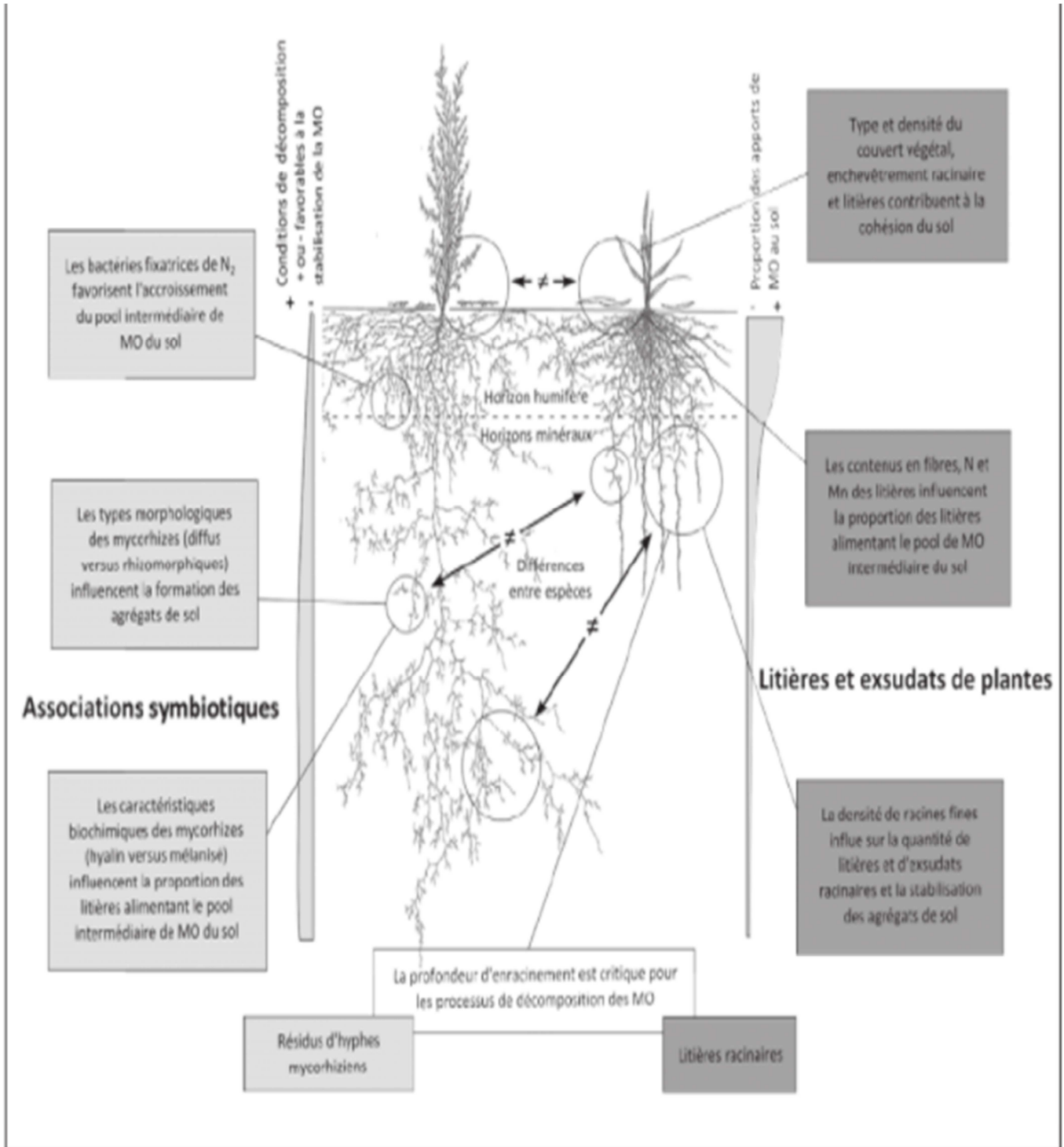


Figure 8 :Influence des variations de traits fonctionnels et de cortèges d'associations symbiotiques entre espèces végétales(quel que soit leur type fonctionnel) sur la stabilisation des MO dans le sol. Adapté de(Freschet et al.,2016).

4. Rhizodéposition et la séquestration du carbone

Au cours de leur vie, les racines des plantes libèrent des composés organiques dans leur environnement proche. Ce processus, nommé rhizodéposition (Balesdent, 2013).

La rhizodéposition : terme qui désigne les apports de matières organiques au sol par les racines de plantes vivantes qui s'accumulent et forment des rhizodépôts (Soltner, 2003). On estime que le flux de rhizodéposition peut être de l'ordre de 0,2 à 0,5 fois la production racinaire nette (Pellerin et al., 2019) et apporte un flux important de carbone et de l'énergie aux microorganismes de la rhizosphère, elle comprend des cellules détachées du mucilage et des exsudats solubles (Neuchatel., 2009). Les quantités varient selon les espèces, le stade de développement de la plante et de nombreux facteurs environnementaux. est d'importance écologique car 1/ c'est une perte de C organique pour la plante, 2/ c'est un flux d'intrant pour le compartiment de C organique du sol et 3/ il alimente la microflore du sol, qui est impliquée dans la grande majorité de l'activité biologique des sols tels que par exemple le cycle des éléments nutritionnels et des polluants ou encore la dynamique des pathogènes du sol (Balesdent et al., 2013) La connaissance de la rhizodéposition, transfert de carbone des racines vivantes des plantes vers le sol, est un verrou pour la prévision et la modélisation du stockage de carbone dans les sols (Balesdent et al., 2013). La libération de composés organiques variés par les racines (rhizodéposition) détermine en grande partie la spécificité de la rhizosphère (Nguyen, 2007). La libération d'une partie des photoassimilats dans le sol contribue à la formation des sols.

-Les exsudats (sucres simples) : libérés dans le sol sont biodégradés très vite, avec un rendement de conversion en carbone microbien est élevé. les exsudats d'une part et par les litières racinaires (Balesdent et al., 2013).

Le terme exsudats regroupe les composés qui diffusent passivement du cytosol vers la solution du sol en raison du gradient de concentration entre ces deux compartiments et de la perméabilité de la membrane plasmique aux composés de faible poids moléculaire. Les exsudats sont constitués majoritairement de sucres, d'acides carboxyliques et d'acides aminés en raison de leur concentration importante dans le cytoplasme des cellules racinaires. Ces concentrations sont par ailleurs généralement plus fortes au niveau des extrémités des racines.

Leur rôle est l'acquisition des nutriments et les associations plante – microorganismes et la régulation de la croissance des plantes (Marchesi, 2003).

-Les sécrétions qui représentent les composés libérés par les racines de façon active selon un processus métabolique. Elles incluent les enzymes et des polysaccharides comme les mucilages.

-Le mucilage racinaire est composé de polysaccharides associés à une fraction protéique qui peut atteindre 6% de la masse totale (Rougier, 1982; Bacic et al., 1987).

Le mucilage racinaire est sécrété par les cellules de la coiffe des racines par exocytose des vésicules de Golgi (Morre et al., 1967; Rougier, 1982). Il s'agit donc d'un transport actif.

Le mucilage migre ensuite passivement à travers la paroi si son degré d'hydratation et la pression de turgescence de la cellule sont suffisants.

leur rôle c'est de se fixer sur les cations en particulier des argiles ce qui favorise la stabilité de la structure donc protègent contre la dégradation des sols et ils facilitent aussi la diffusion des nutriments du sol vers les racines des plantes (Marchesi, 2003).

-Les lisats: constituent le contenu cellulaire libéré suite à l'autolyse des cellules épidermiques âgées de la paroi racinaire.

Les restitutions souterraines contribuent au moins autant aux matières organiques à long terme que les restitutions aériennes (Rasse et al., 2005). Ainsi, le rapport de la contribution souterraine à la contribution aérienne aux matières organiques est largement supérieur au rapport des biomasses correspondantes. Récolter les systèmes racinaires ou les collets des végétaux aurait pour conséquence un appauvrissement important des sols en matières organiques et donc une diminution de leur qualité. (Balesdent et al., 2013).

Ce qui nous amène à vivement déconseiller la récolte des parties souterraines des cultures.

Le rendement en carbone rhizodéposé (résidus souterrains) est plus élevé que le carbone des résidus aériens donc il faut stocker par les racines (Chenu, 2016). Ceci s'explique par la vitesse de biodégradation des racines, plus faible que celle des restitutions aériennes en raison de la composition chimique et la richesse en composés phénoliques (Abiven et al., 2005).

(Stimulation de la biodégradation des matières organiques du sol par l'apport de carbone dégradable) (Balesdent et al., 2013).

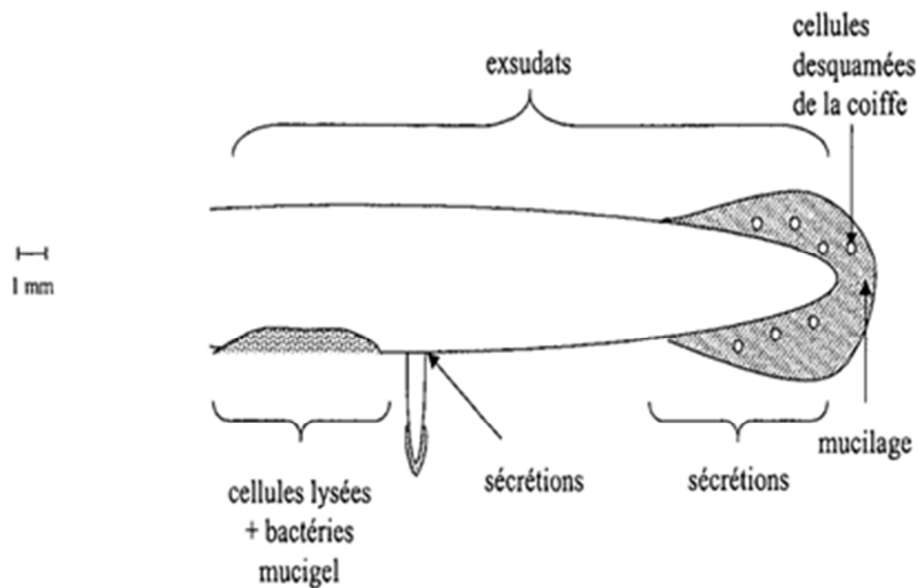


Figure 9 : Représentation simplifiée des sites de production des différentes classes de rhizodépôts le long d'une racine d'après Rovira et al.,(1979).

La (figure 10) montre le devenir du carbone rhizodéposé suite à une analyse dans une étude sous-ensembles chimiques du carbone rhizodéposé par le blé et ses produits d'évolution : le carbone soluble, les sucres neutres totaux, les monosaccharides libres et le saccharose, les monosaccharides individuels des polysaccharides. Les polysaccharides composés principalement de glucose, d'arabinose, de xylose et de galactose sont les composés dominants du flux de rhizodéposition. Ces derniers proviennent des mucilages et des parois et résidus cellulaires et sont non extractibles à l'eau. Les molécules solubles comme les sucres simples glucose et fructose et acides organiques sont minoritaires. Une partie importante du flux de rhizodéposition est rapidement convertie en composés microbiens, rhamnose, mannose et galactose, et en composés non-sucres (lipides et protéines par exemple). En quelques semaines, la distribution des sucres marqués tend vers celle des matières organiques totales du sol, dominée par les sucres microbiens (Balesdent et al., 2013).

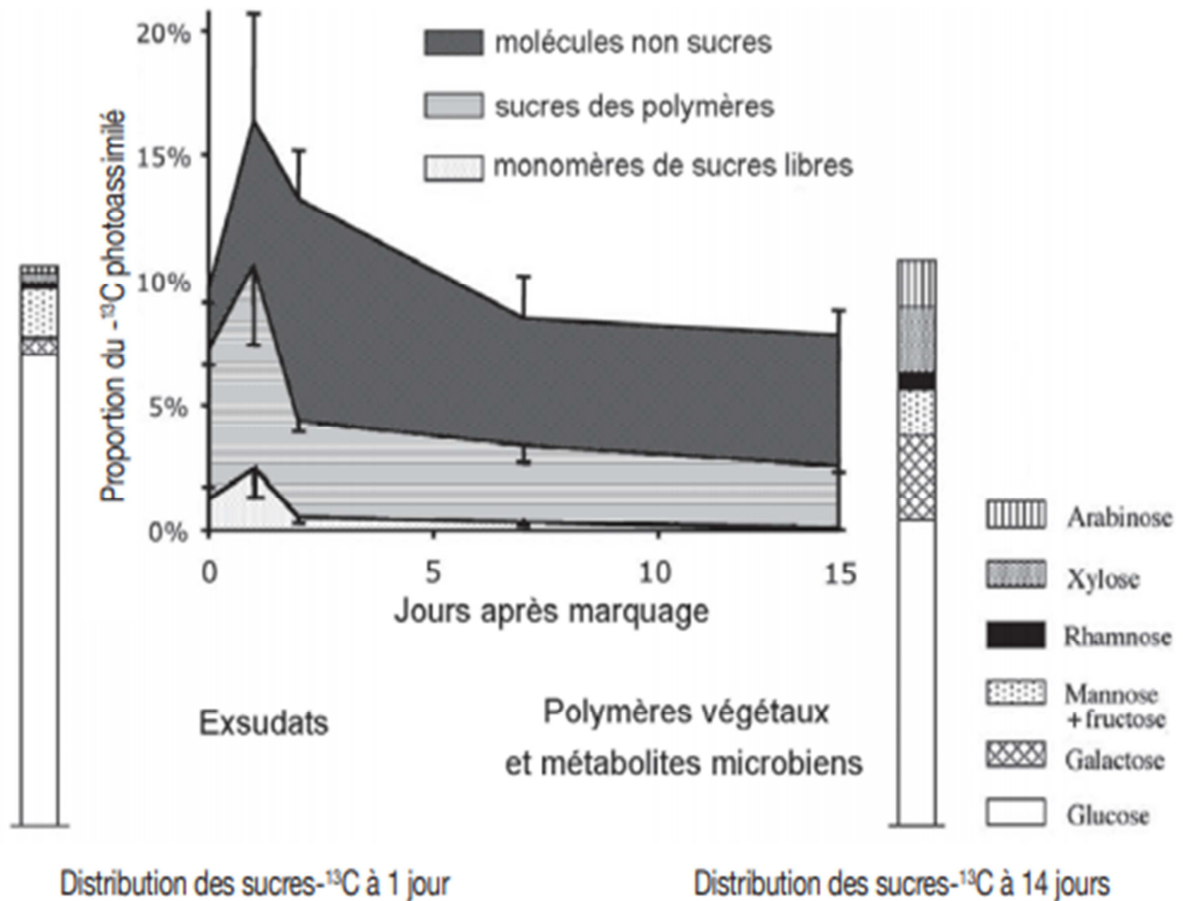


Figure 10 : Représentation synthétique de la dynamique des carbohydrates (sucres neutres) du carbone rhizodéposé dans les cultures de blé au stade végétatif du tallage d'après les données de (Derrien et al., (2004).

5. Introduction de l'initiative 4 pour mille ou 4‰

Le COS est l'élément majeur de la matière organique. Du fait de son importance pour la qualité des sols et le climat, le carbone des sols a fait l'objet d'une attention politique particulière ces dernières années. Ceci s'est traduit notamment par le lancement, par la France, de l'initiative « 4 pour 1000 ». L'objectif de cette initiative est de promouvoir la mise en place d'actions concrètes visant à augmenter les stocks de carbone organique dans les sols pour améliorer la sécurité alimentaire tout en luttant contre le réchauffement climatique

Un taux de croissance annuel de 0,4% des stocks de carbone du sol, ou 4‰ par an, dans les premiers 30 à 40 cm de sol, réduirait de manière significative dans l'atmosphère la concentration de CO_2 liée aux activités humaines qui émettent d'énormes quantités de CO_2 dans l'atmosphère. (Barré et al., 2019).

Ce taux de croissance n'est pas une cible normative pour chaque pays, mais vise à illustrer qu'une augmentation, même infime, du stock de carbone des sols agricoles (y compris les prairies et pâtures) et forestiers est un levier majeur pour améliorer la fertilité des sols et la production agricole et participer au respect de l'objectif de long terme de limiter la hausse des températures à + 2°C, seuil au-delà duquel les conséquences induites par le changement climatique seraient d'une ampleur significative, d'après le GIEC

L'Initiative "4 pour 1000" se veut être un complément aux efforts indispensables de réduction globale et générale des émissions de gaz à effet de serre dans l'ensemble de l'économie. Elle est volontaire, il revient à chaque membre de définir la manière dont il contribue à ses objectifs.

L'agriculture contribue à la lutte contre les changements climatiques et la sécurité alimentaire.

L'augmentation de la quantité de carbone dans les sols contribue: non seulement à stabiliser le climat mais également à assurer la sécurité alimentaire, c'est-à-dire à fournir de la nourriture en quantité suffisante et à augmenter les capacités d'adaptation des sols aux changements climatiques et à limiter l'augmentation des températures mondiales.

6. Le rôle des sols dans la séquestration du carbone

Les préoccupations sur le réchauffement global et l'augmentation des teneurs en gaz à effet de serre (GES, en particulier CO₂, CH₄, N₂O) de l'atmosphère conduisent à s'interroger sur le rôle des sols en terme de source ou de puits de C. Le sol est le plus grand réservoir de carbone (C) continental et participe au cycle global du C. Il émet à la fois du gaz carbonique (CO₂), via la respiration des racines et des microorganismes hétérotrophes, et piège du CO₂ atmosphérique, via la photosynthèse et l'incorporation au sol des produits de décomposition des litières, sous forme d'un stock de matières organiques composé à 50% de C. . En effet, les sols contiennent environ trois fois plus de carbone que l'atmosphère (2 400 GtC contre 830 GtC). Toute modification de l'usage des terres et, même pour les systèmes agricoles à l'équilibre, toute modification de l'itinéraire technique, peut induire des variations du stockage du carbone dans les sols (Bernoux et al, 2004).

Les sols sont marqués par une grande diversité : la quantité maximale de matière organique qui y est contenue peut fluctuer fortement d'un écosystème à un autre, suivant les variations des différents facteurs évoqués. Le stockage de carbone dans les sols est très inégal : entre tourbières, sols forestiers, sols agricoles, ou encore sols dégradés, artificialisés, voire imperméabilisés, les écarts sont grands (Cambou, 2018).

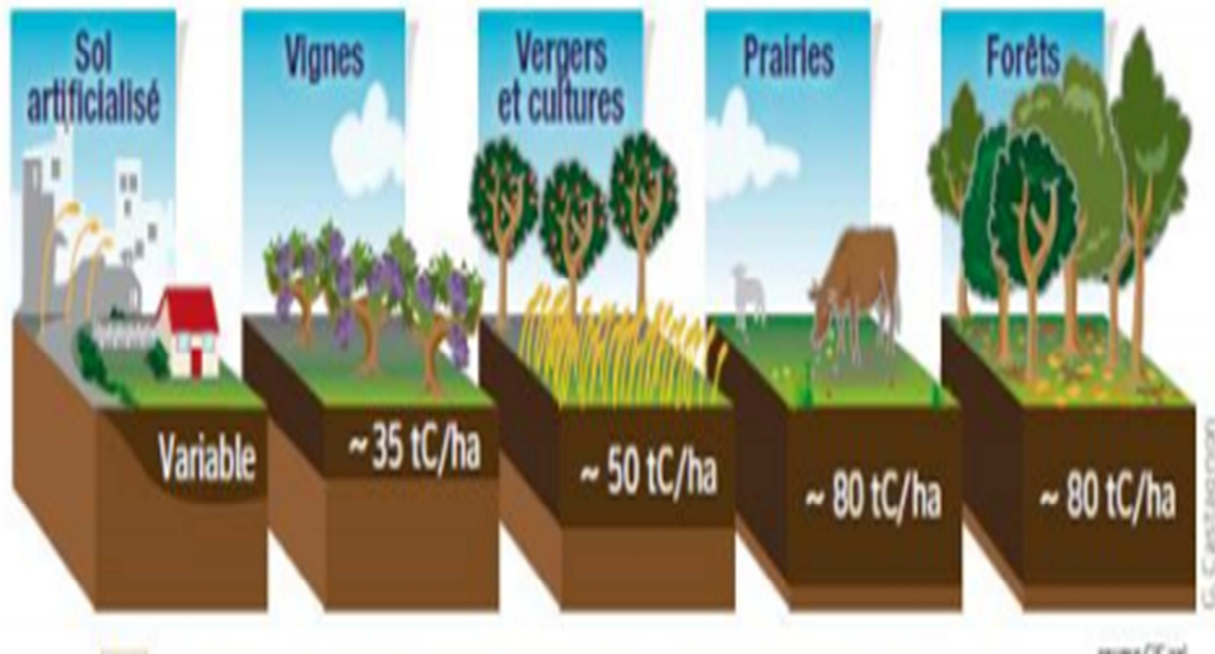


Figure 11 : Stock de carbone dans les sols selon l'usage (Ademe., 2014).

La capacité des sols à séquestrer du carbone varie en fonction de leur occupation. Ainsi, le stock carbone contenu dans les 30 premiers centimètres de sols est trois fois plus élevé que dans le bois des forêts. D'après l'inventaire des émissions nationales de gaz à effet de serre, les zones urbaines stockent moitié moins de carbone que les prairies ou forêts. Le stock carbone des sols de culture est intermédiaire (Figure 11).

II/ Les facteurs du stock du carbone dans les sols

De nombreux facteurs entrent en jeu dans la variation du stock C et des nutriments (Blanchart et al., 2005).

- **La matière organique**

La matière organique des sols étant un des déterminants essentiels de nombreuses propriétés édaphiques, son étude en termes de qualité, dynamique et stockage selon le mode de gestion des terres est très importante. Aussi, l'évolution à moyen et long terme des stocks organiques des sols est un indicateur à prendre en compte dans le jugement sur la durabilité des agro écosystèmes et la protection de l'environnement (Bernoux et al., 2002)

La contribution des MO aux propriétés et fonctions des sols dépend de leur quantité, mais aussi de leur qualité, leur localisation et leur dynamique. En effet, les différentes classes de MO n'ont pas les mêmes propriétés physiques, chimiques et biologiques, et n'affectent donc pas de la même manière les propriétés des sols. La localisation des MO dans le profil de sol importe également : alors qu'un effet sur la rétention d'eau est attendu sur toute l'épaisseur de sol explorée par les racines, davantage de MO dans la couche superficielle suffit pour modifier la sensibilité à l'érosion. Enfin, certains effets des MO sont liés aux stocks présents (la rétention d'eau par exemple), d'autres à leur flux de minéralisation (la fourniture d'azote par exemple) (Pellerinet al., 2019).

Ce stock de carbone dépend de la production végétale, qui amène au sol de la matière organique fraîche sous forme de litière aérienne et racinaire, et de la vitesse de décomposition de cette matière organique, qui augmente avec la température, l'humidité et la teneur en oxygène du sol. À haute latitude, la production végétale est assez faible, mais les basses températures et l'engorgement fréquent des sols en eau limitent la décomposition et favorisent donc l'accumulation de matière organique, et ainsi l'effet des apports de matières organiques exogènes, en particulier des produits résiduels organiques (PRO): effluents d'élevage et composts..

- **La profondeur**

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 (FAO, 2017).

- **Le type et la nature du sol**

Il existe une corrélation positive entre la texture et la concentration du COS. Les sols sableux ont des stocks de carbone plus faibles que les sols argileux. Ce qui est normale étant donné que l'une des caractéristiques principales qui influencent le contenu en matière organique et par conséquent le CO du sol est sa texture (Alex & Rollin, 2017). Ceci est lié au fait que le carbone stable (acides humiques) caractérisé par un temps de résidence très long (quelques siècles à des milliers d'années) dans le sol est souvent lié aux particules d'argile (Chabbi & Lemaire, 2007) avec une quantité moyenne dans les sols limoneux (Wopereis, 2008).

En forêt, la texture du sol influence le stock de carbone de sols après défrichage. La teneur en matière organique des sols est d'autant plus élevée que ceux-ci sont riches en éléments fins. La variation sensible après 5-10 ans de culture confirme la perte du stock organique et le bilan organique négatif des systèmes de culture. En sol limoneux, à 45% d'éléments fins, la baisse maximale de 40% (soit 10 t/C par ha) après 25 ans de culture par rapport à la référence « savane en culture itinérante » représente une perte annuelle maximale de 2% (500 à 300 kg C/ha) (Ouatiarai et al, 1997).

Une étude a été faite en Tunisie (Brahim et al., 2013)

La Tunisie par son emplacement géographique (32° à 38°N et 7° à 12°E et 164.000 km²) au nord de l'Afrique et au sud de la Méditerranée, dispose d'un large éventail de régions naturelles. Elle est influencée au Nord par la mer Méditerranée et au Sud par le Sahara. Elle contient neuf grandes classes de sols où nous avons estimé le stock de carbone organique pour chaque classe.

Distribution du stockage de carbone en Tunisie. Les résultats statistiques du stock par type de sol sont exposés dans le (tableau1) selon les profondeurs 0-30 et 0-100cm. Les sols fersiallitiques ont les stocks les plus élevés 71,6 et 159,2 t/ha respectivement pour les deux profondeurs 0-30 et 0-100cm. Par contre les sols très peu évolués ont les stocks les plus faibles avec des valeurs de 18,4 et 40,4 t/ha. En calculant le stock pour chaque classe de sol nous avons ainsi déterminé le stock total du pays. La somme des stocks de toutes les classes a donné un total de 1,006 Gt C pour la profondeur de 1 mètre du sol, et 0,405 Gt C dans les

couches supérieures 0-30 cm. Pour ce qui est de la distribution du stock selon la profondeur, plus que 40% du stock total dans les 30 premiers centimètres.

Tableau 1: Le stock de carbone par type de sol en Tunisie: (Brahim et al.,2013).

0-30cm		0-100cm						
Classe de sol	N°	Stock t/ha	SDa	Stock de la classe en GT	N*	Stock t/ha	SDa	Stock de la classe en GT
Sols très peu évolués	88	18.4	1.48	73.22	63	40.4	2.56	160.76
Sols peu évolués	261	31.5	1.97	119.83	145	83.9	4.8	319.16
Sols Calcimagnésique	374	41.6	2.47	100.35	212	10.18	5.77	245.57
Vertisols	80	45.6	2	6.75	45	109.7	5	16.24
Sols isohumique	204	37.4	1.94	51.42	124	93.3	4.37	128.26
Sols à mull	170	61.9	2.82	8.78	121	138.8	6.08	19.68
Sols fersialitiques	90	71.6	3.37	4.24	60	159.2	7.62	9.43
Sols alomorphes	100	28.2	1.68	38.39	61	75.0	4.85	102.11
Sols Hydromorphes	116	34.8	2.2	2.46	62	77.7	4.21	5.5
Total	1483			405.43	893			1006.71

- **Le climat**

Le climat, dans l’histoire de la science du sol, a toujours été considéré comme un facteur important dans la formation du sol, ou la pédogenèse (Jenny, 1941). La température et la précipitation ont été définies comme des facteurs qui régulent la dynamique de la matière organique et font ainsi partie des facteurs clés dans la détermination des grands types de sols(Razafimbelo, 2011).

Le climat influe sur la teneur en carbone organique des sols en jouant sur les entrées, à travers la productivité végétale par exemple, et sur les sorties, par l’intermédiaire de l’activité biologique et de l’érosion. Le sol fait figure d’acteur-clé dans les cycles biogéochimiques du carbone. Les flux de carbone dans les sols dépendent de nombreux facteurs : nature des écosystèmes ; nature et quantité des apports de matières organiques ; activité biologique dont

dépendent à la fois l’humification et la minéralisation, l’équilibre entre les deux étant principalement fonction des conditions physicochimiques, de la température et des possibilités de liaisons entre les matières organiques et des particules minérales. L’augmentation de la température, la diminution de l’humidité des sols ou encore le travail mécanique du sol favorisent la minéralisation (OPECST, 2018).

Le carbone du sol emmagasiné sur 1 m de profondeur, représente à peu près 4 kg/m² (dans la zone aride) et 21–24 kg/m² (dans des régions polaires ou boréales), avec des valeurs intermédiaires de 8 kg/m² dans les zones tropicales. La contribution totale des régions tropicales au réservoir de carbone du sol serait dans un éventail de 400 GtC (jusqu’à 1 m), comparé à 2 000 pour le monde (2 456 GtC jusqu’à 2 m). La zone aride, qui couvre 40% de la surface des sols du monde, emmagasine seulement 5% (100 GtC) du total. Les stocks de carbone ne sont cependant pas distribués de manière homogène dans toutes les zones écologiques (tableau 2). Ces zones montrent de grandes différences, en termes de carbone organique, causées surtout par la température et les précipitations.

Tableau 2 : Stocks totaux de carbone organique du sol (COS) en GtC et capacité moyenne de séquestration par grande zone agro écologique (pour une profondeur de 30 cm et 1 m) (Robert., 2002)

Zone agro écologique	Stocks de carbone (GtC)	Densité moyenne de C (Kgm ²) ou capacité de stockage en carbone		
	Profondeur 30 cm	Profondeur 1 m	Profondeur 30 cm	Profondeur 1m
Tropicale chaude et humide	92-95	176-182	5,2-5,4	10,0-10,4
Tropical chaud saisonnièrement sec	63-67	122-128	3,6-3,8	7,0-7,3
Tropicale frais	29-31	56-59	4,4-4,7	8,4-8,9
Aride	49-55	91-100	2,0-2,2	3,7-4,1
Subtropical avec pluies estivales	33-36	64-68	4,5-4,7	8,6-9,1
Subtropical avec pluies hivernales	18-20	37-41	3,6-3,9	7,2-8,0
Tempéré océanique	20-22	40-44	5,8-6,4	11,7-12,9
Tempérée continentale	21-126	123-243	5,6-5,9	23,1-24,0

Ces zones agro-écologiques, développées par la FAO, peuvent constituer un cadre de référence pour évaluer et suivre la réserve de carbone dans les sols (Robert, 2002).

- **Le mode d'occupation**

Le mode d'occupation du sol est un déterminant majeur des stocks du carbone, en interaction avec le contexte pédoclimatique et les pratiques de gestion (Pellerin et al., 2019).

Le Tableau 3 et la Figure 12 présentent les stocks moyens de carbone des sols sous différents modes d'occupation, hors surfaces artificialisées. Les sols forestiers représentent 38% du stock total, ceux sous prairies permanentes 22%. Malgré un stock par hectare plus faible qu'en prairie permanente, les stocks sous grandes cultures et prairies temporaires représentent 26,5% du stock total du fait de l'importance des surfaces correspondantes. Ainsi, la conversion d'un sol forestier en sol agricole induit généralement une perte de C dans les sols (Rhoades et al., 2000).

Tableau 3 : Stock de carbone par mode d'occupation du sol pour l'horizon 0-30 cm (Données RMQS-GIS Sol).

	Stock de C Horizon 0-30 TC/ha	Surface Mha	Stock total Horizon 0-30 MCt
Prairies Permanentes	84,6 ±35.0	9,3	790
Terres arables (grandes cultures et prairies temporaires)	51,61 ±9,2	18,4	950
Forêts	81,4 ±35.4	16,9	1370
Autres	79,0	6,0	475
Total		50,6	3585

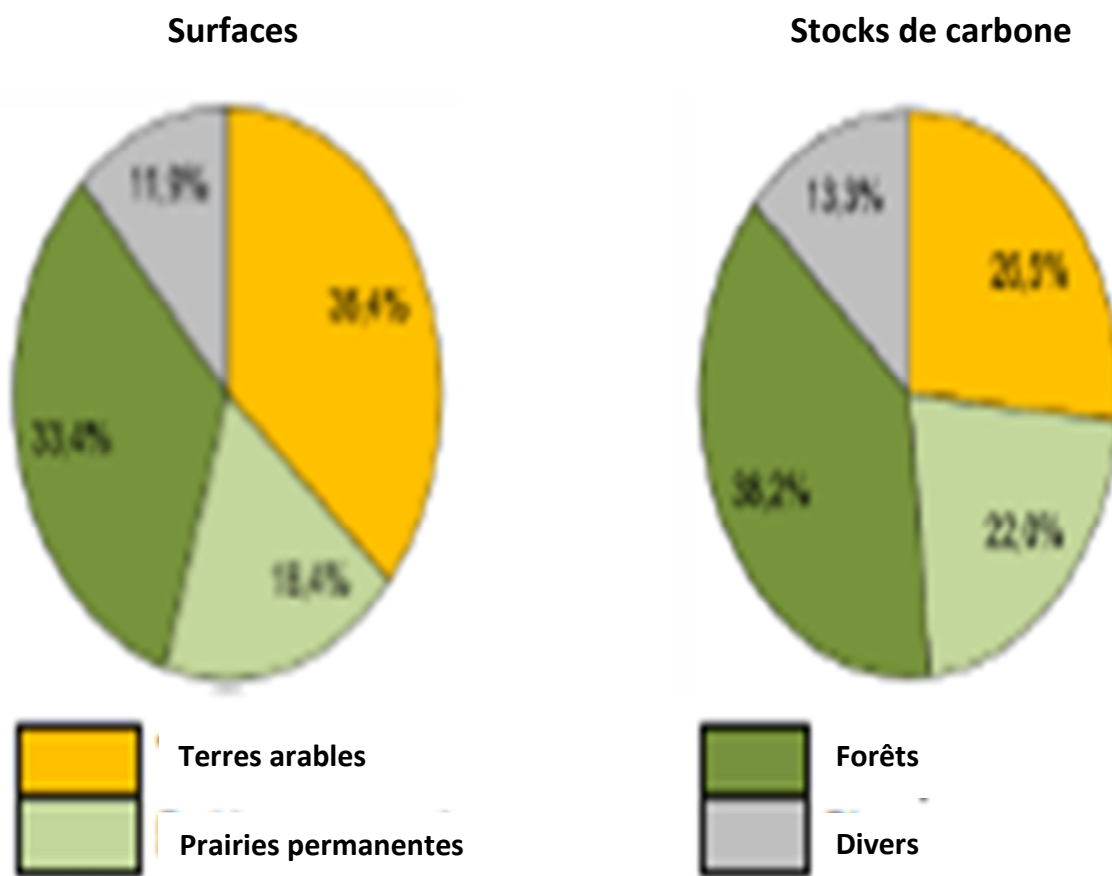


Figure 12: Surfaces et stocks totaux de carbone par grand mode d'occupation des terres, estimés d'après le RMQS. Les surfaces en terres arables incluent les prairie temporaires (<6 ans) et les prairies artificielles.

III Principaux impacts de la séquestration du carbone dans le sol

- **Sur la fertilité**

Le carbone organique est un bon indicateur et auteur de la fertilité du sol (physique, chimique et biologique). Les matières organiques sont la principale source d'azote issu du sol, et des sources majeures de phosphore. Les flux de minéralisation dépendent de facteurs extrinsèques (climat...), ainsi que des stocks organiques des sols et de la qualité des matières organiques. Les matières organiques sont ainsi une réserve d'éléments nutritifs, ce qui a un impact positif. Les éléments minéralisés sont pour certains des polluants potentiels (nitrates, phosphates), ce qui va dans le sens d'une conséquence environnementale négative

des matières organiques. Les matières organiques exogènes apportées au sol (lisiers, fumiers, boues résiduaires urbaines..) sont susceptibles de libérer des quantités importantes de nitrates et phosphate (Chenu, 2002)). Les matières organiques jouent le rôle d'agrégation du sol donc elles contribuent contre la dégradation du sol (Kaci, 2014).

- **Sur l'environnement**

La matière organique améliore la qualité du sol en bloquant les polluants comme les pesticides et l'aluminium. La qualité de l'air est liée à la concentration de CO₂ dans l'atmosphère (Kaci, 2014).

- **Sur la biodiversité**

Les êtres vivants du sol y assurent un certain nombre de fonctions bénéfiques (création d'une porosité d'écoulement de l'eau par les vers de terre, fixation d'azote par les bactéries rhizobia). Les organismes vivants du sol étant hétérotrophes pour la plupart, ils dépendent des matières organiques comme source d'énergie. La taille des populations vivantes, y compris la biomasse microbienne, augmente donc avec la teneur en carbone des sols. La biodiversité des organismes vivants du sol est considérée comme une propriété à maintenir, pour des raisons patrimoniales, mais aussi parce que la biodiversité garantirait une meilleure stabilité des écosystèmes aux perturbations (Altieri, 1999). En ce qui concerne les micro-organismes, la diversité phénotypique est plus grande dans des sols riches en matière organique (Chenu, 2002).

- **Sur le climat**

La teneur atmosphérique en CO₂ détermine le réchauffement climatique. La séquestration du carbone dans le sol en atténue les effets (Kaci, 2014). Toute variation des stocks de carbone organique des sols, à la hausse ou à la baisse, influe sur la concentration en CO₂ atmosphérique et donc sur le climat (Barré et al., 2019).

- **Sur les effets de réchauffement climatique**

Le changement climatique a et aura un impact fort sur les forêts, ce qui peut réduire sa capacité à capter du carbone, mettre en péril la sécurité alimentaire de la planète.

Les stratégies possibles d'atténuation du changement climatique par l'agriculture et la forêt sont donc étroitement liées aux capacités d'adaptation des systèmes agricoles et forestiers (Madinieret al., 2014).

VI/ Les pratiques culturales pour mieux stocker le carbone dans le sol

Etant donné l'importance du COS dans la stabilisation des écosystèmes et sa vulnérabilité lors des changements d'utilisation des terres surtout en milieux forestiers (Grinand, 2016), il s'avère nécessaire de suivre son évolution et d'évaluer les impacts des choix sylvicoles et des différentes pratiques de gestion sur ses flux dans le sol (Poissonnet et al., 2007).

1. Les bonnes pratiques culturales

▪ Le travail du sol

Limiter le travail du sol. La réduction ou la suppression du labour peut également conduire vraisemblablement à une diminution de la minéralisation du C du sol et donc apparaître comme une technique favorable à des bilans de C améliorés. Réduction du travail du sol est une composante clé d'une « agriculture régénératrice des sols. » (Brachelet, 2020). La perturbation du sol par le labour provoque généralement une diminution du taux de la MO, favorise l'érosion éolienne et hydrique et de ce fait provoque un déclin de la productivité de la plante cultivée (Campbell et Zentner, 1993).

• Les cultures pérennes

C'est l'ensemble des arbres et arbustes. Elles sont caractérisées par l'enracinement temporaires ce qui favorise le stock du carbone (Chenu, 2015). De la fonction déterminante des cultures pérennes pour le maintien d'un écosystème cultivé de type forestier, à la fois fixateur de carbone et évitant l'érosion des sols, et contribuant ainsi à la préservation de l'environnement, tant à l'échelle locale qu'à l'échelle planétaire.

Le choix des espèces végétales a un effet sur la qualité chimique des MO des sols et modifie les processus régissant la dynamique du C organique dans les sols (Derrien, 2016).

-Développer les légumineuses. « Les légumineuses vont capter l'azote de l'air : elles n'ont pas besoin d'apport d'azoté et elles en restituent pour la culture suivante », explique d'ailleurs l'Ademe. Un large panel d'espèces existe : cultures annuelles de protéagineux (pois,

féverole, lupin, soja), de légumes secs (lentilles, pois-chiche, haricot sec) et de légumes (haricots, pois de conserve), ou cultures pérennes et fourragères (luzerne, trèfle, vesce, sainfoin...), qui peuvent être fauchées ou pâturées.(Brachelet, 2020). Chez les graminées et légumineuses des prairies, la partie aérienne de la plante est en général plus riche en azote et la partie souterraine plus riche en carbone (Dumoulin et al., 2017).

Les prairies temporaires et leur gestion sont réputées pour accumuler des quantités importantes de matières organiques. Les prairies: un grand réservoir potentiel de carbone. Elles sont incluses dans l'article 3,4 du Protocole de Kyoto et, comme la forêt, elles jouent un rôle important dans la séquestration du carbone. Premièrement, les prairies et terres de parcours occupent des milliards d'hectares (3.2, selon la FAO) et elles emmagasinent de 200 à 420 Pg de carbone dans le total de l'écosystème, dont la majorité au-dessous de la surface et, par conséquent, dans un état relativement stable. Les quantités de carbone du sol au-dessous des prairies en zone tempérée sont estimées à 70 t/ha, ce qui est similaire aux quantités emmagasinées dans les sols des forêts (Trumbmore et al., 1995; Balesdent et Arrouays, 1999).

La réimplantation de forêts ou de prairies sur des terres cultivées favorisent l'accroissement du carbone de la biomasse et de celui du sol (Robert et al., 2003).

Les haies et des bandes enherbées favorisent le potentiel de stockage de carbone.

- **Cultures intercalaires ou associées**

Les rotations et/ou association de cultures, suite aux interactions légumineuses/graminées induisent une meilleure disponibilité des éléments minéraux (surtout N et P) et par conséquent, une augmentation de la production et peuvent également entraîner, via les restitutions végétales au sol (pailles, feuilles, racines, etc.) une accumulation de C dans le sol (Hutchinson et al. 2007). De même pour la fertilisation et l'irrigation (Robert, 2002; Hutchinson et al., 2007; Wu et al., 2008).

- **Le couvert végétal**

Consiste à ne pas laisser le sol nu afin de le protéger contre l'érosion.

L'utilisation des « mulch » et du paille à la surface du sol est souvent citée par la littérature comme des pratiques séquestrantes (Neto et al., 2010; Razafimbelo et al., 2006) du fait de l'apport importante de MO et de l'amélioration des propriétés du sol qui en résulte. Une meilleure gestion des pâturages et des terres de parcours offre un potentiel de séquestration

(0,1 à 1tc/ha) considérable au niveau mondial si l'on considère qu'ils couvrent plus de 2 milliards d'hectares (Lal et al.,1995).

Les résidus d'une récolte représentent une quantité non négligeable de MO qui peut être valorisée pour restaurer la fertilité du sol. Une meilleure compréhension de l'impact de la gestion des résidus sur le système eau-sol-plante est nécessaire afin de gérer les terres agricoles de manière durable. La quantité de résidus disponibles dépend de la productivité et du type de cultures (Dumoulin et al., 2017).

D'une façon générale, il apparaît que le couvert végétal, combiné ou non à un paillis, joue un rôle prépondérant dans la protection du sol (Moeyersons, 2004). Dans les agrosystèmes, des changements d'occupation des terres ou des changements de pratiques agricoles peuvent également favoriser une séquestration du carbone dans les sols.

Contribue à la conservation des stocks de carbone dans le sol, notamment des couches superficielles qui sont fréquemment les plus riches en matière organique. Le contrôle de l'érosion est favorisé en verger par la présence du couvert végétal.



Figure 13 : Des cultures serrées paillées, n'entraînent aucune érosion (Moeyersons, 2004).

Les différents leviers d’actions pour favoriser le stockage du carbone sont représentés sur la (figure 14).

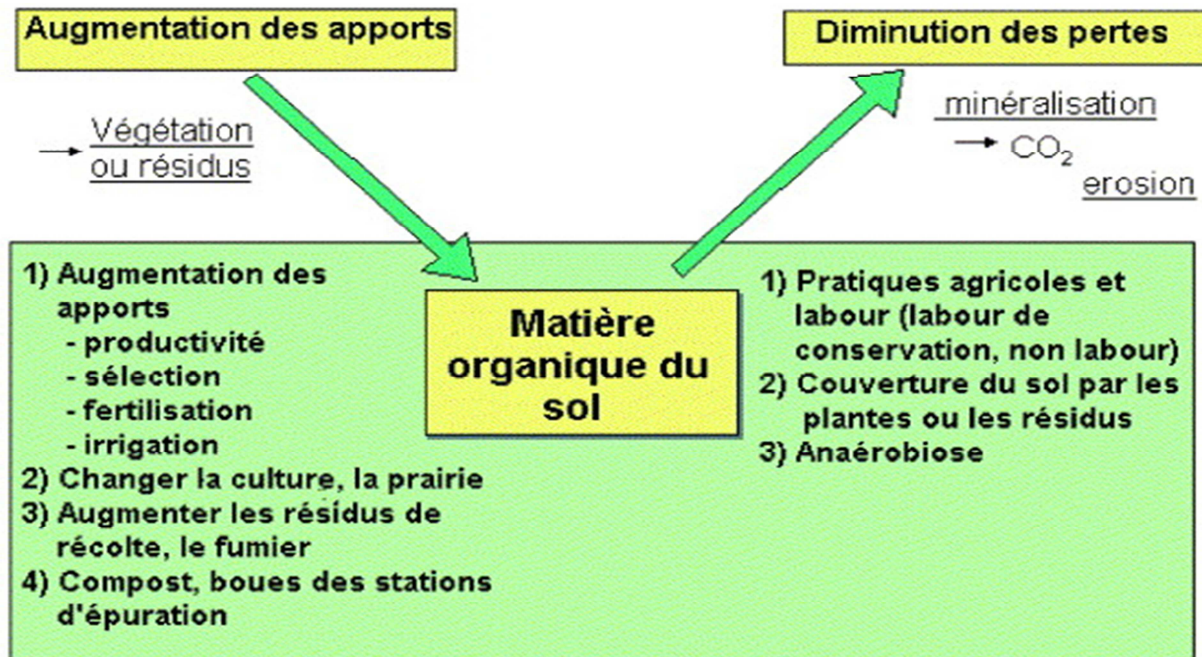


Figure 14 : Pratiques utilisables pour favoriser le stockage de carbone par les sols agricoles (Robert et al., 2003).

Les pratiques culturales concernées peuvent être très variées et concernent toutes une meilleure gestion de la matière organique des sols (Figure14), soit en augmentant les apports, soit en diminuant les pertes (Robert et al., 2003).

Favoriser la fertilisation organique à la fertilisation minérale (Chenu, 2015).

Des alternatives existent à la déforestation émettrice de carbone, en particulier par le développement de l'agroforesterie, qui comprend des systèmes mixtes culture/arbres très variés et très intéressants à de nombreux points de vue (fixation du C, économique, environnemental...).

Dans les agrosystèmes, des changements d'occupation des terres ou des changements de pratiques agricoles peuvent également favoriser une séquestration du carbone dans les sols.

Les écosystèmes terrestres représentent un potentiel de séquestration important (Robert et al.,2003).

2. Efficacité des pratiques culturales

Ces pratiques culturales stockantes du carbone contribuent aussi à l'atténuation des émissions des gaz à effet de serre comme le montre la (figure15) qui sont classées par ordre croissant de stockage.

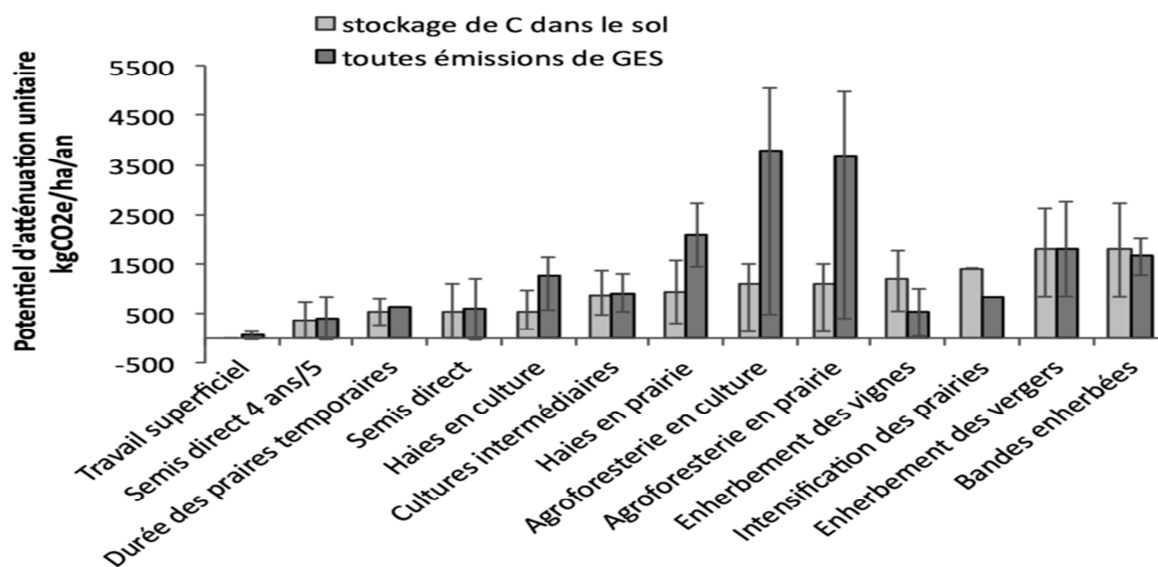


Figure 15 : Potentiels d'atténuation unitaire des différentes actions, prenant en compte les émissions de tous GES, directes, indirectes et induites (Pellerin et al., 2014).

D'après la (figure 15) on constate que Les haies et bandes enherbées sont aussi des réservoirs de biodiversité et donc des réservoirs potentiels d'auxiliaires, Les cultures intermédiaires, permettant un couvert permanent et protégeant ainsi les sols, sont des sources de biodiversité et augmentent la matière organique des sols alors que celui du semis direct et superficiel le potentiel de stockage est moins élevé et qui jouent le rôle en limitant la minéralisation (Pellerin et al., 2014).

Il apparaît plus efficace d'augmenter les entrées de C au sol que de diminuer les pertes par minéralisation (Chenu, 2016).

Stockage du carbone dans les zones arides

Généralités sur les zones arides

Les zones arides couvrent environ 430 millions d'hectares, soit 40 pour cent de la surface terrestre (FAO et ITPS, 2015). Les sols arides sont définis par un index d'aridité qui

représente le ratio des précipitations par rapport au potentiel de l'évapotranspiration P/PET avec des valeurs $< 0,05$ pour les sols hyper-arides (Robert, 2002).

Selon l'évaluation mondiale de la dégradation du sol GLASOD, (Oldeman et al., 1991), les sols dégradés représentent une grande proportion des différents types de sol, quel que soit le genre d'occupation. Le total s'élève à 1965 millions d'hectares dans le monde, dont la plupart sont dans les zones tropicales et arides.

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)

Naturellement, les sols des régions sèches sont caractérisés par des contraintes hydriques fréquentes, pauvres en carbone organique du fait de la faible productivité des agroécosystèmes qu'ils supportent.

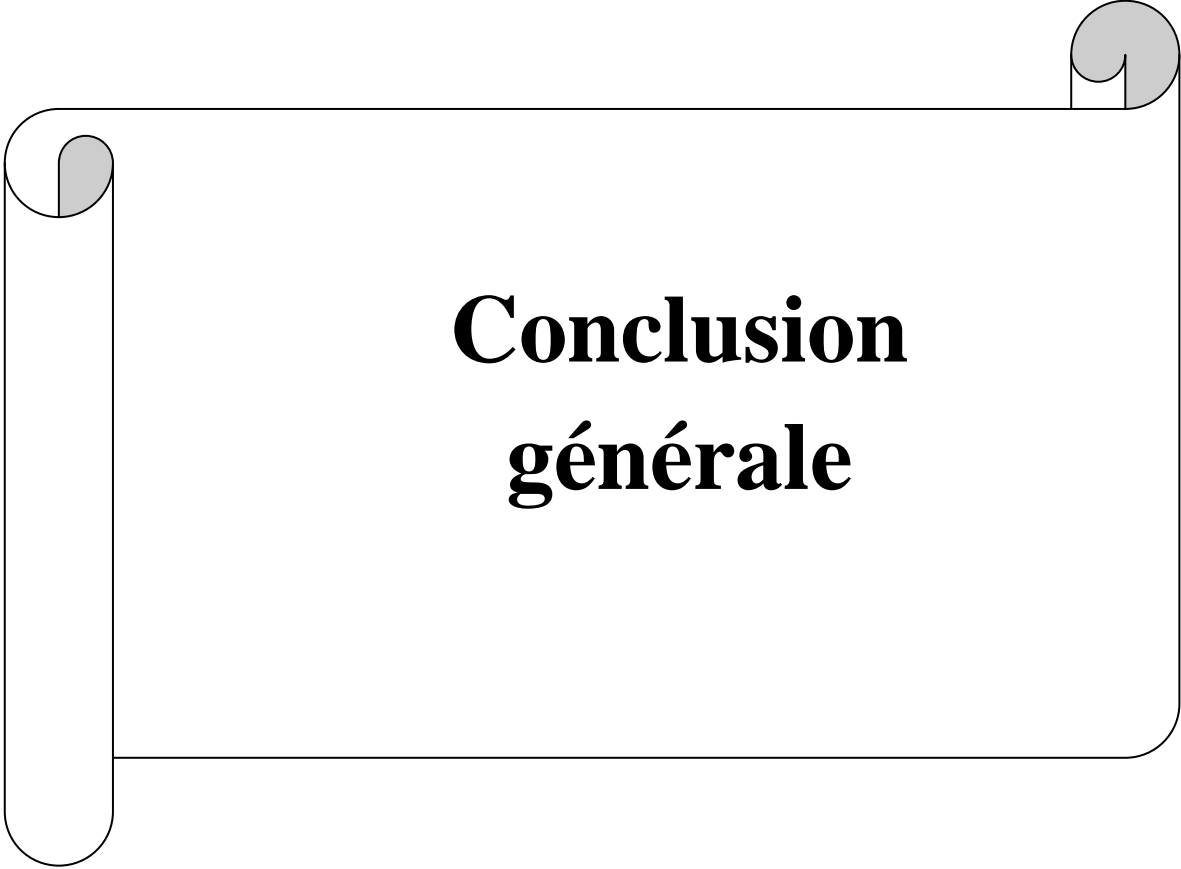
L'étendue de la dégradation des terres dans les zones arides est similaire à celle mondiale, toutefois les solutions sont : La restauration ou la préservation de la biodiversité des sols et du carbone organique des sols nécessite soit une augmentation des apports en matière organique, soit une réduction des pertes de carbone, ou les deux. Il est particulièrement important de préserver le carbone organique des sols (COS), voire l'augmenter si possible. Améliorer la qualité de la biodiversité à travers d'autres méthodes de gestion comme l'agriculture sans labour et la gestion durable des prairies Les quantités totales de carbone dans les sols des zones arides (Xerosol, Yermosol) sont basses, autour de 7 kg/m^2 , comparé aux sols des tropiques, de l'ordre de 15 à 30 kg/m^2 , mais celles-ci sont variées selon la texture et la minéralogie. Ce qui importe c'est que la teneur en carbone peut doubler entre une profondeur de 30 cm à 1 m et être multipliée par quatre jusqu'à 2 m (Robert, 2002).

Dans les sols des zones arides, les niveaux du COS sont souvent bas et proches du point de basculement où la restauration ne serait plus possible, laissant place à une dégradation irréversible des sols. Cependant, les mesures visant à accroître la biodiversité des sols et le carbone organique des sols peuvent prendre de nombreuses années (Laban et al., 2018).

Les pratiques agricoles durables qui ont été largement utilisées dans les zones arides comprennent l'agroforesterie, l'agriculture de conservation et le pastoralisme. Cependant, l'adoption ou le maintien de ces pratiques est faible dans les zones arides les plus pauvres du monde, où la croissance démographique et la demande pour une plus grande productivité agricole et la sécurité en matière d'eau sont des plus élevées. Ces régions seront confrontées à la dégradation des terres à moins que la gestion durable des terres ne devienne un élément central des programmes de développement agricole. De nombreuses études ont montré que la prairie a un effet positif sur le stock de carbone du sol dans les zones arides. Si les sols des zones arides sont naturels (Laban et al., 2018).

Tableau 4 : Principaux effets des pratiques de gestion du sol ou de l'utilisation des sols sur la séquestration du carbone (tha/an), zones arides et tropicales (d'après Lal, 1999).

	Régions Arides(3 milliards Ha)	Régions Tropicales(2 milliards Ha)	Surface
1.Sols cultivés			700 Milliards Ha
Labour de conservation	0,1-2,0	0,2-0,5	
Mulchet couverture du Sol	0,05-0,1	0,1-0,3	
Agriculture de conservation	0,15-0,3	0,3-0,8	
Compost	0,1-0,3	0,2-0,5	
Gestion des Fertilisants	0,1	0,2-0,5	
Gestion de l'eau	0,050,1		
2.Prairies et Pâtures	0,05-0,10	0,1-0,2	
3.Reforestation		4-8	
Agroforestrie		0,2-3,1	1 Milliard Ha



Conclusion générale

Conclusion générale

La contribution de l'agriculture aux émissions de gaz à effet de serre (GES) est discutée. Il est donc nécessaire de préciser son importance, en veillant bien à la relier à la finalité principale de l'agriculture qui consiste à couvrir les besoins alimentaires et nutritionnels des populations humaines. L'agriculture est une source significative d'émissions de GES. Mais en contrepartie, elle détient d'indéniables atouts pour les réduire, à la fois par la baisse de ses émissions gazeuses et par sa capacité à séquestrer le carbone dans les sols, notamment via les prairies et les haies et d'autres pratiques culturales. Il s'agit de repositionner la contribution de ce secteur d'activité au changement climatique, sur la base de son impact réel sur l'effet de serre.

Stocker plus de carbone dans les sols présente un intérêt majeur, d'une part, pour compenser les émissions anthropiques de CO₂, d'autre part, pour renforcer la sécurité alimentaire. Les programmes de recherche qui, par une meilleure connaissance des sols, permettront de mettre en œuvre des pratiques favorables au stockage de carbone dans les sols agricoles et forestiers notamment, telle l'initiative « 4 pour 1000 », doivent être poursuivis et encouragés.

Les forêts doivent donc être protégées et gérées durablement de façon à ce qu'elles puissent appuyer le développement et les services écosystémiques, mais aussi répondre aux besoins alimentaires, énergétiques et économiques d'une population mondiale en augmentation constante. Le Groupe de la Banque mondiale aide non seulement les pays à exploiter les forêts afin de faire reculer la pauvreté et de renforcer l'économie, mais aussi à protéger les forêts et à leur permettre de contribuer à la durabilité des écosystèmes.

A l'échelle mondiale, deux stratégies apparaissent comme particulièrement décisives pour parvenir à réduire les émissions de GES • la restauration des terres dégradées et des sols organiques cultivés, • la réduction de la déforestation, la bonne gestion forestière et le reboisement (Madignier et al., 2015).



**Références
Bibliographiques**

Références Bibliographiques

Ademe. (2019). Stocker du carbone dans les sols français quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Synthèse de l'étude - étude réalisée pour et le ministère de l'agriculture et de l'alimentation.

Albrecht.. A. (2018). Impact de l'agriculture – intelligente sur le stock du carbone organique du sol à Madagascar.

Alex. D., Rollin. A. (2017). Gestion de la MO et des flux de carbone En grandes cultures et Prairies. 27pp.

André. J.C., Tardieu. D. (2013). D'où vient le méthane et quel est son impact sur le climat.

Annabi. M., Bahri. H., Latiri . K. Statut organique et respiration microbienne des sols du nord de la Tunisie.

Arrouays. D., Balesdent., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.F., Stengel P.(2002) . Stocker du carbone dans les sols agricoles de France.

Aulen .M. (2011). Une approche fonctionnelle pour l'estimation des taux de décomposition racinaire et flux de carbone associés contribution à l'estimation du potentiel de séquestration du carbone dans les sols agro forestiers, PH.D; Faculté des sciences Université de Sherbrooke.

Baptiste. G. (2017). Des Technosols construits à partir de produits résiduaux urbains : services écosystémiques fournis et évolution. Ecologie, Environnement. Université Paris Saclay.

Balesdent. J., Derrien. D., Fontaine. S., Kirman. S., Klumpp K.,Loiseau P.,Marol C., Nguyen M., Pean M., Personen Eet Robin C. (2013). Contribution de la rhizodéposition aux matières organiques du sol, quelques implications pour la modélisation de la dynamique du carbone201.

Barré. P., Cecillon. L. (2019). Potentialités de stockage de carbone dans les sols.

Becard. G. (2015). La place des symbioses végétales en AB.

Berger. A. (2005). Le réchauffement climatique au XXI^{ème} siècle causes et conséquences.

Bernoux .M., F'eller C., Eschenbrenner .V., Cerri CC, Cerri.C.EP. (2004). Séquestration du carbone dans le sol.

Bernoux. M., Blanchart. E. (2005). Déterminants des stocks de carbone des sols des petites Antilles (Martinique, Guadeloupe). Alternatives de séquestration du carbone et spatialisation des stocks actuels et simulés.

Bernoux. M., Chenu C., Blanchart. E., Eglin. T., Bispo. A et al. (2011). Le programme GESSOL2 : Impact des pratiques agricoles sur les matières organiques et les fonctions des sols. Etude et Gestion des Sols, Association Française pour l'Etude des Sols, pp.137-145.

Bopp. M-C., Grasselly. D., Lescourret F., Bergère. D., Demange E., Guérin. A.,Guillermin., Hutin..P C., Laurens. F, S. Prat., Sautereau.N., Serrurier. M., Varlet.P, Colleu. S. (2019). Les services rendus par les cultures fruitières, Chapitre 4.4. Le service de régulation du climat, CTIFL-INRA..

Brahim. N., T. Gallali..T., ., Bernoux .M. ,(2013). Les stocks de carbone organique dans les sols et leurs variations en fonction de différents modes d'usage des terres en Tunisie ;p 60

Cambou. A.(2018). Evaluation du stock et de la stabilité du carbone organique dans les sols urbains. Sciences de la Terre. Agrocampus Ouest, Français; thèse de doctorat, p.12-13-44.

Cardinael. R.. (2015). Agroforesterie sous climat méditerranéen et tempéré, thèse de doctorat en sciences agronomiques.

Cias. PH. (2019). Cycle Global du Carbone, Contribution du système terrestre, Académie d'agriculture de France.

Chabbi. A., Lemaire. G. (2007). Rôle des matières organiques des prairies dans le cycle de l'azote et impacts sur la qualité de l'eau p4.

Chenu. C., Klumpp K., Bispo A., Angers. D., Colnenne. C., Metay. A. (2014). Stocker du carbone dans les sols agricoles : Evaluation de leviers d'action pour la France innovations Agronomiques 37, 23-37.

Chenu. C., Chevallier. T. (2015). Le sol au cœur du changement climatique.

Chenu. C., Delmotte . M. (2015). Les sols au cœur des effets du changement climatique.

Chenu. C. (2016). Sols et carbone: Stocker du carbone, enrichir les sols en matière organique.. Le projet 4 pour mille Claire Chenu AgroParisTech Unité Ecosys, INRA-AgroParisTech.

Chevallier. T. (1999). Dynamique et déterminants du stockage du Carbone dans un vertisol sous prairie (Martinique),32-37.

Chlighem. M., Haddid. A, Yagoubi T. (2015). le réchauffement climatique , mécanisme et conséquences sur les écosystèmes (biotope et biocénose).Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene-exposé.

Derrien. D., Dignac.M-F., Basile-Doelsch I., Barot. S., Cécillon. L., Chenu .C., Chevallier. T., Freschet. G. T., Garnier. .P. , Guenet B., Hedde . M., Klumpp .K, Lashermes. G., Maron. P-A., Nunan. N., C. Roumet., Barré .P. (2016). Stocker du C dans les sols : Quels mécanismes, quelles pratiques agricoles, quels indicateurs..

Duchaufour. PH. (2001). Introduction à la science du sol, végétation, environnement; 6ème ed . Dunod ; paris ; 331p

Dumoulin A., Rollin A. (2017) Gestion de la MO et des flux de carbone en grandes cultures et prairies.

Dunglas.J. (1993). Effet de serre et actions humaines (Gaz à effet de serre à origine anthropique.

Duparque. A. (2017). La matière organique des sols, une richesse à cultiver, Agro-Transfert Ressources et Territoires.

Durand. E. (2014). Modèle pour l'inclusion du carbone séquestré par le sol et par les arbres dans la gestion d'une forêt pour bois marchand » Mémoire , Montréal (Québec, Canada), Université du Québec à Montréal , Maitrise en économie.

FAO. 2002: la séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion des terres rapport basé sur le travail de Michel Robert institut national de recherche agronomique paris

FAO. (2003). Gestion de la fertilité des sols.

FAO.2017: Carbone organique du sol richesse invisible, p.16-19-20.

Fouquart. Y. (2002). Le climat de la terre. Fonctionnement de la machine climatique, influence humaine et évolution probable.

Fournier. C. (2019). Les causes du réchauffement climatique : d'où vient le réchauffement climatique .

Gayaud. B. (2009). Agroforesterie en Taquine.

Hamon. X., Dupraz. C, Liagre. F. (2009). L'agroforesterie, outil de séquestration du carbone en agriculture.

Kaci. R. (2014) Stockage de carbone sous chêne-liège (*Quercus Suber*) L.), M.F.E; U.M.M.T.O .

Kareb. S. (2016). Fractionnement et dosage du carbone organique du sol sous différents types de végétation: Cas des prairies des Ouadhias (Nord de l'Algérie), M.F.E; U.M.M.T.O.

Laban. P., Metternicht. G., Davies. J. (2018). Biodiversité et carbone organique des sols :entretenir les zones arides.

Lefèvre. R. (2015). Matière organique stable du sol : dynamique et mécanismes de (dé)stabilisation. Milieux et Changements globaux. Université pierre et marie curie - paris ville..

Madinier. M.L., Denoit. G., Roy C. (2014). Les contributions possibles de l'agriculture et de la forêt à la lutte contre le changement climatique. CGAAER Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux.

Marchesi. V. (2003). La problématique et l'évolution du contrôle de qualité pour la mise en œuvre de la radiothérapie conformationnelle avec modulation d'intensité. Médecine humaine et pathologie. Institut National Polytechnique de Lorraine, Français.

Moeyersons. J. (2004). Le rôle de la couverture végétale dans la redistribution des sédiments et du carbone des sols par le ruissellement: colline de Rwaza, Butare, Rwanda

Mrabet. R. (1997). Crop residue management and tillage systems for water conservation In a semi arid area of Morocco, (Colorado State University).

Nguyen. C. (2007). La libération de composés organiques par les racines (rhizodéposition): modélisation et impact sur la biodisponibilité des éléments minéraux pour les plantes.

Nicolardot. B, (2016). La matière Organique Des Sols : Qui Est- Elle Et Pourquoi Est- Elle Si Importante Professeur Agrosup Dijon 1/237 Matinée Technique Du BIVB : « Matière organique des Sols : Un Bien Essentiel À Gérer » .

OPECST: .Les Notes Scientifiques de l'Office – Note n° 3 – (2018). Stocker plus de Carbone dans les sols : un enjeu pour le climat et pour l'alimentation.

OUAFI K. ,2017 : Contribution à l'étude de la dynamique de la rhizosphère d'une céréale conduite en agriculture de conservation.

Parton. W.J., Schimel. D.S., Cole. C.V., Ojima D.S. (1987) : "Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains Grasslands", Soil Sci. Soc. of America J., 51, 1173-1179.

Pellerin. S., Bamière L., Angers. D., Béline. F., Benoît. M., Butault. J.-P., Chenu. C., Colnenne.D C., Decara. S., Delame. N., Doreau. M., Dupraz. P., Faverdin. P., Launay. G F., Hassouna. M., Hénault C., Jeuffroy. M.-H., Klumpp. K., Metay. A., Moran. D., Recous. S., Samson. E., Savini. I.,Pardon. L. (2014). Quels leviers techniques pour l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole ? Innovations Agronomiques 37, 1-10.

Pellerin. S., Bamière. L., Launay. C., Martin. R., Schiavo. M, et al. (2019). Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? : Synthèse du rapport d'étude. [Contrat] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, 114 p.

Prevost. P. (1999). Les bases de l'agriculture ; 2ème éd. Techniques et documentation Lavoisier ; Paris ; 254p.

Rajeew. K., Sharad. .P., Apurv. P. (2006). Plant roots and carbon sequestration .CURRENT SCIENCE? VOL. 91, pp. 7-10.

Razafimbelo. Tm – A. (2011). Séquestration de carbone dans les agro systèmes à Madagascar : bilans et protection document 1 : synthèse des travaux de recherché, Université d'Antananarivo école supérieure des sciences agronomiques m2moire d'habilitation a diriger des recherches.

Robert. M. (2002). la séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion des terres paris.

Robert. M., Bernard. S. (2003). Contribution des écosystèmes continentaux à la séquestration du carbone.

Saber. N., Mrabet. R. (2002). Influence du travail du sol et des rotations de cultures sur la qualité d'un sol argileux gonflant en milieu semi-aride marocain.

Sergent. D. (2014) . L'arbre, pilier naturel de la lutte contre le CO2 atmosphérique.

Smith et al. (1995). Etude biologique de la matière organique du sol ,iguelouzenesamir ; U.M.M.T.O,2005.

Six. J., Feller. C., Deneff K. et al. (2002). Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage”, *Agronomie*, 22 (7- 8), 755-775.

Soltner. (2003). Les bases de la production végétales. Tome I le sol et son amélioration, ed. Sciences et techniques agricoles (France) 472.

Stéphanne. K.. (2013). L'avenir de la capture et de la séquestration du carbone: essai présenté au centre universitaire de formation en environnement en vue de l'obtention du grade de maître en environnement (M. Env.) Sous la direction de Monsieur François Roberge Maitrise en environnement Université de Sherbrooke.

Walter. C., Bispo .B., Chenu. C., Langlais. A.,Schwartz. C. (2015). Les services éco systémiques des sols : du concept à sa valorisation. pp.53-68.



Annexes

Annexe 1

Tableau 1 : Potentiel de réchauffement global de quelques gaz (Source IPCC1 992 , 1994).

GES	Potentiel de réchauffement global dû au dioxyde de carbone
CO ₂	1
CH ₄	11
N ₂ O	320
CFC-11	4000
CFC-12	8500
HCFC-22	1700
HFC-134a	1300

Tableau 2 Sources naturelles et anthropiques et contribution au réchauffement climatique des principaux des gaz à effet de serre.

Gaz à effet de serre	Principales sources naturelles	Principales sources anthropiques (= issues des activités humaines)	Contribution au réchauffement climatique sur la période 1750-2011
Dioxyde de carbone (CO ₂)	Fermentation, respiration des êtres vivants	Combustion d'énergie fossile, procédés industriels et déforestation tropicale	56 %
Méthane (CH ₄)	Décomposition végétale ou animale à l'abri de l'air	Décharges, agriculture, élevage, procédés industriels, chauffage	32 %
Protoxyde d'azote (N ₂ O)	Décomposition d'azote dans le sol	Agriculture, procédés industriels, utilisation d'engrais	6 %
Gaz fluorés (HFC, PFC, CFC...)	/	Sprays, réfrigération, procédés industriels, fabrication de composants électroniques	6 %
Ozone (O ₃) (non lié au CH ₄)	Produit par des réactions chimiques à partir de l'oxygène rejeté par la photosynthèse des végétaux et micro-organismes	Produit par des réactions chimiques à partir de gaz rejetés par les activités humaines (monoxyde de carbone, oxydes d'azote, formaldéhyde...)	

Annexe 2

Le Protocole de Kyoto vise à une régulation de ces émissions au plan international. Il a été ratifié en mars 2002 par les pays de l'Union Européenne. L'Union Européenne s'est engagée à réduire de 8% ses émissions nettes de gaz à effet de serre durant la période 2008-2012, par rapport à l'année de référence 1990. Dans ce cadre, la France s'est engagée à maintenir ses émissions au niveau de l'année 1990 pendant la période 2008-2012, dite "période d'engagement"

Le stockage de carbone est l'augmentation du stock de carbone dans le temps. Un changement de régime d'apport ou de sorties.

La séquestration de carbone dans le sol est le retrait net de CO₂ de l'atmosphère résultant du transfert de son carbone dans des compartiments à temps de renouvellement lent du carbone organique du sol par comparaison à une situation où ce CO₂ serait resté dans l'atmosphère.

Stockage et séquestration sont deux notions distinctes : par exemple, épandre un produit résiduaire dans une parcelle donnée induira un stockage de carbone dans cette parcelle, mais ne correspondra pas à une séquestration, par rapport à un épandage qui aurait eu lieu ailleurs. Cette étude s'intéresse en premier lieu à l'effet de pratiques sur le stockage.

Le stockage additionnel lié à une pratique agricole B est la différence entre le stock de carbone mesuré dans un sol après la mise en œuvre de la pratique B pendant une période donnée, et le stock de ce même sol sous une pratique de référence A mise en œuvre durant la même période, à partir d'un état initial commun. Le stockage additionnel est donc défini pour deux pratiques, un site donné, et un temps écoulé depuis la différenciation des pratiques. Un minimum de 5 à 10 ans est nécessaire pour qu'un stockage additionnel soit mesurable.

Teneur en carbone du sol (ou concentration en carbone). La teneur ou concentration en carbone du sol correspond à la proportion massique de l'élément carbone dans le sol sec. On l'exprime en g/kg dans le système international (gC/kg sol)

Le stock de carbone est la quantité totale de carbone contenue dans une couche de sol donnée, par unité de surface. On l'exprime en kg/m² (kgC/m²) ou en t/ha (tC/ha). On le calcule généralement en multipliant la concentration massique par la masse de terre fine contenue dans la couche. Cette dernière est le produit de l'épaisseur de la couche, de la proportion massique de terre fine [terre fine / (terre fine + éléments grossiers)] et de la densité apparente du sol

Calculs des stocks de carbone organique du sol Quand la donnée relative au stock de C n'était pas présente dans l'article, nous l'avons calculée avec la formule :

$$SC = Da \times 10 \times (1 - EG) \times TpC \times E$$

Avec : - SC : stock de C, en g/m² ; - Da : densité apparente, en g/dm³ ; - EG : pourcentage d'éléments grossiers ; - TpC : teneur pondérale en carbone organique, en g/kg ; - E : épaisseur de l'horizon, en cm.

Les flux d'apports aériens correspondent aux litières, restitutions de parties aériennes non récoltées, fèces et apports exogènes

Les flux d'apports souterrains, beaucoup moins bien connus, comprennent : - la biomasse racinaire.. De façon générale, la proportion souterraine de la production primaire, la rhizodéposition, terme qui désigne les apports de matières organiques au sol par les racines de plantes vivantes. Elle comprend des tissus (renouvellement racinaire), des cellules (épiderme, poils absorbants...), des macromolécules (mucilages, enzymes) ou de petites molécules ("exsudat" racinaire).

Réservoir de carbone : système capable de stocker ou d'émettre du carbone. Les écosystèmes forestiers (biomasse aérienne et souterraine) constituent des réservoirs de carbone

Flux de carbone : quantité de carbone échangée dans l'atmosphère et le réservoir.

Le potentiel de stockage d'un sol est défini comme la potentialité d'un sol à stocker du carbone additionnel par rapport à une pratique de référence.

La déforestation est une conversion à long terme ou permanente des terres forestières à des fins d'utilisations non forestières.

La dégradation est définie comme une diminution des stocks de carbone, causée par les activités humaines.

Résumé

Le changement climatique, la dégradation des terres et la perte de biodiversité constituent des véritables menaces au plus haut niveau la sécurité alimentaire de par son fort impact sur l'agriculture, ils présentent des effets négatifs sur les cultures qui mènent à la réduction des revenus agricoles.. Pour cela, la séquestration du carbone dans le sol ainsi que la mise en place des pratiques culturales, est l'une des alternatives permettant l'atténuation de l'effet de serre..

Un taux de croissance annuel de 0,4% des stocks de carbone du sol, ou 4‰ par an, dans les premiers 30 à 40 cm de sol, réduirait dans l'atmosphère la concentration de CO₂ liée aux activités humaines. . Stocker plus de carbone dans les sols présente un intérêt pour compenser les émissions anthropiques de CO₂ face au réchauffement climatique et pour la sécurité alimentaire car la présence accrue de matière organique améliore la structure physico-chimique du sol, sa résistance à l'érosion et sa fertilité, donc le rendement des cultures. et augmente la capacité d'adaptation des sols aux changements climatiques.

Mots-clés : changement climatique, effet de serre, agriculture, atténuation, sol, carbone, pratiques agricoles, matière organique, fertilité, rendement, les sols

Summary

Climate change, land degradation and loss of biodiversity constitute real threats at the highest level of food security due to its strong impact on agriculture; they have negative effects on crops that lead to reduced agricultural income. .. For this, the sequestration of carbon in the soil as well as the implementation of cultural practices is one of the alternatives allowing the attenuation of the greenhouse effect.

An annual growth rate of 0.4% of soil carbon stocks, or 4 ‰ per year, in the first 30 to 40 cm of soil, would reduce the concentration of CO₂ in the atmosphere linked to human activities. . Storing more carbon in soils is of interest to offset anthropogenic CO₂ emissions in the face of global warming and for food security because the increased presence of organic matter improves the physico-chemical structure of the soil, its resistance to erosion and its fertility, therefore crop yield. And increases the adaptive capacity of soils to climate change.

Keywords: climate change, greenhouse effect, agriculture, mitigation, soil, carbon, agricultural practices, organic matter, fertility, yield,, soils