

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة مولود معمري - تيزي وزو
Université Mouloud MAMMERY - Tizi-Ouzou



Faculté des Sciences Agronomiques et des Sciences Biologiques
Département d'Agronomie

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Agronomie

Option : Restauration et Réhabilitation des Sols

*Fractionnement et dosage du carbone organique du sol sous
différents types de végétation :
Cas de la plaine des Ouadhias (Nord de l'Algérie)*

Présenté par :

KAREB Sabrina

HASSANI Souad

Devant le jury composé de :

Présidente : M^{me} BENNANE-KADI S. M.A.A à l'U.M.M.T.O.
Examineurs : M^r MERROUKI K. M.C.B à l'U.M.M.T.O.
M^{elle} OMOURI O. M.A.B à l'U.M.M.T.O.
Promotrice : M^{me} BOURBIA S. M.C.B à l'U.M.M.T.O.
Invité : M^r HALICHE A. Subdivisionnaire des services agricoles des Ouadhias.

Année Universitaire : 2015/2016

Remerciements

A l'issue de ce travail, nous remercions avant tout ALLAH, tout puissant, de nous avoir donné volonté, courage et patience pour accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à remercier vivement notre encadreur M^{me} MOUAS BOURBIA. S., pour son entière disponibilité, ses conseils judicieux et la pertinence de ses corrections, ce qui nous a permis d'achever à bien ce travail.

Nos plus sincères remerciements vont aussi aux membres du jury, Mme BENNANE-KADI S. d'avoir accepté de le présider et de nous avoir accompagnée sur le terrain pour l'identification des espèces végétales ; ainsi que M^r MERROUKI K. et M^{lle} OMOURI O. qui ont acceptés d'examiner ce présent travail.

Nous remercions aussi M^r ALLILI qui nous a aidés pour le choix du dispositif expérimental.

Nous remercions aussi M^r BENGHANNEM qui nous a aidé dans l'identification des espèces végétales.

Notre reconnaissance la plus sincère va à M^{rs} HALICHE A. (Subdivisionnaire des Services Agricoles des Ouadhias) et M^r LARIBI (Agriculteur) qui ont beaucoup donné de leur temps, pour nous aider à trouver une parcelle expérimentale et de pouvoir procéder à l'échantillonnage des sols.

Nous exprimons aussi nos remerciements à M^{me} YAHIAOUI TIBICHE. G et M^{lle} ISSAOUN.D (laborantines) pour leur aide précieuse qui nous a permis de réaliser les analyses du carbone du sol.

Ainsi, nous remercions infiniment M^r SEBAIBI A. B., doctorant en Agronomie au laboratoire de biodiversité et de conservation de l'eau et du sol de l'Université Abdelhamid IBD BADIS de Mostaganem pour son aide et son épaulement.

Enfin, nos remerciements s'adressent à nos familles pour leurs soutiens permanents et à toutes les personnes qui ont contribuées de près ou de loin à la réalisation de ce travail, car seuls nous n'aurions pu l'accomplir.

Liste des abréviations

% : Pour cent

A : Argile

A: avoine

C : carbone

Ca : calcium

CA : carbone actif

CALR : Chambre Régionale d'Agriculture Languedoc

CH₄ : gaz de méthane

CO₂ : dioxyde de carbone

Corg : carbone organique

CS : carbone stable

ePOM : particule de matière organique externe

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

GES : gaz à effet de serre

G.E.P.P.A : Triangle de texture

GIEC : Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat

H : horizon

H/C: hors couvert

Ha : Hectare

IGBP : Programme International Géosphère Biosphère

INRA : Institut National de la recherche Agronomique

IPCC : Panel intergouvernemental sur le changement climatique

iPOM : particule de matière organique interne.

K : potassium

L /F : Limons fins

L/G : Limons grossiers

M : mélange

Mg : magnésium

MO : matière organique

MOS ; matière organique du sol

N : azote

NPP : la production primaire nette

O.N.M : **office national de météorologie**

P : phosphore

PO₄ : Oxyde de phosphore

S : soufre

S/C: sous couvert

SN: sol nu

T : Tonne

V: vesce

W.R.B : World reference base for soil resources

Liste des figures

Figure 1 : cycle du carbone	4
Figure 2 : Modèle de la dynamique du carbone dans le sol (d'après Balesdent et al., 2000)	8
Figure 3 : Sites de la matière organique du sol dans la matrice du sol (Chenu, non publié);	10
Figure 4 : Le cycle du carbone terrestre: le carbone du sol et le budget mondial du carbone d'après le Programme International Géosphère Biosphère (IGBP,1998) et (IPCC, 2000)	13
Figure 5 : relations entre le carbone organique et la capacité d'échanges en cations dans un sol expérimental	15
Figure 6 : Stocks de carbone organique des sols (0-30 cm) en t/ha (INRA, 2002)	19
Figure 7 : Fourniture de carbone humifié par les résidus de culture (kg/ha) (Agro-Transfert RT)	
Figure 8 : Changements simulés du carbone sur 20 cm de profondeur de 1907 à 1990 pour la zone à blé de la plaine centrale des Etats-unis (d'après Smith, 1999)	20
Figure 9 : association céréales- légumineuse	24
Figure 10 : Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen pour la région de Tizi-Ouzou période (2005-2015)	29
Figure 11 : Vue satellitaire de la situation géographique de la parcelle expérimentale (Source : Google Earth 2016)	30
Figure12 : Dispositif expérimental sur le terrain.....	32
Figure 13 : présentation du sol sous couvert et hors couvert échantillonné sur la parcelle d'étude .	33
Figure14 : séchage des sols échantillonnés (Gx1)	34
Figure 15 : Mesure de la densité apparente par la méthode du cylindre	35
Figure 16 : tamisage et séparation des 2 fractions de sol (fractions <50µm, fractions >50µm)	35
Figure 17 : les deux fractions de carbone obtenues après tamisage et séchage	36
Figure 18 : dosage du carbone	37

Figure 19 : Echantillonnage de la végétation	38
Figure 20 : Photographie du profil pédologique réalisé sur le terrain.....	40
Figure 21 : Mesure de la biodiversité par l'indice de Shannon et Weaver et de Simpson.....	47
Figure 22 : teneurs en carbone des sols	47
Figure 23 : variation du carbone actif en fonction de la végétation	50
Figure 24 : variation du carbone stable en fonction de la végétation.....	50
Figure 25 : taux de carbone actif et stable.....	50

Liste des tableaux

Tableau 01 : stock de carbone dans le sol par hectare, sur l'horizon 0-30cm, en fonction du type d'occupation du sol	21
Tableau 2 : moyenne des précipitations mensuelles de Tizi-Ouzou pour la période de 2005/2015 (Source Office Nationale de Météorologie (O.N.M.)).	27
Tableau 3 : Moyennes des précipitations mensuelles de la période Juin 2015 à Mai 2016 de la région de Tizi-Ouzou (Source Office Nationale de Météorologie (O.N.M.)).	28
Tableau 4 : répartition des températures mensuelles maximales, minimales moyennes de la région de Tizi-Ouzou 2006 /2015 (O.N.M de Tizi-Ouzou)	28
Tableau 5 : Moyenne des températures mensuelle durant la période de Juin 2015/Mai 2016 de la région de Tizi-Ouzou.	29
Tableau 6 : la répartition des traitements dans la parcelle suivant le dispositif de l'Aléatoire complet.	32
Tableau 7 : Quelques analyses physico-chimiques du sol de la parcelle expérimentale.	41
Tableau 8a : exemple de calcul de l'indice de Shannon et Weaver pour la prairie.	42
Tableau 8b : exemple de calcul de l'indice de Simpson pour la prairie	43
Tableau 9 : Indices de Shannon et Weaver et l'indice de Simpson	44
Tableau 10 : Les résultats du carbone actif et carbone stable du sol exprimé en pourcentage	46
Tableau 11 : Test de Newman-Keuls pour le carbone actif.	49
Tableau 12 : Test de Newman-Keuls pour le carbone stable.....	49
Tableau 13 : Test de Newmans et Keuls ; comparaison entre le carbone stable et le carbone actif.....	49

Liste des figures	
Liste les tableaux	
Introduction	

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Partie 1 : Généralités sur le carbone	3
1. Effets du changement climatique	3
2. Le cycle du carbone organique	4
3. Carbone et matière organique dans le sol	5
3.1. Les différentes formes de la matière organique de sol.....	5
3.1.1. La matière organique vivante	5
3.1.1.1. La biomasse microbienne	5
3.1.1.2. La faune du sol	5
3.1.1.3. La biomasse végétale	5
3.1.2. La matière organique non vivante	6
3.1.2.1. La matière organique fraîche	6
3.1.2.2. La matière organique labile	6
3.1.2.3. La matière organique stable ou humus	6
3.2. Le rôle clé de la matière organique dans les sols	7
3.3. Dynamique du carbone organique dans les sols	8
3.4. Rôle des sols dans le cycle du carbone	10
4. Carbone, biomasse végétale et sols	12
4.1. Transfert de la plante au sol	12
5. Tendances générales de la séquestration du carbone dans les sols	13
5.1. Conséquences et impacts principaux de la séquestration du carbone.....	14
1.1.1. Qualité et fertilité du sol	14
1.1.2. Impacts sur l'environnement	15
5.2. Les principaux facteurs influençant le temps de résidence du carbone organique dans les sols	16
6. Mesure des stocks de Carbone dans le sol	17
7. L'influence de nombreux facteurs	18
7.1. Occupation du sol et gestion des résidus.....	18

7.2. Travail du sol.....	20
8. Stock de carbone et type de végétation	21
8.1. Les prairies	21
8.2. Comment les prairies stockent-elles le carbone ?	22
9. Les voies techniques d'accroissement du stockage de carbone dans les terres agricoles..	22
10. La mesure de la biodiversité	23
10.1. Les ligneux et les cultures associées	24
10.1.1. L'olivier (ligneux)	24
10.1.2. Les cultures associées	24

Chapitre II : Matériels et méthodes

1. Présentation de la zone d'étude	27
1.1. Géologie de la région d'étude	27
1.2. Le climat	27
1.2.1. Les précipitations	27
1.2.2. Les températures	28
1.2.3. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен	28
2. Présentation de la parcelle expérimentale	29
2.1. Localisation géographique	29
2.2. Choix de la parcelle	30
3. Le dispositif expérimental	30
4. Ouverture d'un profil pédologique.....	33
5. Echantillonnage des sols	33
6. Analyse des sols	33
6.1. les analyses physiques et chimiques.....	34
6.1.1. La granulométrie	34
6.1.2. La densité	34
6.1.3. Le pH	34
6.1.4. Le calcaire total.....	34
6.1.5. Carbone actif et stable du sol	35
6.1.5.1. Séparation des fractions de terre	35
6.1.5.2. Dosage du carbone du sol	36

SOMMAIRE

7. Echantillonnage de la végétation	37
7.1. Indice de Shannon	38
7.2. Indice de Simpson.....	39
8. L'analyse statistique.....	39

Chapitre III : Résultats et discussion

1. Description du profil pédologique	40
a- Caractéristiques morphologiques des horizons	41
b- Propriétés physiques et chimiques du sol	41
c- Le sol de la station d'étude	41
2. Biodiversité végétale	42
3. Carbone du sol	46
3-1- Carbone actif du sol	48
3-2- Carbone stable du sol	48

Conclusion

Références bibliographique

Annexes

SOMMAIRE

Introduction

Le changement climatique est un problème environnemental majeur pour le XXI^e siècle. 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 termes de source ou de puits de C (Bernoux et al., 2002).

Composées de 58 % de carbone organique en moyenne, les matières organiques du sol libèrent du dioxyde de carbone (CO₂) et des composés organiques en se décomposant sous l'influence du climat et des conditions ambiantes du sol. L'évolution du stock de carbone organique dans les sols résulte de l'équilibre entre les apports de matières organiques végétales au sol et leur minéralisation (CALR, 2011).

Le sol représente le plus grand réservoir de carbone de la biosphère continentale contenant environ deux fois le stock de carbone atmosphérique et trois fois le stock de carbone contenu dans la végétation (40 tonnes par hectare (t/ha) en sols cultivés et 65 t/ha sous prairies). Une augmentation des stocks de carbone organique des sols cultivés peut jouer un rôle significatif dans la limitation des émissions nettes de gaz à effet de serre vers l'atmosphère en stockant du CO₂ atmosphérique dans la MO des sols (CALR, 2011).

Ainsi la séquestration du carbone par les sols apparaît sous de nombreux points de vue (économique, environnemental, et agronomique par exemple) comme une solution avantageuse d'atténuation des concentrations des GES atmosphériques (Bernoux et al., 2002). À ce stade et suite à la photosynthèse, une fraction importante (environ 20 %) du CO₂ atmosphérique fixé par les plantes est incorporée dans le sol sous forme de matière organique. Le carbone ainsi fixé est retiré de l'atmosphère et séquestré dans le sol. Les processus de stabilisation du carbone dans les sols sont complexes. À la suite des transformations bio-géochimiques et physiques, la matière organique se trouve stabilisée sous forme de molécules résistantes à la décomposition et intimement liées aux argiles du sol sous forme de colloïdes (Angers, 2002). De nombreuses expériences sur le terrain ont montré que les changements induits par la gestion du sol sur l'état de la matière organique du sol se produisent beaucoup plus rapidement sur le pool labile du carbone que sur celui plus stable (Graham et al., 2002). Ainsi, le pool labile ou actif peut être utilisé comme indicateur précoce de changements dans la matière organique totale (Gregorich et al., 1997).

A cet effet, notre problématique se résume dans la question fondamentale suivante :

La variation de la végétation et sa présence influence-t-elle la séquestration du carbone actif et du carbone stable dans les sols ?

L'objectif principal de notre travail est d'identifier les types de couverts végétaux qui sont favorables à une séquestration de carbone organique qu'il soit actif ou stable.

Notre travail se scinde en :

- Introduction
- Synthèse bibliographique
- Matériels et Méthodes
- Résultats et discussion
- Conclusion

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Partie 1 : Généralités sur le carbone

Le carbone organique du sol, principal constituant des matières organiques, est une préoccupation d'intérêt majeur en raison des enjeux agronomiques (fertilité physique, chimique et biologique des sols) et environnementaux (qualité de l'eau, stockage de carbone, etc.) qui lui sont liés.

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 des sols (Smith et *al.* 1995).

1. Effets du changement climatique

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). Tous les résultats expérimentaux démontrent qu'une augmentation de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère induit 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 transpiration des stomates ce qui produit une meilleure efficacité de l'eau particulièrement pour les plantes en C₄. Donc, en ce qui concerne l'eau, l'effet net de CO₂ sur la réduction de la transpiration de la plante est favorable (Grégory et al., 1998). Evidemment, pour obtenir un gain de récolte d'autres besoins de la plante nécessitent d'être satisfaits en particulier l'eau disponible et les éléments nutritifs.

En ce qui concerne le carbone, il y aura une augmentation de la séquestration de carbone par la biomasse au dessus du sol et une augmentation corrélative dans les apports du sol provenant des résidus de végétaux et de la croissance et le dépérissement des jeunes racines. Les composés organiques des racines ont un rapport C/N plus élevé et sont plus stables (anonyme 1).

Toujours en ce qui concerne la séquestration du carbone, un autre facteur, la température, qui peut augmenter sur une grande partie du globe, va jouer un rôle important. Ainsi ce

réchauffement peut provoquer un taux plus élevé de minéralisation par les microbes et un taux plus élevé de la respiration des racines (anonyme 1).

2. Le cycle du carbone organique

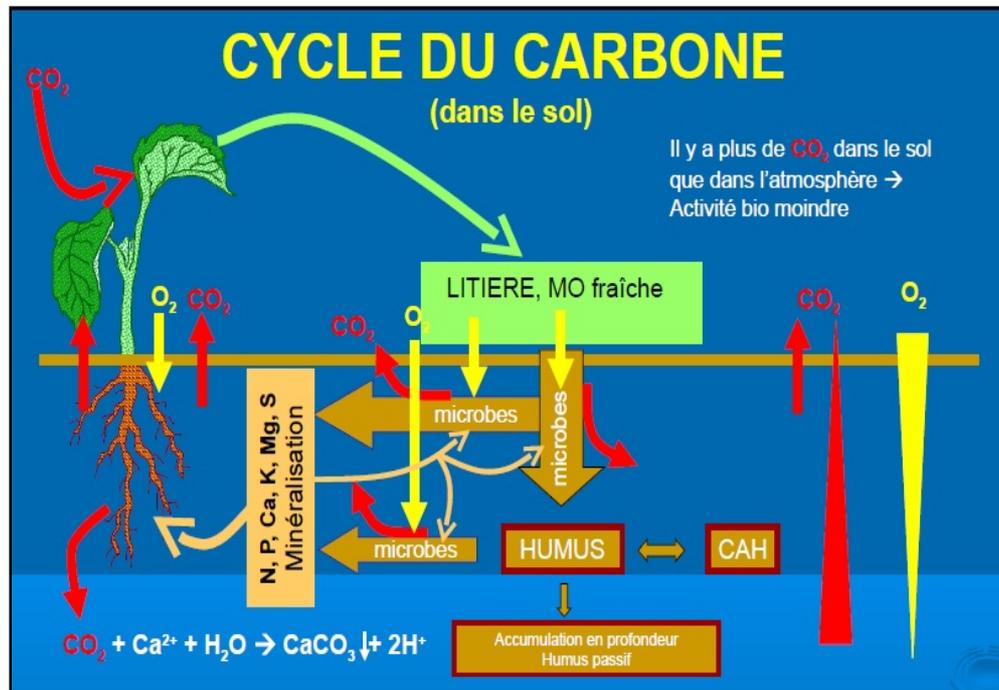


Figure 1 : Cycle du carbone dans le sol, (Georges, 2011)

Le carbone est le principal élément de la matière organique du sol 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 fertilité (Smith et *al.* 1995).

Le cycle complexe du carbone (figure 1) mène à un équilibre naturel entre les sources et les puits de C terrestre, autant sous forme minérale et organique que gazeuse. Les formes gazeuses se retrouvent dans l'atmosphère et dans la partie superficielle des sols et des océans et ont un rythme d'échange très rapide de moins de cinq ans. Le C atmosphérique peut également être absorbé par la biomasse terrestre et ainsi être séquestré dans les tissus des plantes. Celles-ci seront par la suite en partie consommées par des organismes hétérotrophes et le C sera ensuite rejeté sous forme gazeuse dans l'atmosphère ou minéralisé dans les sols (Alexandrov, 2008).

La vie sur terre influence profondément la composition de l'atmosphère en libérant du dioxyde de carbone (CO₂) et du méthane (CH₄). Les processus de respiration et de fermentation fabriquent la plus grande partie de ces émanations. La photosynthèse et la respiration sont les deux réactions chimiques de base du recyclage du carbone (anonyme 2).

3. Carbone et matière organique dans le sol

3.1. Les différentes formes de la matière organique de sol

3.1.1. La matière organique vivante

Elle regroupe l'ensemble des organismes vivants du sol et peut représenter jusqu'à plusieurs dizaines de tonnes de matière fraîche par hectare.

3.1.1.1. La biomasse microbienne

Elle est constituée de champignons, de bactéries et d'algues. Les champignons interviennent dans la dégradation des débris végétaux. Les mycorhizes (champignons associés aux plantes) ont un rôle essentiel dans la nutrition des plantes. Leur pouvoir d'absorption de nutriments est supérieur à celui des cultures pour certains éléments (phosphore, azote).

Les bactéries participent aux processus de transformation des matières organiques (minéralisation et humification). Elles sont indispensables aux cycles du carbone et de l'azote du sol (bactéries fixatrices d'azote). Les algues accélèrent la dégradation de la roche-mère.

La fraction vivante (la biomasse microbienne) a un taux de renouvellement important, mais ne représente qu'un faible pourcentage (1 à 3 %) de la matière organique totale.

3.1.1.2. La faune du sol

Elle regroupe les animaux vivants sur et dans le sol : fourmis, termites, vers de terre, iules, scolopendres, nématodes,... À eux seuls, les vers de terre représentent plus de la moitié de la biomasse animale. L'activité de la faune du sol permet la fragmentation des matières organiques fraîches et le mélange des matières organiques avec les particules du sol ce qui facilite la création de porosité et la formation d'agrégats stables (structure grumeleuse).

3.1.1.3. La biomasse végétale

Dans le sol, la biomasse végétale est constituée par les racines. La production de racines contribue à l'apport de matière organique au sol (racines mortes et exsudats

racinaires). Pour exemple, la canne à sucre produit chaque année 7 t/ha de matière sèche de racines.

Les exsudats racinaires peuvent représenter eux jusqu'à plusieurs dizaines de tonnes par hectare.

De composition variée (sucres, acides aminés, acides organiques, vitamines, hormones, enzymes...), ils constituent la nourriture des micro-organismes vivant autour des racines, micro-organismes ensuite impliqués dans divers mécanismes comme la nutrition des plantes et la protection des racines contre les agents pathogènes.

3.1.2. La matière organique non vivante

3.1.2.1. La matière organique fraîche

Elle regroupe la litière (débris végétaux à la surface du sol), mais aussi, les racines mortes, les exsudats racinaires, les déjections et les cadavres d'animaux. Cette matière organique fraîche va servir de support et d'aliment à la faune et à la biomasse microbienne. Les résidus végétaux constituent la première source de matière organique des sols.

3.1.2.2. La matière organique labile

Entre biomasse microbienne et humus très stable, cette fraction de la MOS appelée matière organique transitoire ou intermédiaire résulte de la décomposition de la matière organique fraîche. Elle a, souvent, été proposée comme pool actif de la MOS (Parton et *al.*, 1994). La majeure partie des nutriments issus de la minéralisation de la matière organique ou de molécules issues du métabolisme microbien provient de cette fraction, au point où ce pool a été qualifié de « métabolite » (Lemaître et *al.*, 1995b).

3.1.2.3. La matière organique stable ou humus

Substance colloïdale qui résulte de la transformation des sous-produits de la décomposition microbienne et des résidus de végétaux. L'humus provient de l'assemblage de certains produits transitoires et de matières minérales en de nouvelles molécules de plus en plus complexes. L'humus est en fait un mélange de molécules : acides créniques, acides hymatomélaniques, acides fulviques, acides humiques et humines. La matière organique stable représente couramment plus de 90 % de la matière organique totale d'un sol.

Elle assure la fertilité du sol à moyen et long terme. La teneur en matière organique donnée par l'analyse de sol correspond en grande partie à cette forme : l'humus.

Cette fraction représente la composante stable de la MO, qui peut persister pendant plusieurs années dans les sols, surtout quand l'humus est intimement lié à la matrice minérale du sol (argile et limon). Le contenu en MO dans les sols dépend à la fois de la restitution de la biomasse au sol (prairie, culture, forêt), de l'apport de matières exogènes (fumier, boues de stations d'épuration, compost...) et du taux de minéralisation et d'humification de la MO, ces deux paramètres étant fonction, entre autres, de la qualité du substrat organique et de l'environnement physico-chimique du sol (pH, température, humidité...).

L'humus participe dans une moindre mesure à la libération d'éléments. En effet, 2 à 5 % du carbone de l'humus peut être minéralisé chaque année (Fortin et *al.*, 1982). Il constitue plutôt un réservoir d'éléments nutritifs dans le sol. En outre, la MOS considéré par les auteurs comme active c'est la biomasse microbienne et la fraction légère alors que celle considérée comme lente c'est la fraction passive constituée d'humus et celle qui est inerte c'est la fraction carbonisée.

3.2. Le rôle clé de la matière organique dans les sols

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).

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.

La matière organique et l'activité biologique qui en découle ont une influence majeure sur les propriétés physiques et chimiques des sols (Robert, 1996). L'agrégation et la stabilité de la structure du sol augmentent avec le contenu en carbone des sols. Les conséquences directes sur la dynamique de l'eau et la résistance à l'érosion par l'eau et le vent. Le carbone des sols affecte aussi la dynamique et la biodisponibilité des principaux éléments nutritifs (anonyme 3).

3.3. Dynamique du carbone organique dans les sols

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 2)). Dans les conditions normales d'aérobic des sols, la majorité du carbone apporté est labile et seulement une petite fraction (1 pour cent) de ce qui entre dans le sol (55 Pg/an) s'accumule dans la fraction stable qu'est la fraction humique (0,4 Pg/an).

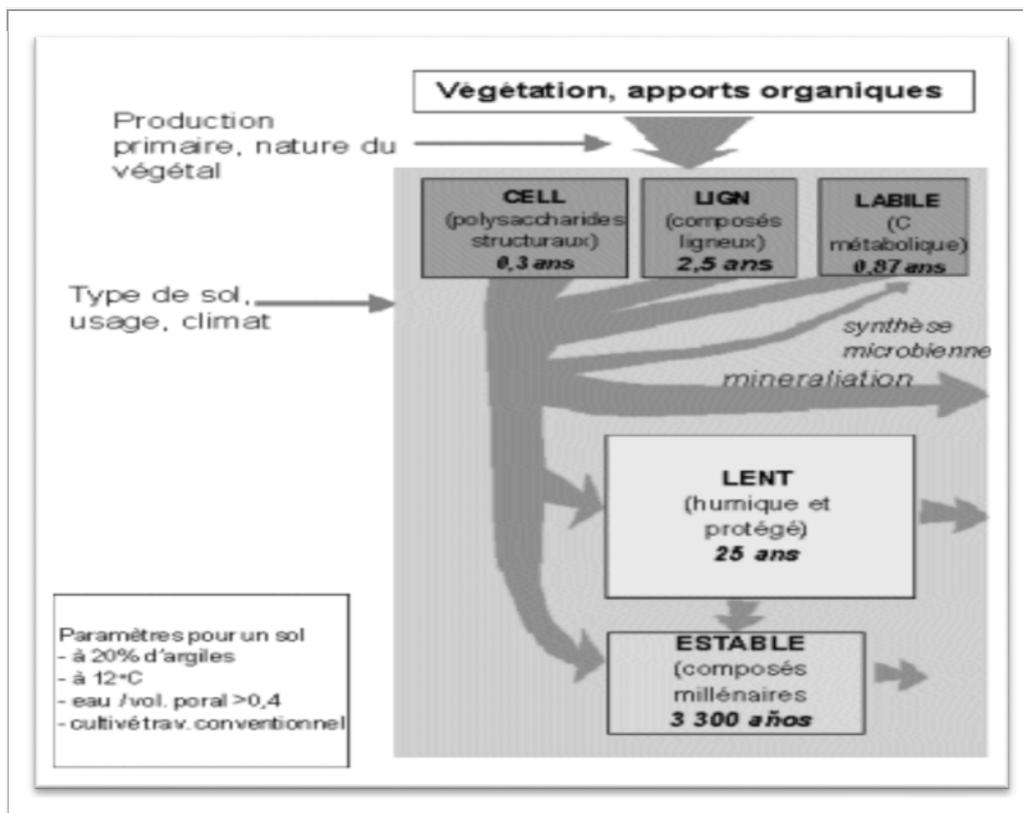


Figure 2 : Modèle de la dynamique du carbone dans le sol (d'après Balesdent *al.*, 2000)

La matière organique du sol (MOS) a une composition très complexe et hétérogène et elle est le plus souvent mélangée ou associée aux constituants minéraux du sol. Une grande variété de méthodes ont été développées pour identifier parmi les différents constituants de la matière organique des sols des pools cinétiques, c'est-à-dire des pools ou des compartiments qui peuvent être définis par un temps de résidence déterminé du carbone. La séparation traditionnelle de la matière organique en fraction humique et fulvique, ne sépare pas des fractions qui ont des cycles différents (Balesdent, 1996). Des méthodes de séparation

physique telles que le fractionnement en fonction de la dimension des particules, le fractionnement densimétrique ou le fractionnement selon la dimension des agrégats permet de séparer des fractions qui ont un sens cinétique (Feller et *al.*, 1979 ; Balesdent, 1996). Parmi ces fractions, la matière organique particulaire a été identifiée comme une fraction très sensible à l'usage des terres (Cambardella, 1998; Gregorich et *al.*, 1996). Des méthodes directes existent également pour déterminer la biomasse microbienne qui représente 1 à 5 pour cent de la matière organique totale et est un réservoir d'éléments nutritifs (N, P). C'est une fraction labile qui change avec la saison, mais a aussi une réponse rapide aux changements d'utilisation des terres.

Les différents compartiments de C existant dans le sol ont différents temps de résidence qui peuvent aller d'un an à plusieurs années en fonction de la composition biochimique (la lignine est, par exemple plus stable que la cellulose) à des dizaines ou même des milliers d'années pour la fraction stable. Il y a aussi quelques relations avec la composition mais majoritairement avec le type de protection ou le type de liaison. Très souvent, en considérant le carbone stable, une distinction est faite entre la protection ou la séquestration physique ou chimique; physique signifie une encapsulation de fragments de matière organique par les particules d'argile ou les macro- ou micro-agrégats du sol (Figure 3) (Puget et *al.*, 1995; Balesdent et *al.*, 2000); chimique signifie des liaisons spécifiques de la matière organique avec d'autres constituants du sol (colloïdes ou argiles), mais le plus souvent cela concerne des composés organiques très stables. Toutefois, le terme général de séquestration qui est utilisé dans le Protocole de Kyoto, ne fait aucune différence et est équivalent au terme de stockage, quelle que soit la forme de carbone.

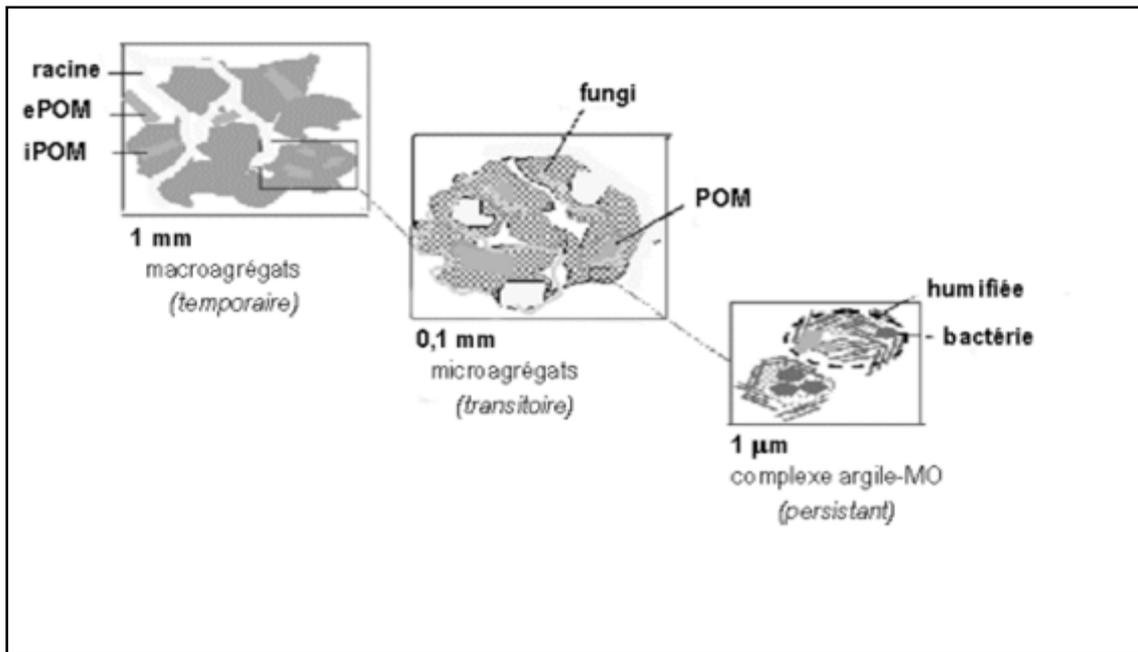


Figure 3: Sites de la matière organique du sol dans la matrice du sol (Chenu, non publié)

Les différents compartiments sont normalement sensibles à différents facteurs. Les particules de matière organique libre (+ biomasse microbienne) sont contrôlées par les apports de résidus végétaux et le climat. Les facteurs agronomiques (gestion) affectent la taille de ce compartiment (gestion des résidus de récolte ou du mulch). L'agrégation du sol, la texture et la minéralogie contrôlent le carbone dans les macroagregats. Parmi les facteurs agronomiques, le labour a l'effet principal sur la taille de ce compartiment. Les autres compartiments ne sont pas très influencés par les facteurs agronomiques mais principalement par des facteurs pédologiques (microagrégation, composition de l'argile).

Les progrès sur la connaissance de la matière organique et la dynamique du carbone dans les sols sont nécessaires pour mieux gérer la séquestration du carbone.

3.4. Rôle des sols dans le cycle du carbone

Le carbone organique du sol représente le plus grand réservoir en interaction avec l'atmosphère et est estimé entre 1 500 et 2 000 Pg C à 1 m de profondeur (2 456 Pg à 2 m de profondeur environ). Le carbone inorganique représente à peu près 750 Pg, mais il est capturé dans des formes plus stables comme les carbonates. La végétation (650 Pg) et l'atmosphère (750 Pg) emmagasinent considérablement moins que les sols. Les flux entre le carbone

terrestre ou le carbone organique du sol et l'atmosphère sont importants et peuvent être positifs (séquestration) ou négatifs (émission de CO₂) (anonyme 1).

Historiquement, de grandes variations ont été notées. Houghton (1995) estime que les émissions correspondant au changement de l'utilisation du sol (déboisement et augmentation des pâturages et des terres cultivées) étaient autour de 120Pg de 1850 à 1990 (de 0,4 Pg/an en 1850 à 1,7 Pg/an en 1990), avec un dégagement net à l'atmosphère de 25 Pg. Selon l'IPCC (2000), la perte historique provenant des sols agricoles était de 50 Pg C pour le dernier demi-siècle, ce qui représente un tiers de la perte totale provenant du sol et de la végétation.

Dans le passé, le développement de l'agriculture a été la cause principale de l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère, mais à l'heure actuelle la combustion du carbone fossile (6,5 Pg) par l'industrie et les transports représentent la contribution principale. Un point important à considérer est qu'à présent, même si la déforestation continue dans les régions tropicales (avec une émission de carbone estimée à environ 1,5 Pg/an), les autres flux sont positifs et autour de 1,8 à 2 Pg C/an sont séquestrés dans l'écosystème terrestre. Ceci représente ce qui est appelé le carbone manquant dans le cycle avec un puits qui peut être situé dans la partie septentrionale de l'hémisphère nord (Amérique du Nord) (Schindler, 1999).

Les principaux facteurs jouant sur l'évolution de la matière organique concernent la végétation (apport de résidus, composition de la plante), puis les facteurs climatiques (température/conditions d'humidité) et les propriétés des sols (texture, teneur en argile, minéralogie, acidité).

Les autres facteurs, relatifs à la fertilisation du sol (N, P, S), ou l'irrigation, ont un effet sur la production de la plante et donc sur la teneur en matière organique. Le taux de minéralisation de la matière organique dépend principalement de la température et de la disponibilité d'oxygène (drainage), de l'utilisation des terres, du système de culture, et de la gestion des sols et des cultures (Lalet *al.*, 1995). Pour un sol déterminé soumis à une pratique constante, un pseudo équilibre est atteint pour le contenu en matière organique du sol après 30 ou 50 ans (Greenland, 1995). Dans le contexte de la lutte contre le réchauffement climatique et du protocole de Kyoto, une question importante est comment créer un puits de carbone important et bien quantifié dans les sols agricoles du monde entier-

4. Carbone, biomasse végétale et sols

4.1. Transfert de la plante au sol

Les plantes transforment le CO₂ atmosphérique ainsi que les nutriments et l'eau extraite du sol en glucides simples, à partir de l'énergie du soleil pour produire de la biomasse (Hopkins, 2003).

Le carbone séquestré dans la matière vivante ou être exporté. La matière organique (MO) est le plus important apport naturel de Carbone organique dans le sol (Marschner, 2012; Rytter, 2012) et le sol, le plus grand réservoir du C sur terre (GIEC, 2013). En se constituant, cette biomasse intègre donc au sol, par la production de litière (ex : feuilles, brindilles, branches et racines mortes), une part du C qu'elle puise dans l'atmosphère (Sundermeier et al., 2004). Les exsudats, produits de la nutrition végétale et particulièrement des racines, introduisent jusqu'à 17% du C atmosphérique fixé par la plante dans la zone proximale aux racines du sol (Philippot et al., 2008). Ce Corg est rapidement oxydé par les communautés microbiennes de la rhizosphère et retourné vers l'atmosphère (Jones et al., 2008; Philippot et al., 2008). De cette façon, une part importante de ce Corg, en présence d'oxygène, est oxydée naturellement, pour former du CO₂. Le CO₂ et le CH₄ sont les deux gaz principaux qui sont produits par la respiration, l'exsudation racinaire et la décomposition des cellules organiques (Crowe et Wieder, 2005 ; Marschner, 2012). Les microorganismes du sol décomposent la matière organique pour en extraire son énergie et relâchent le C gazeux comme sous-produit de leur activité cellulaire.

La matière organique peut devenir protégée physiquement et chimiquement de la décomposition par les microorganismes, dans des agrégats de sols et lorsqu'elle est fortement liée à des surfaces minérales électronégatives telles que les argiles (Davidson et Janssens, 2006). Dans cet état, la matière organique n'est pas biodisponible pour les microorganismes qui voudraient s'en nourrir et ne sera donc pas décomposée et retournée à l'atmosphère sous forme de CO₂ ou CH₄. Environ 5% du C introduit par les exsudats et la décomposition de la litière est ainsi intégré au Corg minéralisé du sol (Jones, 2008). Un rythme de décomposition inférieur au rythme d'accumulation de la litière mènera à la formation de sols organiques profonds affichant un fort contenu en Corg (Philippot et al., 2008). Selon Kell (2011), les sols représentent des puits de Corg très efficaces (Kell, 2011). La zone racinaire compterait, globalement, 1500 à 1600 Gt de C séquestré dans le premier mètre et plus de 2000 Gt dans les trois premiers mètres (Rytter, 2012). L'atmosphère ne contient que 750 Gt de C

atmosphérique (Robert & Saugier, 2003). Par contre, le passage d'un type d'utilisation du territoire à un autre peut augmenter significativement la quantité de Corg séquestrée dans le sol (Freibauer et al., 2004). Selon Zan et al., (2001), le passage de sols agricoles à des cultures pérennes de biomasse permet d'élever de 0.6 t par hectare par an le contenu en Corg du sol.

5. Tendances générales de la séquestration du carbone dans les sols

Il est devenu évident que l'augmentation des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère et le changement climatique qui en résulte auront des effets majeurs au 21ème siècle. Même si les scénarios exacts sont encore incertains, on prévoit des effets négatifs sérieux et il est essentiel que plusieurs actions soient entreprises afin de réduire les émissions de GES et d'augmenter leur séquestration. A ce propos, des nouvelles stratégies et des politiques appropriées pour la gestion de l'agriculture et de la sylviculture doivent être développées (anonyme 1). Une option concerne la séquestration du carbone dans les sols ou la biomasse terrestre, en particulier les sols utilisés pour l'agriculture ou la sylviculture (Figure 4).

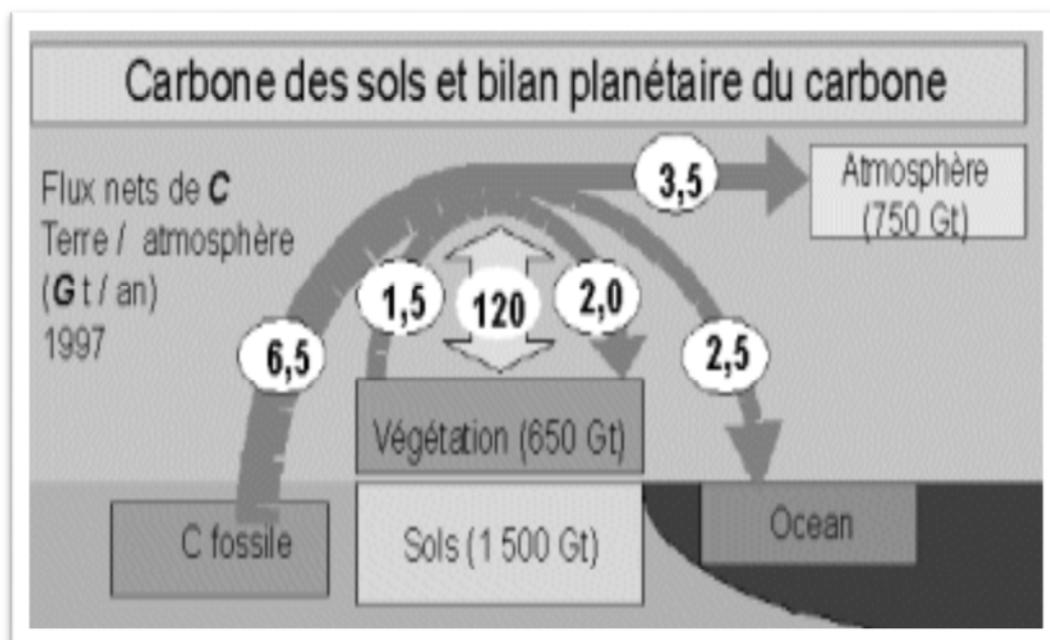


Figure 4 : Le cycle du carbone terrestre: le carbone du sol et le budget mondial du carbone d'après le Programme International Géosphère Biosphère (IGBP, 1998) et (IPCC, 2000)

On peut penser que la prise de mesures sur la séquestration du carbone selon le protocole de Kyoto stimulera non seulement des changements importants dans la gestion du sol, mais aura aussi, par l'augmentation de la teneur en matière organique, des effets directs sensibles sur les propriétés du sol et un impact positif sur les qualités environnementales ou agricoles et la biodiversité. Les conséquences incluront une fertilité du sol accrue, et une augmentation de la productivité du sol pour la production des aliments et la sécurité alimentaire. Cet instrument économique rendra aussi plus durables les pratiques agricoles et aidera à prévenir ou à atténuer la dégradation des ressources en sol.

5.1. Conséquences et impacts principaux de la séquestration du carbone

La séquestration du carbone et une augmentation de la matière organique du sol auront 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 (anonyme1).

5.1.1. Qualité et fertilité du sol

La matière organique a des fonctions biologiques, physiques et chimiques essentielles dans les sols. La teneur en matière organique est généralement considérée comme l'un des principaux indicateurs de la qualité du sol, tant pour l'agriculture que pour les fonctions environnementales.

La matière organique est d'un intérêt particulier pour les sols tropicaux. La capacité d'échange des cations augmente en général en fonction de l'augmentation de la matière organique (figure 5). La biodisponibilité d'autres éléments importants, comme le phosphore, sera améliorée, et la toxicité d'autres éléments peut être inhibée par la formation de chélate ou autres liaisons, par exemple, l'aluminium complexé par la matière organique (Robert, 1996a).

En agriculture à faibles intrants en éléments nutritifs des plantes, le recyclage d'éléments nutritifs (N, P, K et Ca) par la décomposition graduelle des résidus des plantes et des cultures est d'une importance cruciale pour la durabilité (Sanchez et Salinas, 1982; Poss, 1991).

Concernant les propriétés physiques, la matière organique et les organismes vivants associés jouent un rôle dans l'agrégation du sol à différentes échelles de l'organisation du sol (Tisdallet Oades, 1982; Robert et Chenu, 1991), aux échelles micro et macro. Les processus

d'agrégation et de la séquestration du carbone sont fortement associés (Golchinet al., 1994; Angers et Chenu, 1998).

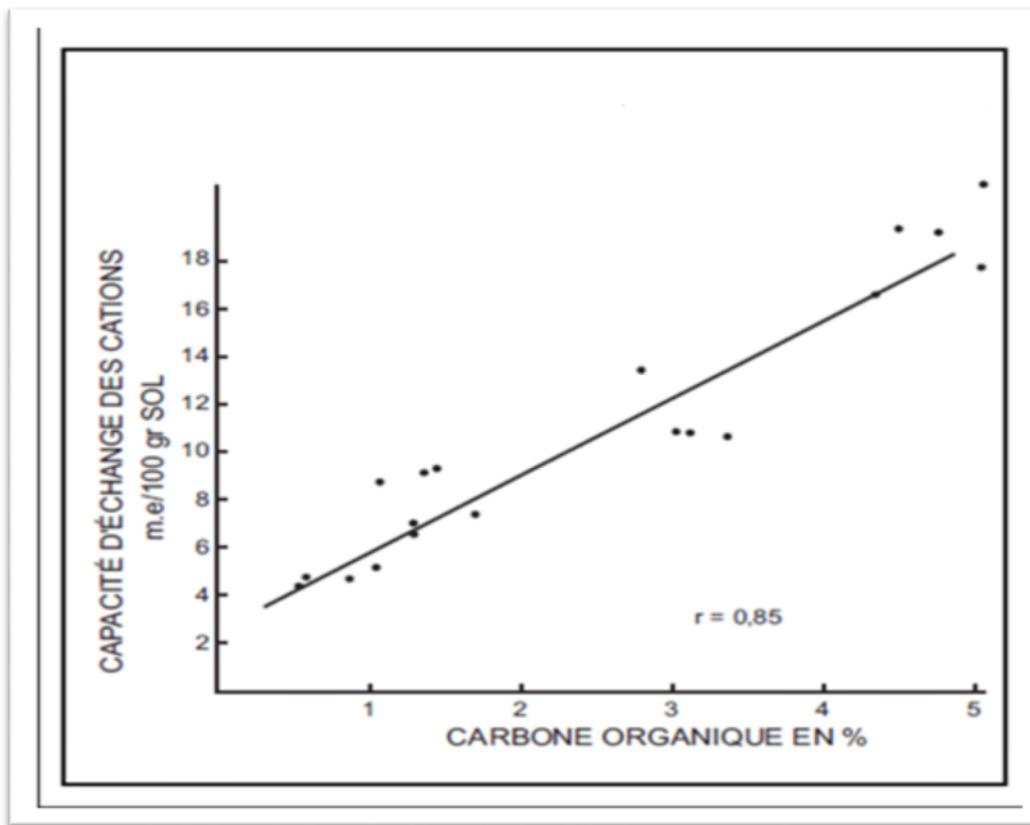


Figure 5: relations entre le carbone organique et la capacité d'échanges en cations dans un sol expérimental

5.1.2. Impacts sur l'environnement

La séquestration du carbone dans les sols agricoles contrebalance le processus de la désertification par le rôle de la matière organique accrue dans la stabilité structurale (résistance à l'érosion du vent et de l'eau) et la rétention de l'eau, et le rôle essentiel de la couverture de surface du sol par les plantes, les débris de plantes ou le paillis pour prévenir l'érosion et augmenter la conservation de l'eau.

La matière organique, augmente la qualité du sol, protège aussi l'environnement par la fixation des polluants (tant organiques comme les pesticides, que minéraux, comme les métaux lourds ou l'aluminium) avec, en général, une diminution de leur toxicité.

La qualité de l'air est principalement concernée par la diminution de la concentration de CO₂, mais il faut accorder de l'attention aux autres gaz à effet de serre, en particulier le

méthane et l'oxyde nitreux (CH₄ et N₂O). Le principal facteur du sol contrôlant leur genèse est l'anaérobiose (réduction du sol), qui est généralement liée à l'hydromorphie. Quand les pâturages ou les parcours sont augmentés, l'émission de méthane par le bétail doit être également prise en considération.

Dans certaines conditions et selon les conditions climatiques (zone humide), ou les propriétés du sol (teneur élevée en argile), N₂O peut être formé. Par conséquent, il faut faire un bilan des émissions de gaz.

La qualité de l'eau est aussi améliorée par la réduction de l'érosion, du ruissellement de l'eau et des polluants. Dans le cas spécifique du labour de conservation, une forte minéralisation de la matière organique avec formation de nitrate est évitée ou minimisée.

Les changements dans l'utilisation du sol et la gestion du sol ont aussi un effet important sur la répartition des précipitations entre le ruissellement et le stockage et l'infiltration, avec augmentation de cette dernière dans les conditions de prairie, forêt, et labour de conservation avec couverture du sol. La couverture du sol prévient l'érosion. Par conséquent, même si un peu de ruissellement se produit encore, l'eau sera dénuée de particules associées à des polluants (oligo-éléments minéraux, PO₄). La pollution par des produits solubles diminuera aussi suite à la diminution du ruissellement. C'est l'une des bases des conditions écologiques de la loi agricole aux Etats-Unis depuis 1996. Avec ces changements de pratiques, le défi pour la qualité de l'eau peut être satisfait. Une fois que les changements auront eu lieu dans de grandes zones, la fréquence et la sévérité des crues peuvent aussi décliner.

Les effets d'un changement des pratiques agricoles pourraient ainsi se faire sentir à différentes échelles. L'effet global de l'augmentation de la matière organique dans le sol est également une amélioration de la capacité et la résistance du sol aux différents genres de dégradation ou stress.

La séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion des terres (anonyme 5).

5.2. Les principaux facteurs influençant le temps de résidence du carbone organique dans les sols

L'évolution du stock de carbone organique dans les sols résulte de l'équilibre entre les apports organiques au sol et la vitesse de minéralisation (anonyme 3)

Les principales variables pédologiques, climatiques et anthropiques affectant le temps de résidence (turnover) du carbone dans le sol sont :

- La température limite le temps de résidence, la minéralisation augmente avec la température.
- Le labour limite le temps de résidence par la suppression des protections des MO du sol.
- L'engorgement des sols et l'acidité permanente augmentent le temps de résidence, il y a formation de tourbe en conditions froides à long terme.
- La présence d'Aluminium libre augmente le temps de résidence par une protection physique et physicochimique des MO du sol.
- La teneur et la nature des argiles augmentent le temps de résidence.

D'autres facteurs auraient tendance à augmenter ce temps de résidence :

- La fréquence des anaérobioses qui induit un rendement microbien moindre.
- La fréquence de dessiccation du sol, la teneur en carbonates de Ca et Mg contribuent à l'insolubilisation et l'adsorption des MO du sol.
- La proportion de Ca et Mg échangeables et la teneur en calcaire actif assurent une protection physique des MO du sol.
- Les carences en azote et phosphore disponibles limitent l'activité des microorganismes.

6. Mesure des stocks de Carbone dans le sol

Lors de l'évaluation des stocks de carbone dans le sol, on ne tient pas compte de la matière organique au-dessus de la surface du sol. Pour les sols cultivés, cela signifie que les résidus des plantes ou des cultures sont considérés comme une phase transitoire ; Les racines sont considérées comme une biomasse de carbone et dans les prairies par exemple, ce compartiment a une importance majeure.

La méthode la plus communément appliquée consiste à déterminer le carbone organique total à différentes profondeurs ou globalement pour un ou plusieurs horizons, et de transformer les données, en tenant compte de la densité apparente du sol. Les statistiques sont calculées sur différents échantillons afin de déterminer les réserves de carbone. Le résultat

peut être exprimé en total de kg/m², t/ha ou Gt (Pg) dans des zones et à des profondeurs spécifiées.

Il existe trois références importantes concernant l'évaluation des stocks de carbone des sols au niveau mondial, (anonyme 1) Sombroek et al. (1993) ont utilisé la carte FAO/Unesco des sols du monde au 1/5000000 et environ 400 profils de sols regroupés selon des unités FAO avec détermination des fourchettes et des moyennes de teneurs en carbone et de densité pour chaque unité de sol.

Ils ont été capables d'estimer aussi les stocks de carbone organique par type de sol et le stock au niveau mondial.

7. L'influence de nombreux facteurs

Les flux de carbone entre l'atmosphère et le sol, via la végétation, sont affectés par de nombreux facteurs entraînant des évolutions plus ou moins rapides. Ces facteurs sont d'origine naturelle (climat et type de sol) ou anthropique (type d'occupation du sol, travail du sol, gestion des résidus de culture, apports de matières organiques, cultures intermédiaires, etc). Certains de ces facteurs peuvent être identifiés comme des leviers permettant d'augmenter les stocks de carbone des sols (anonyme 4).

7.1. Occupation du sol et gestion des résidus

Si la capacité de stockage de carbone d'un sol dépend notamment de sa teneur en argile, le type de sol ne constitue cependant pas un levier d'action.

Il n'en est pas de même pour l'occupation du sol. On observe d'une part un gradient croissant des stocks, selon que le type d'occupation du sol soit respectivement vigne, terre arable ou prairie (figure 6). D'autres parts, les stocks varient au sein des terres arables, selon le type de rotation pratiquée, dans la mesure où la restitution de carbone est différente selon les espèces cultivées. En effet, la quantité de carbone restituée au sol après la récolte varie d'environ 300 kg/ha pour une culture de pois protéagineux à 1 t/ha pour du colza (figure 07).

De plus, la gestion des résidus (export ou restitution) peut entraîner une différence importante des quantités de carbone restituées pour une même culture. Ce facteur affecte particulièrement les céréales à paille (400 à 800 kg/ha) et le maïs (300 à 1000 kg/ha).

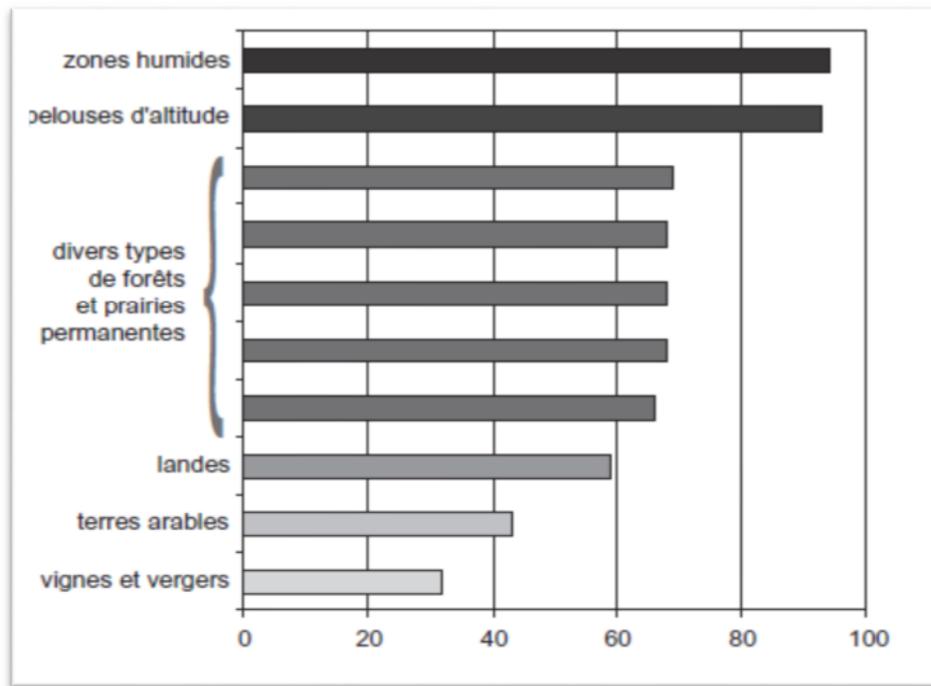


Figure 6 : Stocks de carbone organique des sols (0-30 cm) en t/ha (INRA, 2002)

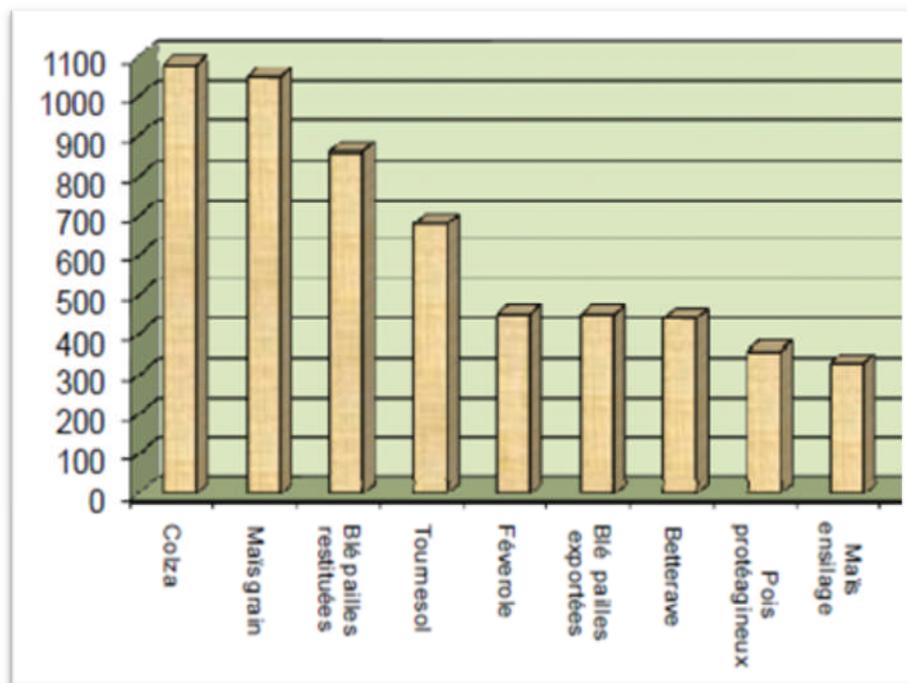


Figure 7: Fourniture de carbone humifié par les résidus de culture (kg/ha) (Agro-Transfert RT)

Enfin, lors de changements d'occupation du sol, les vitesses d'évolution des stocks peuvent être différentes. Par exemple, la mise en culture d'un sol initialement sous prairie ou forêt engendre une diminution du stock deux fois plus rapide qu'une augmentation du stock liée à une conversion inverse des terres. Il est donc conseillé de privilégier le maintien des

prairies et forêts existantes à la création de ces espaces en compensation de destructions (anonyme 4).

7.2. Travail du sol

Le labour, en diluant le carbone apporté en surface sur toute la profondeur labourée, maintient une teneur basse dans la couche superficielle. Cette dilution sera d'autant plus forte que la profondeur du labour est importante. L'absence de labour augmenterait le stockage de carbone par une moindre minéralisation des matières organiques (figure 8) due à leur meilleure protection physique dans les agrégats du sol (qui ne sont plus détruits par le labour, ni exposés à la pluie lorsque le sol est nu), La réduction du travail du sol, la couverture permanente du sol apparaissent donc comme de véritables stratégies de préservation de stocks organiques des sols (Chenu et *al.*, 2014).

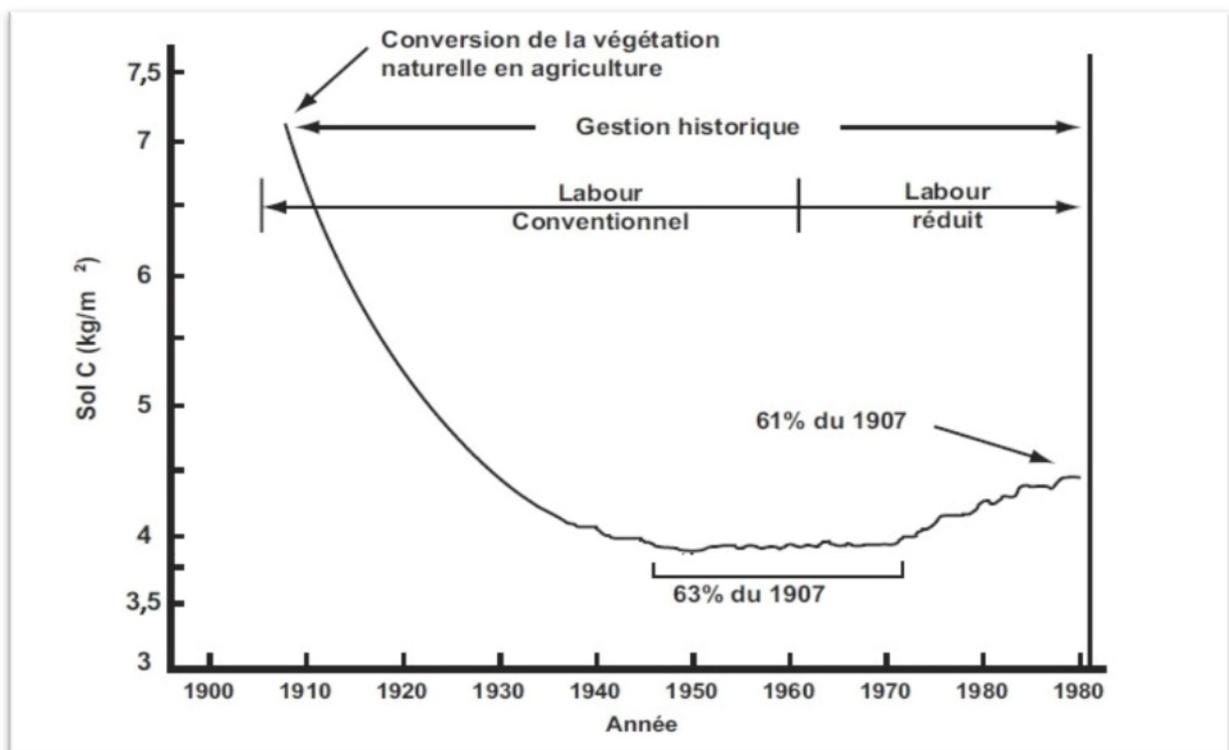


Figure 8 : Changements simulés du carbone sur 20 cm de profondeur de 1907 à 1990 pour la zone à blé de la plaine centrale des États-Unis (d'après Smith, 1999).

8. Stock de carbone et type de végétation

8.1. Les prairies

Les principaux puits de carbone terrestres sont les prairies 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 (Trumbore et al., 1995; Balesdent et Arrouays, 1999)

Néanmoins, le stockage pérenne dans le sol représentant seulement de 10% du carbone fixé par la photosynthèse, il correspond donc à un phénomène en marge du flux majeur constitué par le couple photosynthèse/respiration. Les stocks importants dans les sols prairiaux et forestiers (tableau 1) s'expliquent par un flux de carbone entrant plus important (d'avantage de racines et débris, couvert permanent et plus dense au niveau du sol), une décomposition plus lente de la matière organique du sol en l'absence de labour et d'aération du sol et enfin, une dégradation plus faible des racines riches en lignines.

Concernant ces surfaces en grandes cultures, la restitution des résidus de culture, l'implantation d'engrais verts, la diminution du travail du sol ainsi que l'épandage de déchets organiques contribuent à alimenter les stocks de carbone des sols.

Tableau 01 : stock de carbone dans le sol par hectare, sur l'horizon 0-30 cm, en fonction du type d'occupation du sol

type de couvert	stock de carbone (t C/ha)
terre arable	43
Prairie	70
foret mélangée	70
pelouse d'altitude	93

Source : arrouays et al., 2002

8.2. Comment les prairies stockent-elles le carbone ?

Grâce au processus naturel de la photosynthèse, l'herbe des prairies utilise le dioxyde de carbone de l'air (CO₂), l'énergie solaire et l'eau pour pousser. Le carbone s'accumule ainsi dans les tissus végétaux, puis dans le sol sous forme de matière organique quand les plantes meurent. C'est pourquoi on dit que le sol des prairies permanentes stocke du carbone (sous nos climats, en moyenne 760 kg par hectare et par an dans l'état actuel des connaissances). En revanche, si elles sont labourées, le carbone stocké est réémis sous forme de CO₂, lorsque la matière organique du sol entre en contact avec l'oxygène de l'air. Il est donc important de maintenir les surfaces de prairies permanentes et leur stock de carbone. (D Arrouay *et al.*)

A l'échelle mondiale, ces prairies stockent « 30% du carbone du sol du monde » et jouent un rôle essentiel dans la lutte contre le changement climatique.

D'après les derniers bilans de l'Institut de l'élevage, ce stockage de carbone dans le sol des prairies et des haies compenserait en moyenne 30% des émissions de gaz à effet de serre (en équivalent CO₂) de l'élevage herbivore (entre 24% et 53% selon les systèmes d'élevage bovin viande). Cela correspond à environ 75% des émissions de méthane des bovins (anonyme 5, 2008)

Les écosystèmes terrestres (prairies, forêts...) ont un rôle majeur dans l'évolution de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre. En Europe, ils piègent environ 10 % des émissions de CO₂ à travers la photosynthèse puis l'accumulation du carbone dans la matière végétale et la matière organique du sol. Mais ils constituent aussi une source de méthane émis notamment par les ruminants domestiques, et d'oxyde nitreux produit par les sols agricoles et les effluents d'élevage.

9. Les voies techniques d'accroissement du stockage de carbone dans les terres agricoles

Les activités agricoles susceptibles de stocker du C sont celles qui permettent :

1) d'accroître les "entrées" de matière organique :

- En augmentant la production primaire, qui accroît généralement les apports de matière organique au sol ;

- En accroissant les restitutions au sol des résidus de culture et déjections animales (fumiers...);

- En important des matières organiques non agricoles (épandage de déchets organiques d'origine industrielle ou urbaine);

2) de retarder les "sorties" par minéralisation :

- En ralentissant la décomposition puis la minéralisation en jouant sur la composition des MO, mais aussi sur les usages du sol et les pratiques agricoles qui peuvent modifier les conditions physico-chimiques et améliorer la protection physique de la MO ;

- En privilégiant les usages "durables" de la MO récoltée (ce point concerne principalement le bois).

Certains usages du sol ou pratiques agricoles jouent sur plusieurs de ces mécanismes. Ainsi, le stockage additionnel maximum est obtenu par le passage d'une culture annuelle à une végétation pérenne, qui cumule plusieurs effets : des apports de C parfois plus élevés (par les organes aériens et souterrains) ; des MO plus résistantes à la dégradation ; une incorporation accrue par voie racinaire, qui assure une protection physique de la MO plus importante ; une stabilisation, notamment par la suppression du travail du sol, des agrégats qui protègent la MO (D Arrouay et *al.*)

10. La mesure de la biodiversité

Les différentes acceptions et catégories qui se cachent derrière le terme de biodiversité laissent penser que son appréhension, sa mesure, ne sont pas des choses simples ! Effectivement, de très nombreux concepts, certains traduits par des indices chiffrés, ont été proposés pour cela, concernant tant les espèces que les populations ou les communautés, le monde végétal, animal ou microbien (Beedy & Brennan, 2008. En réalité, seuls certains d'entre eux mesurent réellement la biodiversité en tant que telle (indice de Shannon) les autres fournissent des renseignements sur des propriétés annexes à la diversité proprement dites. L'indice de Shannon, un des plus utilisés, rend compte de la biodiversité d'un écosystème.

10.1. Les ligneux et les cultures associées

10.1.1. L'olivier (ligneux)

L'origine de l'olivier se perd dans la nuit des temps; son histoire se confond avec celle des civilisations qui ont vu le jour autour du bassin Méditerranéen et ont, pendant longtemps, régi les destinées de l'humanité et marqué de leur empreinte la culture occidentale (Anonyme, 2000).

L'olivier existait déjà sur le pourtour méditerranéen dès la préhistoire. 6 000 ans avant J.C. l'olivier est signalé en Egypte. Dès 1 200 ans avant J.C. les grecs, peuple de la mer, vont sillonner la méditerranée et faire connaître la culture de l'olivier en Espagne, en Sicile et en Afrique du Nord. Les Romains permettent ensuite une grande extension des oliveraies et un essor des échanges d'huile d'olive.

Au cours de périodes plus récentes, l'olivier a poursuivi son expansion au delà de la méditerranée, s'implantant dans des régions fort éloignées de son biotope d'origine comme l'Afrique du Sud, l'Australie, le Japon ou la Chine, le Mexique, le Pérou, la Californie, le Chili et l'Argentine.

10.1.2. Les cultures associées

Il s'agit de la culture simultanée de deux espèces ou plus, sur la même surface, pendant une période significative de leur cycle de croissance (Willey, 1979). Dans les associations de cultures céréale-légumineuse, les espèces associées établissent des interactions négatives (compétition) ou positives (facilitation et complémentarité de niche) pour exploiter les ressources du milieu.

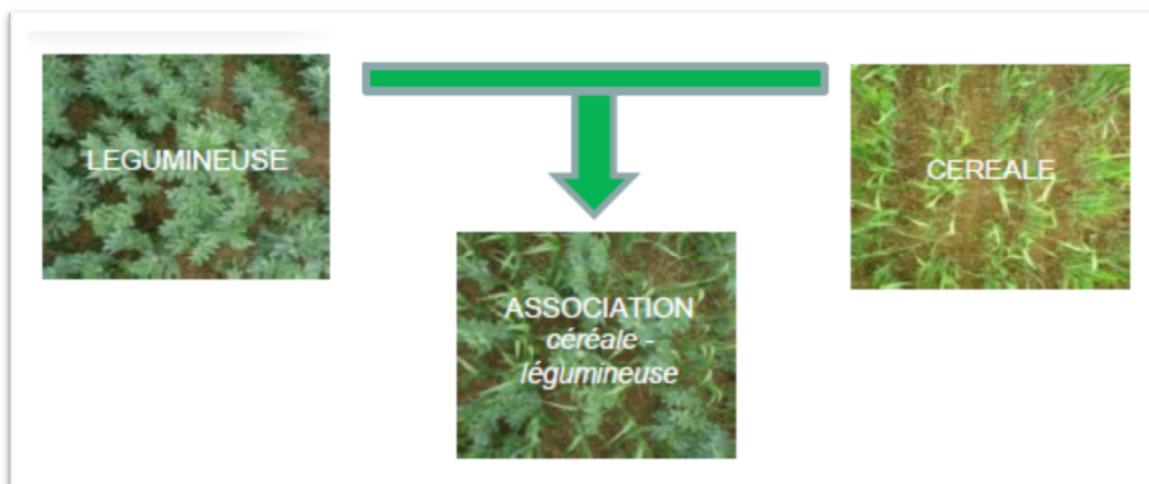


Figure 9 : association céréales- légumineuse

1. Avoine

L'avoine est une plante rustique, cultivée dans les régions tempérées, principalement pour fourrage vert (parties aériennes et paille), mais aussi pour son grain (en alimentation humaine et animale). Cette céréale fourragère est cultivée souvent en association avec la vesce ou le pois pour la production de fourrage.

Caractéristiques botaniques

Classification

Selon SPICHTER et al (2002), la classification botanique est la suivante :

- Règne : plantes
- Embranchement : spermaphytes
- Sous embranchement : Euangiospermes
- Classe : monocotylédones
- Sous classe : Commélinidées
- Ordre : Poales
- Famille : Poacées (graminée)
- Tribu : avenée
- Espèce : *Avena sativa*
- Nom commun en français : avoine
- Nom commun en anglais : Oats
- Nom commun en arabe : الخرطال

Systeme racinaire de la plante :

L'avoine possède des racines fasciculées, sont particulièrement abondantes et plus profondes que celles de l'orge et du blé, ce qui fait que la plante peut puiser suffisamment de nourriture dans les sols pauvres pour donner des récoltes satisfaisantes là où le bien viendrait mal (SOLTNER, 1990)

2. Vesce

Vicia est un genre de plantes herbacées de la famille des Fabaceae (ou Légumineuses), dont certaines sont cultivées comme plantes ou comme légumes (les fèves par exemple). C'est le genre des vesces, de la fève et la féverole

Classification APG III (2009)

Règne	Plantae
Clade	Angiospermes
Clade	Dicotylédones vraies
Clade	Noyau des Dicotylédones vraies
Clade	Rosidées
Clade	Fabidées
Ordre	Fabales
Famille	Fabaceae
Sous-famille	Papilionoideae
Tribu	Fabeae

Chapitre II : Matériels et méthodes

1. Présentation de la zone d'étude

La station d'étude est sise dans la wilaya de Tizi-Ouzou, elle fait partie du bassin versant du Haut Sebaou.

1.1. Géologie de la région d'étude

La lithologie de la région est dominée par des formations géologiques imperméables, où on relève une large répartition du socle cristallophyllien entouré d'un ensemble sédimentaire composé essentiellement d'argiles, de marnes, de calcaires et de flysch (Yakoub, 1996). Le socle est constitué de gneiss, micaschistes, calcaire cristallin et schistes datés du précambrien. On trouve également des roches intrusives dans la série métamorphique comme les pegmatites, granulites et roches granitoïdes (Raynold, 1976).

1.2. Le climat

La région d'étude appartient à un régime climatique Méditerranéen, celui-ci se distingue par une période estivale chaude et sèche et un hiver doux et souvent pluvieux. Pour caractériser le climat de la zone d'étude durant notre expérience, les données climatiques enregistrées durant la période (2006/ 2015) ont été utilisées.

1.2.1. Les précipitations

La pluviométrie annuelle de Tizi-Ouzou diminue sensiblement du nord vers le sud ainsi que des sommets vers les plaines. Les précipitations les plus abondantes sont enregistrées au niveau des massifs les plus élevés (l'O.N.M de Tizi-Ouzou). Les moyennes mensuelles des précipitations enregistrées pour la **période** (2005-2015) sont représentées dans **le tableau 2** :

Tableau 2 : moyenne des précipitations mensuelles de Tizi-Ouzou pour la période de 2005/2015 (Source Office Nationale de Météorologie (O.N.M.)).

Mois	J	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D	Total
P (mm)	114.6	124.2	112.1	80.3	69.2	16.8	3.2	6.2	43.2	72.7	127	112.8	882.3

Les précipitations sont importantes dans la période de novembre à Mars atteignant une valeur maximale de 124.2 mm au mois de février, quant à la valeur minimale elle est enregistrée à 3.2 au mois de juillet.

Les moyennes des précipitations mensuelles de la période comprise entre Juin 2015 et Mai 2016 de la région Tizi-Ouzou sont représentées dans le tableau 3 :

Tableau 3 : Moyennes des précipitations mensuelles de la période Juin 2015 à Mai 2016 de la région de Tizi-Ouzou(Source Office Nationale de Météorologie (O.N.M.)).

Mois	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	Total
P (mm)	15,3	4,1	2,6	41,1	81,7	102,7	0	59,9	96,2	185,3	61,8	68,4	718,5

L'examen des (tableaux 2 et 3), indique que le mois de décembre a connu une absence totale de précipitations et le mois de janvier a connudes précipitations d'environ 50% plus faible que la moyenne des précipitations du mois de janvier durant 10 ans. De plus, les précipitations annuelles totales de l'année 2016(P=718.5mm) sont bien inférieurs à celle de la moyenne de 10 ans (P=882.3mm). Un déficit de 163.8 mm enregistré pour l'année 2016.

1.2.2. Les températures

Les températures moyennes mensuelles des maximales, desminimales sont illustrées dans le tableau 3. Les mois les pluschauds sont juillet et août, respectivement, avec une température moyenne maximale de 36°C et 35°C. Le mois de janvier est le mois le plus froid avec une température moyenne minimale surde 10 ans de 6.54°C.

Tableau 4 : répartition des températures mensuelles maximales, minimales moyennes de la région de Tizi-Ouzou 2006 /2015 (O.N.M de Tizi-Ouzou)

	Mois	J	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D
T°Moy/mois°C	Mini	6,54	6,45	8,70	11,37	14,29	17,78	21,38	21,63	18,88	15,70	11,86	7,67
T°Moy/mois°C	MAX	15,74	15,7	19,17	22,53	26,48	31,35	36,06	35,08	31,37	27,45	19,92	16,72
	(Max+Min)/ 2°C	11,14	11,08	13,94	16,95	20,39	24,57	28,72	28,36	25,13	21,58	15,89	12,20

Les données des températures moyennes mensuelles pour la région de Tizi-Ouzou de Juin 2015 à Mai 2016 sont mentionnées dans le tableau 5.

Tableau 5: Moyenne des températures mensuelle durant la période de Juin 2015/Mai 2016 de la région de Tizi-Ouzou.

Mois	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M
2 *TC°	49,4	59,4	57,6	48,8	40,4	29,8	24,4	25,6	25,2	25	32,2	38

La température moyenne mensuelle maximale est enregistrée au mois de juillet (29.7°C) et la minimale est enregistrée au mois de décembre (12.2°C).

1.2.3. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен

Le diagramme ombrothermique permet de déterminer la saison sèche, selon Bagnouls et Gausсен (1953) un mois est sec quand le total des précipitations (en mm) est inférieur au double de la température en °C c'est-à-dire $P < 2T$.

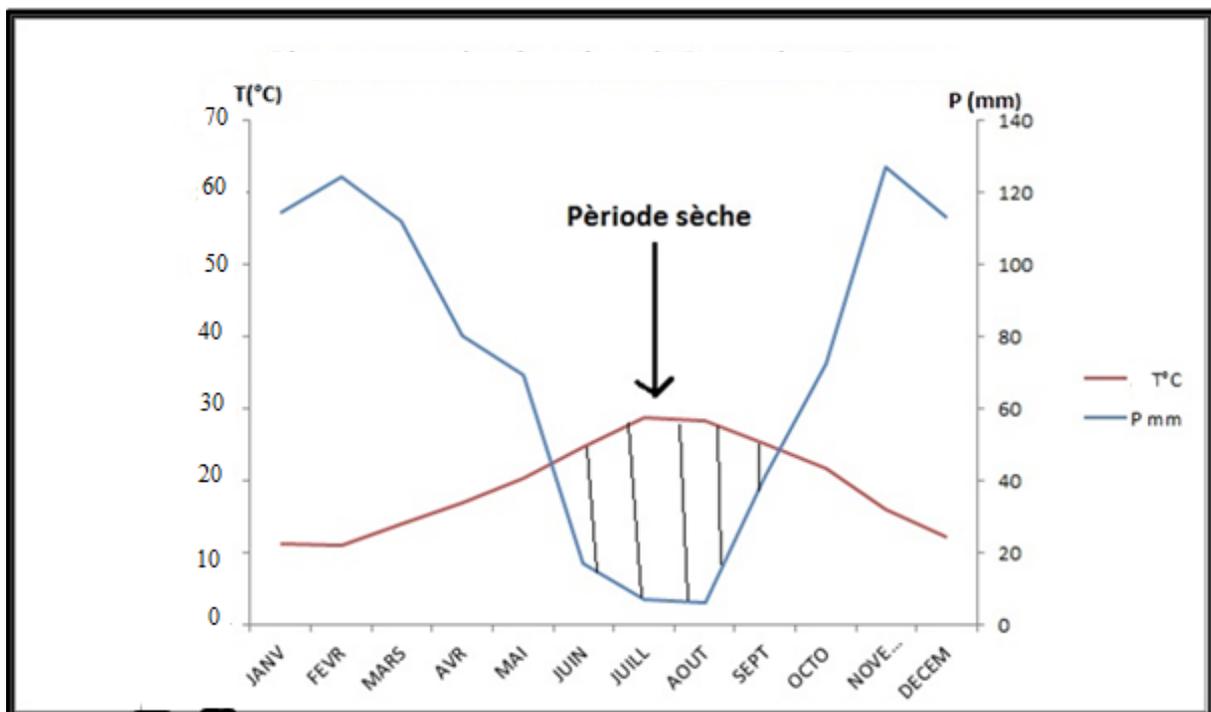


Figure 10 : Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен pour la région de Tizi-Ouzou période (2005-2015)

2. Présentation de la parcelle expérimentale

2.1. Localisation géographique

La parcelle expérimentale est sise à Tizi N'tlata une commune affiliée à la daïra de Ouadhias située à 35 Km au sud de Tizi-Ouzou.

2.2. Choix de la parcelle

Notre choix s'est porté sur cette parcelle, car la disposition des oliviers est ordonnée. Ils sont alignés avec une équidistance de 7 mètres entre chaque olivier. Cet agencement a relativement facilité la mise en place du protocole expérimental sur le terrain.

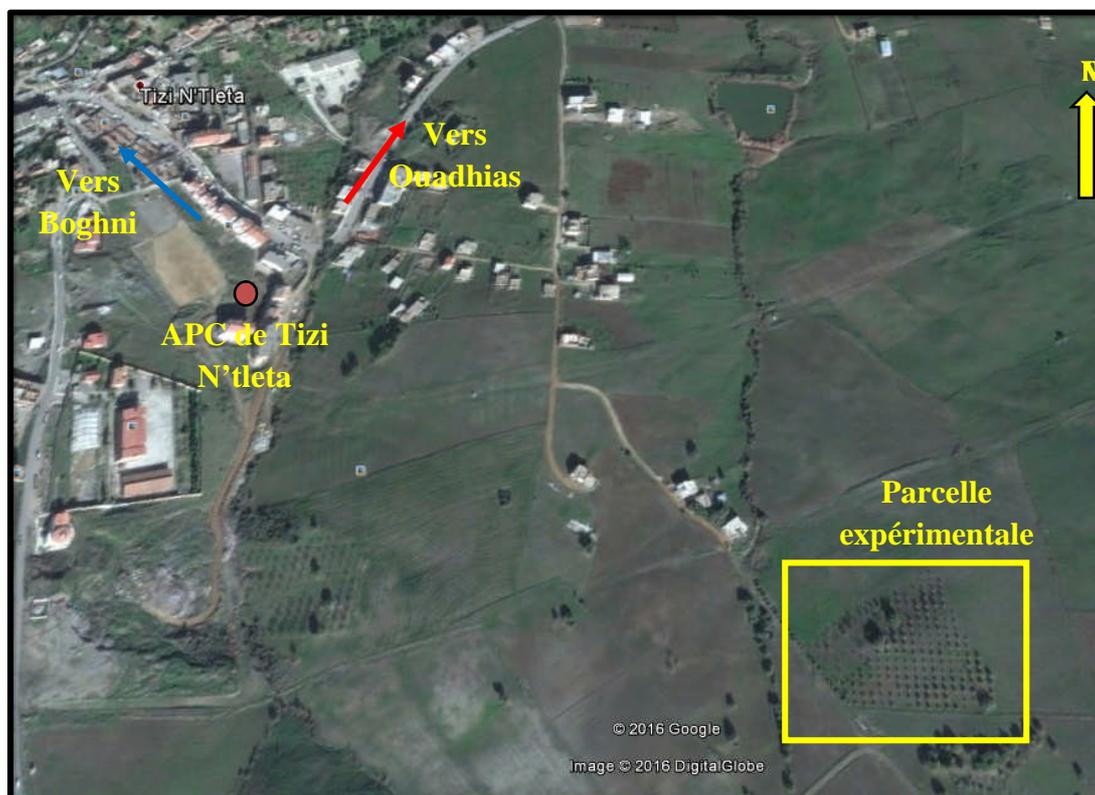


Figure 11 : Vue satellitaire de la situation géographique de la parcelle expérimentale (Source : Google Earth 2016).

3. Le dispositif expérimental

L'étude est menée sur une oliveraie de la variété Chamlal de densité de 160 arbres/ ha. Les arbres sont tous âgés de 12 ans, ils sont issus d'une plantation installée en 2002 en respectant une distance constante de 7 m entre chaque olivier. De la vesce et de l'avoine sont semées en association avec l'olivier suivant le dispositif expérimental en bloc complet (figure12) confectionné par Mr Alili en 2015. Ce dernier est composé de 16 blocs, chaque bloc de 144 m² de surface est constitué de 4 oliviers.

Le semis a été effectué le 14/11/2015, à la volée après un discage superficiel de la parcelle. Les cultures choisies correspondent à la vesce pour la légumineuse et l'avoine pour la céréale.

Les densités de semis correspondent à : 100 kg / ha pour la vesce en monoculture et 2.5Kg/144m²(bloc), 100 kg /ha pour l'avoine en monoculture et 2.5Kg/144m²(bloc), 40kg /ha pour la vesce en association et 1Kg /144 m² avec l'avoine et 60 kg/ ha pour l'avoine en association avec la vesce 1.5Kg/144m² (A.S.D., 2011).

Le terrain présente des conditions hétérogènes dues à la présence d'une légère pente de 15%. Le dispositif mis en place est constitué d'un ensemble d'arbres (figure12) qui forment des lignes et des colonnes, chaque objet ou traitement est présenté une ou plusieurs fois dans chaque ligne et chaque colonne, avec quatre répétitions pour chaque traitement.

Ces traitements sont ;

Parcelle 1 : Association (vesce/ avoine/olivier)

Parcelle 2 : Olivier en monoculture

Parcelle 3 : Association (vesce/olivier)

Parcelle 4 : Association (avoine, olivier)

Parcelle 5 : Olivier en monoculture

Parcelle 6 : Association (vesce/olivier)

Parcelle 7 : Association (avoine, olivier)

Parcelle 8 : Association (vesce/ avoine/olivier)

Parcelle 9 : Association (vesce/ avoine/olivier)

Parcelle 10 : Association (vesce/olivier)

Parcelle 11 : Olivier en monoculture

Parcelle 12 : Association (avoine, olivier)

Parcelle 13 : Association (avoine, olivier)

Parcelle 14 : Association (vesce/ avoine/olivier)

Parcelle 15 : Association (vesce/olivier)

Parcelle 16 : Olivier en monoculture

Tableau 6: la répartition des traitements dans la parcelle suivant le dispositif de l'Aléatoire complet.

A	C	B	D
C	A	A	A
D	D	D	B
B	B	C	C

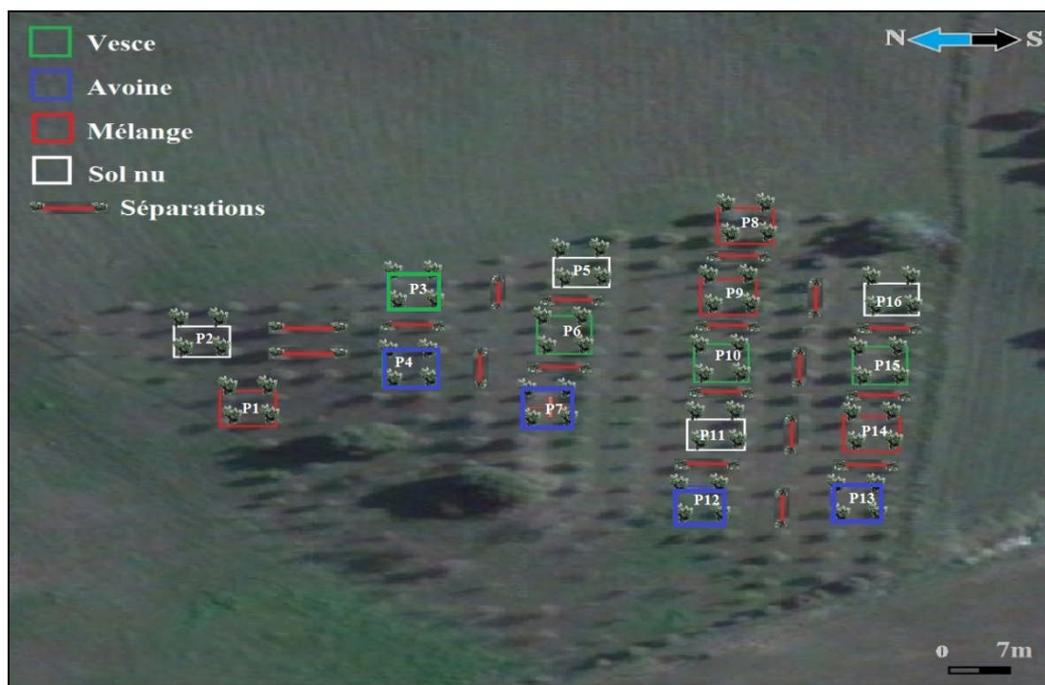


Figure12 : Dispositif expérimental sur le terrain

4. Ouverture d'un profil pédologique

Un profil de sol d'un mètre de profondeur a été ouvert. L'étude de ce profil est un complément très utile, car il permet d'observer de nombreuses caractéristiques de sol tel que la structure, l'enracinement, l'activité biologique, la porosité, les éléments grossiers.

5. Echantillonnage des sols

L'échantillonnage des sols est réalisé à une profondeur de 10 cm à l'aide d'une tarière et suivant les points d'échantillonnages hors couvert, sous couvert de l'olivier (figure 13), prairie et blé. Des échantillons de sol sont également prélevés sur les deux horizons du profil.

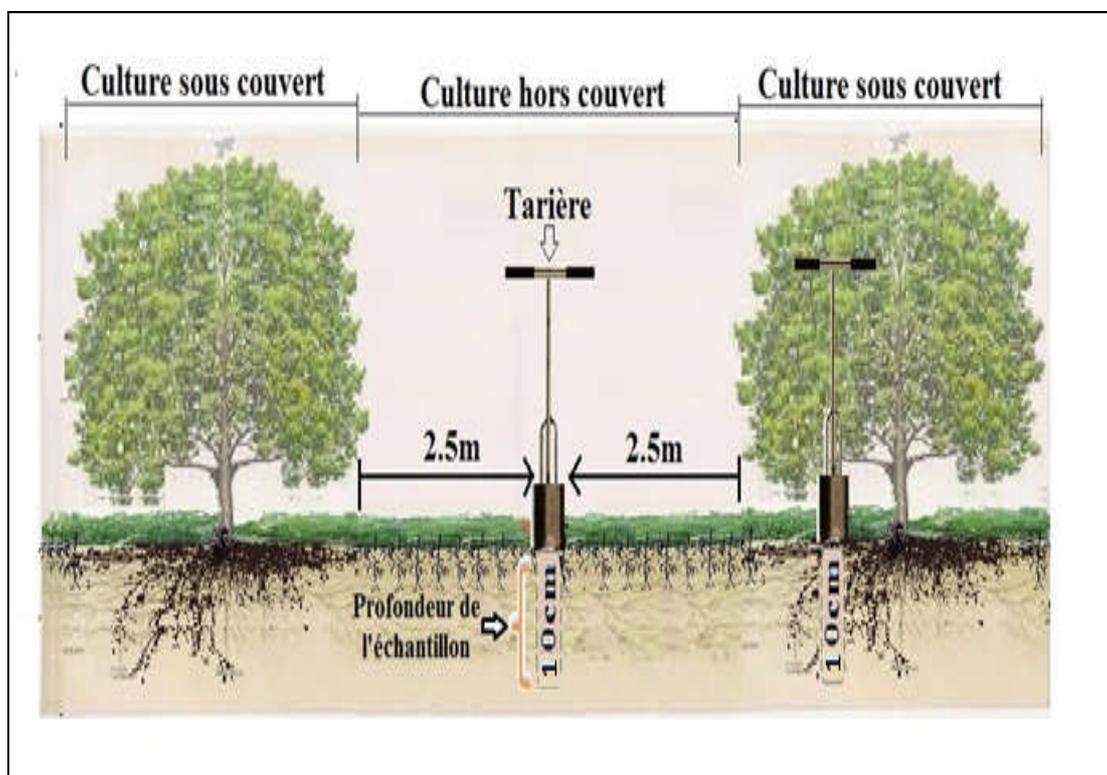


Figure13 : présentation du sol sous couvert et hors couvert échantillonné sur la parcelle d'étude

6. Analyse des sols

Les échantillons des sols prélevés ont été séchés à l'air libre durant quelques jours (figure 14). Ensuite ils ont été broyés et passés à travers un tamis à mailles de 2 mm et conservés dans un endroit sec. Les sols sont soumis aux analyses de sol.



Figure14 : séchage des sols échantillonnés (Gx1)

6.1. les analyses physiques et chimiques

6.1.1. La granulométrie

La granulométrie est déterminée par la méthode internationale de la pipette de ROBINSON. La texture est déterminée à l'aide du triangle des textures du G.E.P.P.A.Elle a porté sur les horizons de sol.

6.1.2. La densité

La densité apparente est réalisée par la méthode du cylindre (Figure 15). Elle a porté sur les horizons de sol.

6.1.3. Le pH

Le pH est mesuré sur la terre avec un ratio de 1/5 à l'aide d'un pH mètre. La mesure a porté sur les horizons de sol du profil.

6.1.4. Le calcaire total

Le calcaire total est mesuré selon la méthode volumétrique. La mesure du calcaire total a porté sur les horizons de sol du profil.



Figure 15: Mesure de la densité apparente par la méthode du cylindre

6.1.5. Carbone actif et stable du sol

La mesure du carbone actif et stable a été réalisée selon la méthode préconisée par le laboratoire de biologie de l'INRA DE Versailles (Anonyme5)

6.1.5.1. Séparation des fractions de terre

Agiter 50 g de terre séchée avec 250 ml d'hexamétaphosphate de sodium à 1 g/l et à l'aide de billes d'agate pendant 3 heures. Tamiser avec un tamis de 50 μm sous eau (figure 16).



Figure16 : tamisage et séparation des 2 fractions de sol (fractions $<50\mu\text{m}$, fractions $>50\mu\text{m}$).

Deux fractions de terre sont obtenues (figure 17), la première de granulométrie inférieure à $50\mu\text{m}$ dont le carbone correspond au carbone actif, la seconde dont le carbone correspond au carbone stable. Laisser sécher les fractions à 40°C , puis les peser pour déterminer leur répartition dans le sol. Après pesée, les fractions de sol sont broyées pour le dosage du carbone. Ainsi l'analyse subdivise la matière organique en 2 compartiments :

- Fractions $<50\mu\text{m}$ (carbone actif),
- Fractions $>50\mu\text{m}$ (carbone stable),

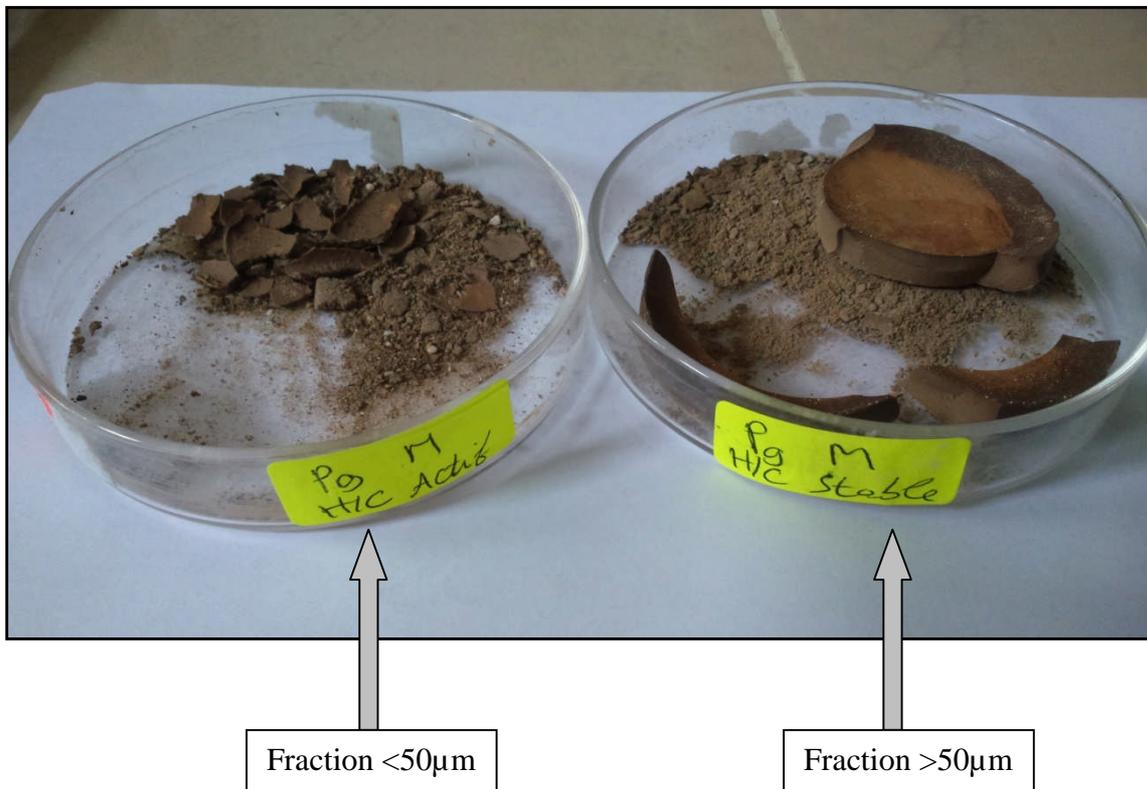


Figure 17 : les deux fractions de carbone obtenues après tamisage et séchage

6.1.5.2. Dosage du carbone du sol

Le dosage du carbone s'est fait par la méthode de Black

Elle est réalisée selon les étapes suivantes

Mettre 0,5 g de sol dans un Erlenmeyer, ajouter 10 ml de bichromate de potassium (8%) avec 15 ml d'acide sulfurique concentré, sont portés à ébullition pendant 5 mn sur une plaque chauffante. Après refroidissement, la suspension est transvasée dans une fiole de 100ml, ramené au trait de jauge. Un prélèvement de 20 ml de la solution est réalisé auquel

sont rajoutés 100 ml d'eau distillée ainsi que 3 gouttes de diphénylamine et une pincée de Naf. Cette solution est titrée avec du sel de Mohr jusqu'à ce que la solution vire de la couleur violette à la couleur verte.

Un témoin est réalisé dans les mêmes conditions que l'échantillon, mais sans sol. La teneur en carbone organique est exprimée en % (g / 100g) de terre séchée.

On donne généralement un chiffre significatif après la virgule.

$$\% \text{ carbone organique} = (V_t - V_e) * 0,615/0.5$$

V_t : volume de témoin ; V_e : volume de l'échantillon utilisé

Il est possible de convertir la quantité de Corg obtenue en teneur de matière organique à l'aide d'un facteur correctif. En général, on admet que :

$$\text{Matière Organique ou MO (\%)} = \text{Corg (\%)} * 1.72$$



Figure 18 : dosage du carbone

7. Echantillonnage de la végétation

L'échantillonnage du végétal a porté sur les 16 parcelles avec deux variantes sous couvert et hors couvert du dispositif expérimental. Le relevé floristique a porté sur une surface de 1 m² (figure 19). Au niveau de la prairie, 4 relevés ont été effectués, par contre au niveau du dispositif expérimental un seul relevé par traitement a été réalisé. Chaque relevé a consisté en une identification de toutes les espèces ainsi que leur dénombrement.



Figure 19 : Echantillonnage de la végétation

7.1. Indice de Shannon

L'indice de Shannon (Shannon, 1948 ; Shannon et Weaver, 1963), aussi appelé indice de Shannon-Weaver ou Shannon-Wiener.

$$H' = -\sum p_i \log_2 p_i$$

H' : indice de biodiversité de Shannon

i : une espèce du milieu d'étude

p_i : Proportion d'une espèce i par rapport au nombre total d'espèces (S) dans le milieu d'étude (ou richesse spécifique du milieu), qui se calcule de la façon suivante :

$$p(i) = n_i/N$$

Où n_i est le nombre d'individus pour l'espèce i et N est l'effectif total (les individus de toutes les espèces).

L'indice de Shannon doit être associé à l'indice de Simpson.

7.2. Indice de Simpson

L'indice de Simpson est une formule permettant de calculer une probabilité, soit la probabilité que deux individus sélectionnés aléatoirement dans un milieu donné soient de la même espèce.

$$D = \sum Ni (Ni-1)/N (N-1)$$

D : Indice de Simpson

Ni : nombre d'individus de l'espèce donnée.

N : nombre total d'individus.

L'indice variera entre 0 et 1. Plus il se rapproche de 0, plus les chances d'obtenir des individus d'espèces différentes sont élevées.

8. L'analyse statistique

Le traitement des résultats a été réalisé en utilisant le logiciel STAT-BOX. Tous les résultats obtenus ont été soumis à l'analyse de la variance. Le Test de Newman-Keuls permet la détermination des groupes homogènes, lorsque les différences entre les moyennes sont significatives. L'interprétation des résultats de nos analyses s'est fait selon les seuils de probabilités suivants (Dagnelli, 1986).

Probabilité supérieure à 0,05 : Différences non significatives (N.S.)

Probabilité inférieure ou égale à 0,05 : Différences significatives (S.)

Probabilité inférieure ou égale à 0,01 : Différences hautement significatives (H.S.)

Probabilité inférieure ou égale à 0,001 : Différences très hautement significatives (T.H.S.)

Chapitre III : Résultats et discussion

1. Description du profil pédologique

Le profil a été ouvert le 03 avril 2016, soit environ 4 mois après le semis (28 novembre 2015) dans les conditions suivantes :

L'environnement du profil présente les caractéristiques suivantes :

- temps ensoleillé, température ambiante d'environ 25°C.
- Couvert végétal : Olivier (*Olea Europea*) variété Chamlal / Avoine / Vesce / Adventices.
- Pente : 10%.
- Roche mère : Marnes.
- Erosion ; pas de traces visibles.
- Activités anthropiques : léger griffage en 2015.
- Bon drainage.

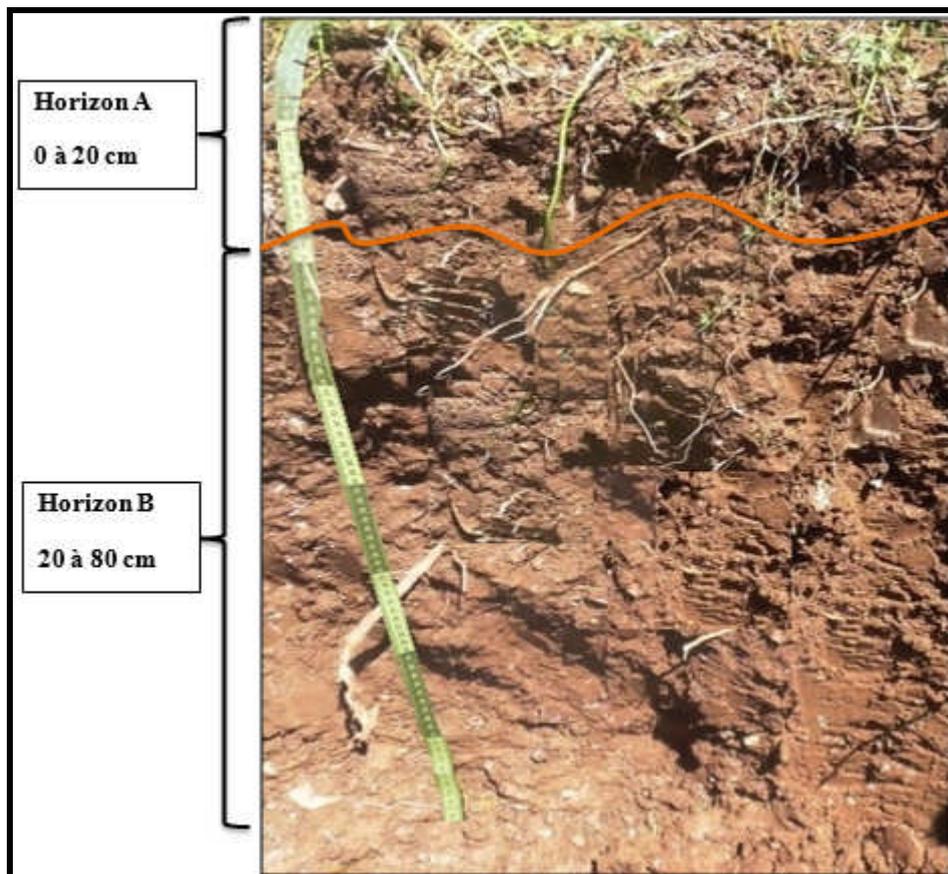


Figure 20 : Photographie du profil pédologique.

Le profil présente deux horizons, horizon A de (0 à 20 cm) et l'horizon B de (20 à 80 cm).

a- Caractéristiques morphologiques des horizons

❖ Horizon A : de 0 à 20 cm

De couleur 7.5 YR/3/2, texture limono-argileuse, structure polyédrique sub-anguleuse (agrégats solides) frais, traversée par un réseau racinaire important, porosité moyenne, absence de taches d'oxydo-réduction. Le test HCl indique une présence moyenne de calcaire CaCO₃ 10 à 25%. Réaction significative au test du H₂O₂ ce qui indique une bonne activité biologique. Limite irrégulière et diffuse.

❖ Horizon B : de 20 à 80 cm

De couleur 7.5 YR/3/2, texture limono-argileuse, structure polyédrique sub-anguleuse, frais, présence de grosses racines, faible porosité, absence de taches d'oxydo-réduction. Le test HCl indique une présence moyenne de calcaire CaCO₃ 10 à 25%. Réaction moyenne au test du H₂O₂ ce qui indique une activité biologique moyenne.

b- Propriétés physiques et chimiques du sol

Les résultats des analyses physico-chimiques sont mentionnés dans le tableau 7 :

Tableau 7 : Résultats des analyses physico-chimiques du sol de la parcelle expérimentale.

Horizon (cm)	A%	LF%	LG%	Texture	da (g/cm ³)	C %	CaCo ₃ %	pH
0 à 20	24	42.5	24.08	LA	1.16	13.99	18.75	8.24
20 à 60	23	51.5	12.25	LA	1.23	9.35	12.5	8.11

c- Le sol de la station d'étude

D'après l'observation du profil pédologique sur le terrain et les analyse physico-chimiques (tableau 7), le sol de la station d'étude est un sol peu différencié, présentant deux horizons (A « de 0 à 20 cm » et B « de 20 à 80 cm»). Il est profond, plus de 80 cm. C'est un sol modérément calcaire, à texture limono-argileuse, à pH moyennement alcalin, peu pourvu en matière organique, 24.06‰ sur 0 à 20 cm et 16.08‰ sur 20 à 80 cm ; La densité apparente augmente en profondeur, 1.16 g/cm³ pour l'horizon A et 1.23 g/cm³ pour l'horizon B. Ce sol est donc un Cambisol calcaric selon la WRB (2006).

2. Biodiversité végétale

Un exemple de calcul de l'indice de Shannon et Weaver et de Simpson est présenté au niveau des tableaux 8 a et 8b. Les Indices de Shannon et Weaver, de Simpson sont présentés au niveau du tableau 9 (Eric Marcon et *al.*,)

Tableau 8a : exemple de calcul de l'indice de Shannon et Weaver pour la prairie.

Prairie				
Espèce	Nombre de plante	Proportion Pi	Carré de Pi	-Pi*log2(Pi)
<i>Lathyrus ochrus</i>	13	0,110	0,012	0,351
Espèce 2	7	0,059	0,004	0,242
<i>Neslia paniculata</i>	10	0,085	0,007	0,302
<i>Melilotus sp</i>	10	0,085	0,007	0,302
Espèce 5	9	0,076	0,006	0,283
<i>Trifolium sp</i>	5	0,042	0,002	0,193
<i>Scandix pectenvenensis</i>	18	0,153	0,023	0,414
Espèce 8	18	0,153	0,023	0,414
<i>Sonchus olesaceus</i>	10	0,085	0,007	0,302
Espèce 10	18	0,153	0,023	0,414
Total	118			H=3,125

Formule de calcul de l'indice de Shannon et Weaver

$$H' = - \sum p(i) \log_2 p(i)$$

H' : indice de biodiversité de Shannon

i : une espèce du milieu d'étude

P_i : Proportion d'une espèce i par rapport au nombre total d'espèces (S) dans le milieu d'étude (ou richesse spécifique du milieu), qui se calcule de la façon suivante :

$$P(i) = n_i / N$$

Où n_i est le nombre d'individus pour l'espèce i et N est l'effectif total (les individus de toutes les espèces).

Exemple de calcul pour l'espèce : *Lathyrus ochrus*

$$P_i = n_i/N$$

$$N_i = 13 ; N = 118$$

$$P_i = 13/118 = 0.110$$

$$-P_i \cdot \log_2(P_i)$$

$$\log_2(P_i) = \ln(P_i)/\ln 2 = \ln 0.110/\ln 2 = -2,207/0.69 = -3,2$$

$$-P_i \cdot \log_2(P_i) = (-0.110) \cdot (-3,2) = 0,351$$

Pour le calcul de H : l'indice de Shannon est égal à la somme de tous les $-P_i \cdot \log_2(P_i)$ de chaque espèce. Plus H s'approche de 0 plus le milieu présente une faible biodiversité.

Tableau 8b : exemple de calcul de l'indice de Simpson pour la prairie

Prairie		
Espèce	Nombre de plante	$N_i \cdot (N_i - 1)$
<i>Lathyrus ochrus</i>	13	156,00
Espèce 2	7	42,00
<i>Neslia paniculata</i>	10	90,00
<i>Melilotus sp</i>	10	90,00
Espèce 5	9	72,00
<i>Trifolium sp</i>	5	20,00
<i>Scandix pectenvenaris</i>	18	306,00
Espèce 8	18	306,00
<i>Sonchus olesaceus</i>	10	90,00
Espèce 10	18	306,00
Total	118	13806,00
		D = 0,107

Formule de calcul de l'indice de Simpson :

$$D = \sum N_i (N_i - 1) / N (N - 1)$$

Exemple de calcul pour l'espèce : *Lathyrus ochrus*

D : Indice de Simpson

Ni : nombre d'individus de l'espèce donnée.

N : nombre total d'individus.

Ni= 13 ; N=118

Pour le calcul de D : l'indice de Simpson est égal à la somme de tous les $N_i(N_i-1)/N(N-1)$ de chaque espèce. Plus D s'approche de 0 plus le milieu présente une forte biodiversité.

Tableau 9 : Indices de Shannon et Weaver et l'indice de Simpson

Végétation	Indice de Shannon-Weaver	Indice de Simpson
olivier mono spécifique sous couvert	3,14	0,12
Olivier mono spécifique hors couvert	2,95	0,16
Prairie	2,88	0,17
Avoine hors couvert	2,75	0,16
Avoine sous couvert	1,85	0,44
Mélange hors couvert	1,73	0,68
Mélange sous couvert	1,09	0,53
Vesce sous couvert	1,05	0,68
Vesce hors couvert	0,80	0,78

➤ Indice de Shannon-Weaver

L'indice de Shannon-Weaver variait de 3,14 pour l'association olivier/vesce/avoine sous couvert et vesce hors couvert à 2,947 pour l'association olivier en mono spécifique hors couvert. Pour ce qui est de la prairie, l'indice de Shannon-Weaver était de 2.88.

L'indice de Shannon-Weaver pour l'olivier en mono-spécifique sous couvert est supérieur à l'indice de Shannon-Weaver de l'olivier en mono-spécifique hors couvert.

La prairie qui présente une biodiversité relativement élevée d'une valeur de 2,88 comparée à la vesce qui varie de 1,047 en sous couvert et 0,797 en hors couvert, due à un développement plus important de la vesce.

L'indice de Shannon-Weaver pour la culture de blé n'a pas été calculé car il y a présence d'une seule espèce végétale.

La forte biodiversité des parcelles semée en avoine est due au fort développement des herbacées qui ont envahis la parcelle.

L'indice de Shannon-Weaver de la Vesce variait de 0.78 en hors couvert et de 1.04 en sous couvert végétal. En effet le griffage a provoqué une minéralisation importante de la matière organique, donc un enrichissement en nitrates du sol qui semblerait avoir profité aux herbacées.

Pour ce qui est du blé, l'utilisation de désherbant, la fréquence des labours ont empêché le développement des adventices.

➤ **Indice de Simpson**

L'indice de Simpson pour les milieux olivier mono-spécifiques (sous couvert et hors couvert), l'avoine hors couvert et la prairie variait respectivement de 0,12 ; 0,16 ; 0,16 ; 0,17 et ce qui indique qu'il y a une forte biodiversité.

L'indice de Simpson pour les milieux avoine sous couvert, association avoine /vesce /olivier sous couvert et hors couvert, vesce sous couvert et hors couvert variait respectivement de 0,44 ; 0,53 ; 0,68 ; 0,68 et 0,78, ce qui indique une faible biodiversité.

L'indice variera entre 0 et 1. Plus il se rapproche de 0, plus les chances d'obtenir des individus d'espèces différentes sont élevées.

3. Carbone du sol

Les résultats du carbone actif et du carbone stable du sol sont présentés au niveau du tableau 10.

Tableau 10 : Les résultats du carbone actif et carbone stable du sol exprimé en g/100g de terre

Végétation	%C actif	%C stable	%C total
Olivier monoculture sous couvert	0,7	0,83	1,53
Olivier monoculture hors couvert	0,57	0,97	1,53
Prairie	0,27	0,6	0,87
Avoine hors couvert	0,54	0,89	1,5
Avoine sous couvert	0,6	0,76	1,36
Mélange hors couvert	0,6	0,81	1,41
Mélange sous couvert	0,79	0,81	1,6
Vesce sous couvert	0,73	0,85	1,58
Vesce hors couvert	0,67	1,04	1,53
Blé	0,23	0,19	0,42

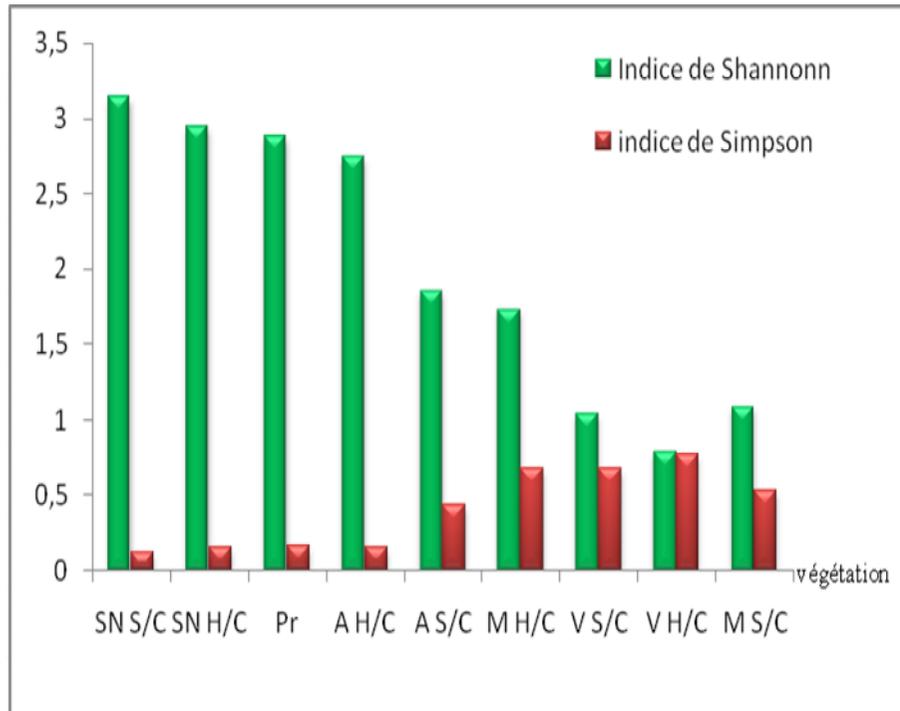


Figure 21 : mesure de la biodiversité par l'indice de Shannon- Weaver et l'indice de Simpson

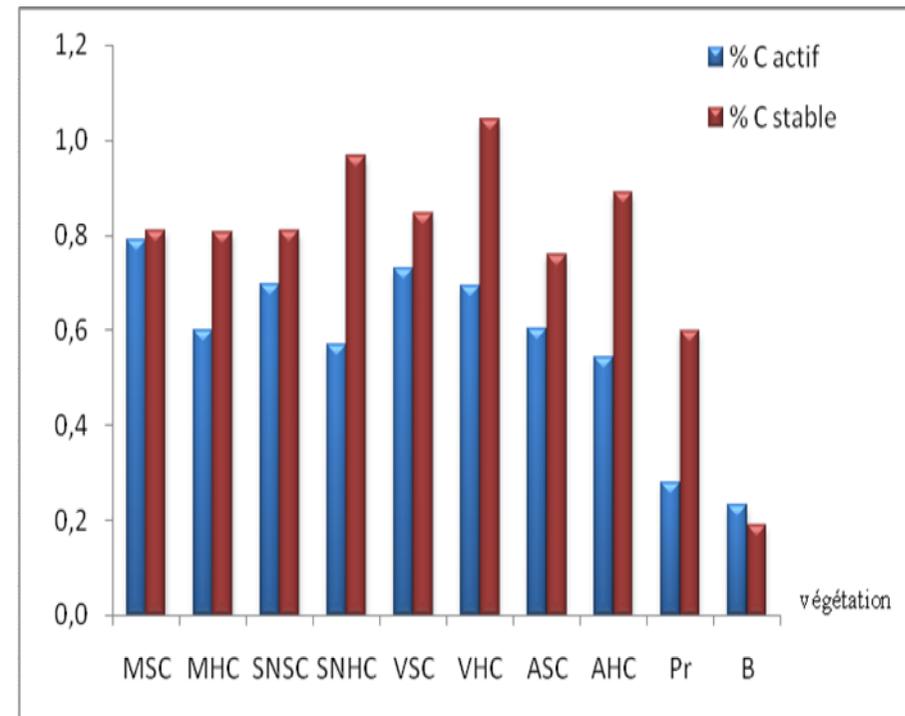


Figure 22 : teneurs en carbone des sols

3-1- Carbone actif du sol

Le sol de l'association de culture olivier/vesce/avoine sous couvert végétal est le plus riche en carbone actif avec une teneur de 0,79 % et d'une teneur de 0,6% en hors couvert végétal. Le carbone actif du sol sous prairie est de 0,27% et le sol sous blé qui présente la teneur en carbone actif la plus faible est de 0,23%. Le carbone actif du sol sous l'avoine sous couvert est de 0,6% et de 0,54% en hors couvert végétal, le sol sous vesce sous couvert présente la teneur en carbone actif 0,73% et une teneur de 0,69% en hors couvert. Le carbone actif du sol sous l'olivier en mono-spécifique sous couvert est de 0,70% et de 0,57% en hors couvert (Salari Nik et *al.*, 2015).

3-2- Carbone stable du sol

Le sol sous vesce sous couvert est le plus riche en carbone stable avec une teneur de 0,85% en sous couvert végétal et une teneur de 1,04 % en hors couvert végétal. Le sol de l'association de culture olivier/vesce/avoine sous couvert et hors couvert végétal présente une même teneur de carbone stable est de 0,81 %. Le carbone stable du sol sous l'olivier en mono-spécifique sous couvert est de 0,83% et de 0,97 % en hors couvert végétal. Le carbone stable du sol sous l'avoine sous couvert est de 0,76% et de 0,89% en hors couvert végétal. Le carbone stable du sol sous prairie est de 0,6% et le sol sous blé qui présente la teneur en carbone stable la plus faible est de 0,19% (Salari Nik et *al.*, 2015).

L'analyse statistique révèle une différence très hautement significative des taux de carbone entre les différents types de la végétation ($P= 0,00054$), ces taux varient selon la végétation.

Le test de Newman-Keuls a classé les différents types de végétation en différents groupes homogènes (tableau 11, figure 23)

Les sols sous avoine/ vesce/ olivier sous couvert, vesce sous couvert, olivier en monoculture sous couvert et vesce hors couvert appartiennent au même groupe homogène A, possèdent les mêmes taux de carbone. L'avoine sous couvert, avoine/ vesce/ olivier hors couvert, olivier en monoculture hors couvert et avoine hors couvert appartiennent au groupe de transition A et B. La prairie appartient au groupe de transition B et C. Le blé appartient au groupe C, il représente la valeur significativement la plus faible.

L'analyse statistique révèle une différence très hautement significative des taux de carbone entre les différents types de la végétation ($P= 0,00013$).

Le Carbone stable est significativement similaire sur tous les types de végétation, ils appartiennent au même groupe A excepté pour le blé qui appartient au groupe B (tableau 12, figure 24).

Le taux de carbone stable pour tous les sols est supérieur au taux de carbone actif (tableau 13).

Tableau 11 : Test de Newman-Keuls pour le carbone actif.

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES		
1.0	Avoine/ vesce/ olivier S/C	0,79	A		
5.0	Vesce S/C	0,73	A		
3.0	Olivier en monoculture S/C	0,7	A		
6.0	Vesce H/C	0,693	A		
7.0	Avoine S/C	0,602	A	B	
2.0	Avoine/ vesce/ olivier H/C	0,6	A	B	
4.0	Olivier en monoculture H/C	0,568	A	B	
8.0	Avoine H/C	0,543	A	B	
10.0	Prairie	0,275		B	C
9.0	Blé	0,223			C

Tableau 12 : Test de Newman-Keuls pour le carbone stable

F1	LIBELLES	MOYENNE S	GROUPES HOMOGENES	
6.0	Vesce H/C	1,043	A	
4.0	Olivier monoculture/C	0,965	A	
8.0	Avoine H/C	0,89	A	
5.0	Vesce S/C	0,848	A	
3.0	Olivier monoculture S/C	0,825	A	
1.0	Avoine/ vesce/ olivier S/C	0,808	A	
2.0	Avoine/ vesce/ olivier H/C	0,805	A	
7.0	AVOINE S/C	0,758	A	
10.0	Prairie	0,6	A	
9.0	Blé	0,185		B

Tableau 13 : Test de Newman- Keuls ; comparaison entre le carbone stable et le carbone actif

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES	
2.0	CS	0.772	A	
1.0	CA	0.572		B

De façon générale le taux de carbone stable est significativement élevé par rapport au taux de carbone actif (figure 25)

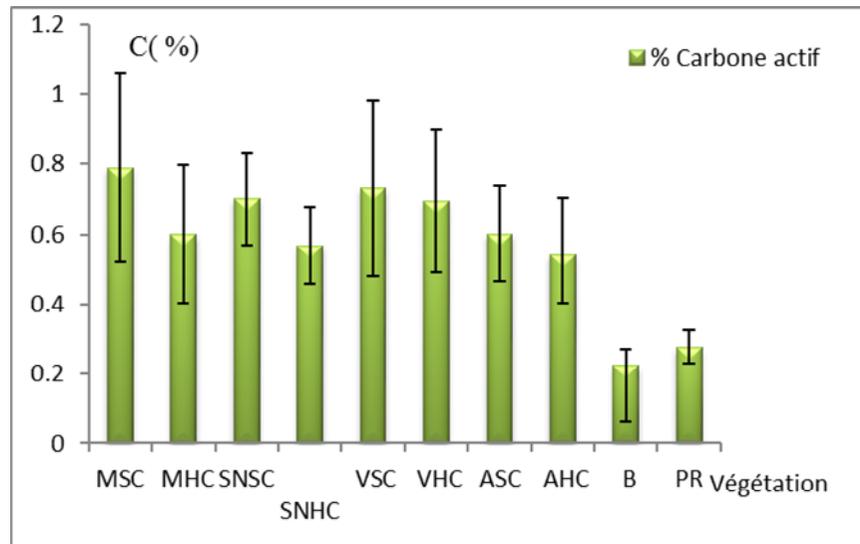


Figure 23 : variation du carbone actif en fonction de la végétation

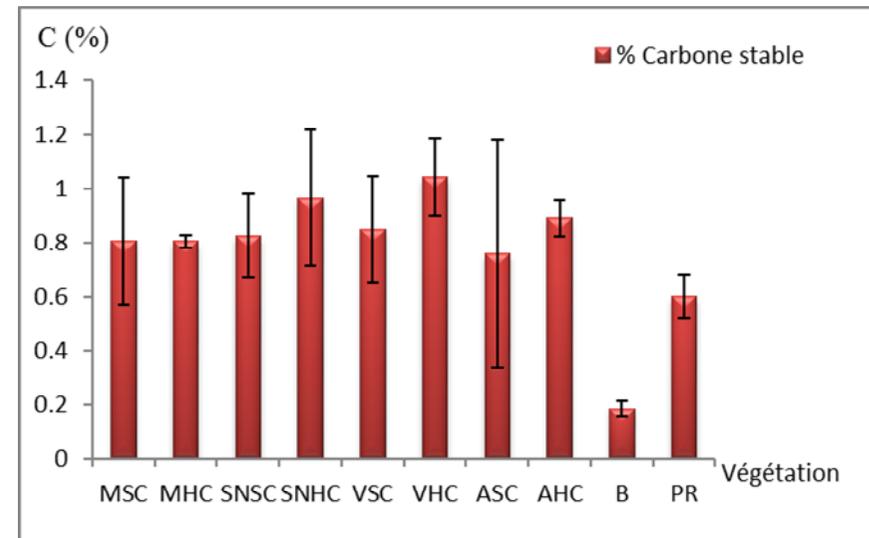


Figure 24 : variation du carbone stable en fonction de la végétation

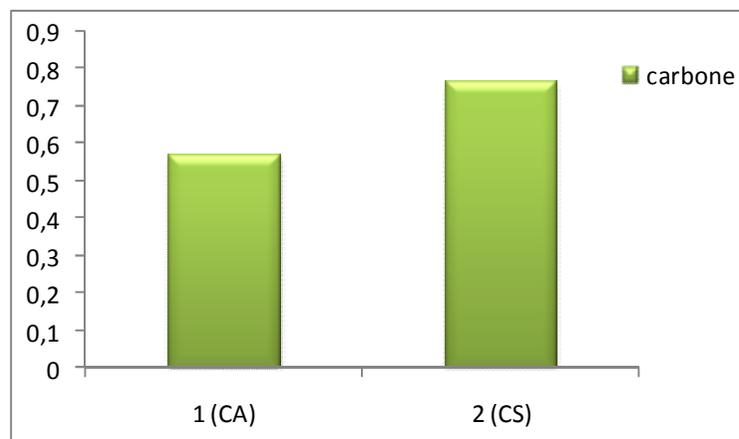


Figure 25 : taux de carbone actif et stable

Discussion

La teneur en carbone actif et stable du sol sous la prairie est très faible malgré une forte biodiversité. La prairie par sa biodiversité plus élevée fournit la quantité la plus importante de matière organique fraîche (résidus, litière racinaire) comparativement aux autres types de végétation. On aurait dû s'attendre à des teneurs de carbone organique plus élevées sous olivier, ce qui n'est pas le cas, l'olivieraie à l'instar du champ de blé a subi plusieurs labours qui ont dilué la matière organique du sol et augmenter sa minéralisation.

Soussana *et al.*, (2004) ont montré que la présence d'un couvert permanent assure des entrées de carbone au sol importantes, particulièrement par voie racinaire (racines mortes, rhizodépôts) et l'absence de perturbations par le travail du sol, ou sa faible fréquence en prairies temporaires, limite le déstockage par minéralisation des matières organiques. De même, Quideau *et al.*, (2001) ont montré que le type de végétation influence les stocks de carbone dans les sols (par la production de litière des feuilles et des racines) et la vitesse à laquelle se décomposent les composés organiques des différentes espèces.

La teneur en carbone actif et stable du sol sous blé est très faible car nous avons une très faible biodiversité (une seule espèce végétal), en particulier pour l'horizon de surface 0 à 10cm. Or, c'est la couche du sol où la prospection racinaire est la plus important. Les labours et les irrigations ont accéléré la minéralisation du carbone du sol. Cet appauvrissement en matière organique pourrait induire une instabilité des agrégats du sol. Sous l'effet des précipitations, la destruction de ces agrégats peut conduire à une formation de croute de battance, accentuée par la présence des limons dans la texture. Le sol de cette parcelle reste pendant une durée de l'année (une saison ou plus) sans couvert végétal, pour cela le risque de l'érosion reste ne pas à négliger.

Le carbone actif et stable sont plus élevés dans les parcelles influencés par la présence de l'olivier ; en mono-spécifique (olivier seul) ou en association Avoine/Vesce/Olivier sous couvert et hors couvert, cette richesse en carbone actif et en carbone stable est due à l'effet important de la litière des feuilles et des racines de l'olivier. Cet apport plus élevé de feuilles et de racines a augmenté la teneur en carbone organique dans le sol et qui alimente les pools de carbone. Cet effet est particulièrement important sur les horizons de surface.

L'élévation du taux de carbone actif dans le sol sous Vesce pourrait être du au fait que dans la culture vesce est considéré comme légumineuse enrichie le sol en azote atmosphérique fixé par les bactéries *Rhizobium* en association avec leurs racines, qui stimule l'activité des

microorganismes des sols qui sont responsables de la minéralisation de la matière organique du sol. En effet, Riman et *al.*, (2013), ont montré que la vesce stimule l'activité biologique des sols, améliorent et accélèrent la minéralisation de l'humus stable et assurent aussi une meilleure décomposition des débris végétaux.

Conclusion

Ce travail de recherche est mené sur l'effet de différents types de végétation, prairie naturelle, blé et association de culture céréale/légumineuse/olivier, sur la séquestration du carbone dans les sols vise notamment à caractériser ces différentes espèces de couverts végétaux et choisir celles la plus adaptés à notre étude :

- Le sol de la parcelle d'étude est un sol profond peu différencié, présentant deux horizons modérément calcaire, à texture limono-argileuse, à pH moyennement alcalin, moyennement pourvu en matière organique avec une densité apparente qui augmente en profondeur. Selon la WRB (2006) ce sol est un cambisol calcaric.

- La diversité spécifique a été évaluée par l'indice de Shannon-Weaver et l'indice de Simpson. L'indice de Shannon-Weaver variait de 1,05 (vesce sous couvert végétal) à 3,14 (olivier en mono spécifique sous couvert). La prairie a présenté un indice Shannon-Weaver de 2,88. L'indice de Simpson variait de 0,12 à 0,78. L'olivier en mono-spécifique et la prairie ont présenté des indices de Shannon-Weaver et de Simpson indicateurs d'une forte biodiversité.

- La teneur en carbone actif et en carbone stable des sols sous prairie est faible malgré une forte biodiversité. Le carbone actif et le carbone stable sont plus élevés dans les parcelles influencés par la présence de l'olivier en mono-spécifique (Olivier seul) ou en association (Avoine /vesce/Olivier sous couvert et hors couvert), cette richesse en carbone actif et en carbone stable est due à la litière de l'olivier qui alimente les pools de carbone. Toutefois, la richesse en biodiversité du couvert végétal intervient ; En effet, le cas du blé avec une teneur en carbone actif et stable la moins élevée, montre l'influence d'une biodiversité quasi nulle sur la séquestration du carbone.

Selon nos résultats, les taux de carbone organique des sols seraient plus liés à la présence de l'olivier plutôt qu'à la biodiversité du couvert végétal.

Comme perspective afin de compléter ce travail, il serait intéressant de :

- Fractionner le carbone des horizons de profondeur
- Evaluer le carbone apporté par le système racinaire et les résidus.

Références bibliographiques

Alexandratos, N. (ed.). 1995. World Agriculture towards 2010. FAO and John Wiley and Sons. 488 pp.

Angers, D.A., Chenu, C. 1998. Dynamics of soil aggregation and C sequestration. Chapter 14, pp.199–206 in: Lal, R., J.M. Kimble, R.A. Follett, and B.A. Stewart (eds.). Soil processes and the carbon cycle. CRC Press, Boca Raton, FL.

Anonyme 1 , la séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion de terres, Rapport sur les ressources en sols du monde 96

Anonyme 2 La biodiversité en Poitou-Charentes : Juin 2012, site www.le-cycle-du-carbone-Biodiversit_-en-Poitou-Charentes.htm

Anonyme 3, Chambre Régionale d'Agriculture Languedoc Roussillon, Les produits organiques utilisables en agriculture, site www.languedocroussillon.chambagri.fr

Anonyme 4, Le carbone organique des sols cultivés de Poitou-Charentes, Quantification et évolution des stocks, site <http://www.sols-et-territoires.org>

Anonyme 5 Les ruminants et le réchauffement climatique, Insitut de l'Elevage, collection Essentiel, 2008. Le rôle des prairies des puits de carbone Environnement et Ethique La viande.fr

Anonyme 6 sur site: <http://www.soin-de-la-terre.org/wp-content/uploads/Guide-pratique-Biologie-du-sol-Celesta-lab.pdf>

Armelle G, le stockage de carbone par les prairies Collection l'essentiel, l'institut de l'élevage, p 4,5

Balesdent, J. 1996. Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols de France. Etude et Gestion des sols 3 (4), in : la séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion de terres

Balesdent, J., Chenu, C., Balabane, M. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. Soil and Tillage Research 53: 215–220.

Bensid, Z, dynamique de la Matière Organique des Sols des Monts Forestiers du Bélézma, 2014 – 2015, université Hadj Lakhdar – Batna p 12,13

Brinkman, R., Sombroek, W.G. 1996. The effects of global change on soil conditions in relation to plant growth and food production. p 49–63. in Bazzaz F., W.G. Sombroek (eds.). Global Climate Change and Agricultural Production. FAO and Wiley, Chichester.

Brinkman et Sombroek,; Impacts potentiels 2000, la séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion de terres 1996

Cambardella, C. 1998. Experimental verification of simulated soil organic matter pools. p 519–526 in: Lal L., Kimble J.M., Follett R.A., Stewart B.A.(eds.). Soil processes and the carbon cycle. CRC Press, Boca Raton FL.

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

Crow, S., K. Wieder, (2005). Sources of CO₂ Emission from a Northern Peatland : Root Respiration, Exudation, and Decomposition. Ecology. Vol.86 (7) :1825-1834, in: : la séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion de terres

Davidson, E., I. Janssens, (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. Nature vol. 440 :165-173.

Eric Marcon, mesure de la biodiversité. 28/09/2010, unité mixte de recherche p23

Eurasion Journal of Soil Science, site http://fess.org/eurasion_journal_of_soil_sience.asp

Feller, C. 1979. Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols: application aux sols tropicaux à texture grossière, très pauvres en humus. Cahiers ORSTOM, série Pédologie 17: in : la séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion de terres

Fortin, J.A., M. Chapleau and M. Couture, 1982. Décomposition de la matière organique et compostage de surface: une revue de la littérature. Département d'écologie et de pédologie,

GIEC (2013). The Carbon Cycle and the Climate System. Sur le site IPCC.com consulté le 20 février 2013. Site : http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch7s7-3.html

Gobat Aragnomathéy, Le sol vivant, bases de pédologie- Biologie des sols, 3^e édition revue augmentée, p 489.

Golchin, A., Oades, J.M., Skjemstad, J.O., Clarke, P. 1994. Soil structure and carbon cycling. Aust. J. Sci. Res. 32: 1043–68.

Gregorich, E.G., Drury, C.F., Ellert, B.H., Liang, B.C. 1996. Fertilization effects on physically protected light fraction organic matter. Soil Sci Soc Am J 60, in: la séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion de terres

Hopkins, WG. (2003). *Physiologie végétale* deuxième édition. De Boeck & Larciens. a. 514 pages.

Jones, DL., C. Nguyen, RD. Finlay, (2008). Carbon flow in the rhizosphere: carbon trading at the soil–root interface. *Plant and Soil* 321(1): 5-33.

Kell, DB. (2011). Breeding crop plants with deep roots : their role in sustainable carbon, nutrient and water sequestration. *Annals of Botany* 108 :407-418.

Lemaître, A., R. Chaussod, Y. Tavant and S. Bruckert, 1995. An attempt to determine a pool of labile organic matter associated with soil microbial biomass. *Eur. J. Soil Biol.* 31: 121 – 125.

Marschner, P. (2012). *Mineral Nutrition of Higher Plants* 3ieme édition. Academic Press Etats-Unis 672 pages

Philippot, L., S. Hallin, G. Borjesson, EM. Baggs, (2008). Biochemical cycling in the rhizosphere having an impact on global change. *Plant and Soil* 321(1): 61-81.

Poss, R. 1991. Transferts de l'eau et des éléments chimiques dans les terres de barre du Togo. Thèse Univ. Paris VI. Editions ORSTOM in: la séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion de terres

Puget, P., Chenu, C., Balesdent, J. 1995. Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils. *European Journal of Soil Science* 46

Robert, M. 1996a. Aluminum toxicity a major stress for microbes in the environment. p 227–242 in: Huang, P.M. et al., (eds.). *Environmental Impacts*. Vol. 2, Soil component interactions. CRC press.

Robert, M., Chenu, C. 1991. Interactions between soil minerals and microorganisms. p 307–393 in: *Soil Biochemistry* 7. Bollag, J.M., Stotzky, G. (eds.). Marcel Dekker, New York..

Rytter, RM. (2012). The potential of willow and poplar plantations as carbon sinks in Sweden. *Biomass and Bioenergy* 36 :86-95.

Sanchez, P.A., Salinas, I.G. 1982. Low-input technology for managing oxisols and ultisols in tropical America. *Adv. Agron.* 34 in: la séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion de terres

SMITH et al. 1995. In *Etude biologique de la matière organique du sol*, iguelouzenesamir, UMMTO, 2005

Sombroek, W.G., Nachtergaele, F.O. Hebel, A. 1993. Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. *Ambio* 22: 417–426.

Sundermeier, A., R. Reeder, R. Lal, (2004). SoilCarbonSequestration – Fundamentals. sur le site Ohio State University, consulté le 26 mars 2012, site : <http://www.ohioline.osu.edu/aex-fact/pdf/0510.pdf>

Tisdall, J.M., Oades, J.M. 1982. Organic matter and water stable aggregates. *J. SoilSci.* 33: in : la séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion de terres

Les annexes

Annexe 1 : Les valeurs de la densité apparente

Profondeur (cm)	Poids frais 1 (g)	Poids sec 1 (g)	Poids frais 2 (g)	Poids sec 2 (g)	Poids frais 3 (g)	Poids sec 3 (g)	Da=M/V
De 0 à 5 cm	106.85	88.58	113.73	94.94	122.19	100.68	0.965
De 5 à 10 cm	152.32	126.4	157.97	131.61	137.42	113.78	1.263
De 10 à 20 cm	135.63	133.85	159.96	112.06	120.29	122.95	1.253
De 20 à 40cm	135.76	110.09	152.66	125.7	120.29	99.24	1.138
De 40 à 60 cm	161.77	128.72	168.51	136.55	155.45	124.15	1.323

Annexe2 : Normes d'interprétation de la réaction du sol (pH)

Valeur pH	Qualification
<4,5	Extrêmement acide
4.6 à 5	Très fortement acide
5,1 à 5,5	Fortement acide
5,6 à 6,75	Faiblement acide
6,75 à 7,3	Neutre
7,4 à 7,8	Légèrement alcalin
7,9 à 8,4	Moyennement alcalin
8,5 à 9	Fortement alcalin
>9,1	Très fortement alcalin

Annexe3 : Normes d'appréciation du calcaire total du sol

CaCO ₃ %	Qualification du sol
5 à 12,5	Faiblement calcaire
12,5 à 25	Modérément calcaire
25 à 37,5	Assez fortement calcaire
37,5 à 50	Fortement calcaire
Plus de 50	Très fortement calcaire

Annexe4 : Normes pour la CEC en meq / 100 g du sol

CEC meq/100g de terre (acétate de NH₄⁺ et distillation)	Qualification du sol
5	Très Faible
5 à 10	Faible
10 à 25	Moyenne
25 à 40	Forte
Plus de 40	Très forte

Annexe5 : Norme de la conductivité électrique des sols.

CE (ds/m)	Niveau
0,1	Très faible
0,2	Faible à moyen
0,5	Moyen à élevé
0,5 à 1	Très élevé
>1	Très forte salinité

Annexe6 : Normes pour la matière organique

Taux d'argile en %	Taux souhaitable de matière organique en %
< 10	3 – 3,5
10 – 15	2,5 - 3
15 – 20	2 – 2,5
20 – 25	2,5
25 – 30	2,5 - 3
> 30	3 – 3,5

Annexe7 : Norme d'interprétation pour la matière organique.

M.O %	Niveau
0,7	Sol très pauvre
0,7 _ 1,5	Sol pauvre
1,5 _3,0	Sol moyennement pauvre
3,0 _ 6	Sol bien pourvu
6	Sol très bien pourvu

Annexe8 : Normes d'azote total du sol (KJELDAHL)

Azote total %	Qualification
<0,05	Très faible
0,05 – 0,09	Faible
0,1 – 0,15	Moyenne
>0,15	Elevé

Annexe 9 : tableau des masses et pourcentage de carbone des parcelles de l'olivier sous couvert

Parcelle sous couvert	Masse <50 µm (C actif)	Masse >50µm (C stable)	% carbone (C actif)	%carbone (C stable)	% carbone total/ 100g de terre	C actif/C total	C stable/C total
P1 M	6,6	38,34	0,47	1,05	1,52	0,31	0,69
P2 SN	8,47	37,31	0,59	1	1,59	0,37	0,63
P3 V	7,92	37,82	0,45	1,12	1,57	0,29	0,71
P4 A	8,62	36,77	0,47	0,20	0,67	0,70	0,93
P5 SN	13,11	32,35	0,67	0,7	1,37	0,49	0,51
P6 V	14,92	31,11	0,6	0,83	1,43	0,42	0,58
P7 A	13,73	33,77	0,75	1,22	1,97	0,38	0,62
P8 M	20,22	26,72	1,12	0,7	1,82	0,62	0,38
P9 M	18,53	27,8	0,74	0,53	1,27	0,58	0,42
P10 V	15,49	30,52	1	0,65	1,65	0,61	0,39
P11 SN	11,62	34,25	0,65	0,91	1,56	0,42	0,58
P12 A	11,46	34,52	0,69	0,83	2,85	0,71	0,29
P13 A	14,55	28,95	0,5	0,78	1,28	0,39	0,61
P14 M	14,11	31,84	0,83	0,95	2,2	0,38	0,62
P15 V	19,84	27,95	0,87	0,79	1,66	0,52	0,48
P16 SN	17,86	29	0,89	0,69	1,58	0,56	0,44

Annexe10: tableau des masses et pourcentage de carbone des parcelles de l'olivier hors couvert

Parcelle hors couvert	Masse <50 μm actif	Masse >50 μm stable	% carbone actif	% carbone stable	% carbone total/ 100g de terre	C actif/C total	C stable/C total
P1 M	7,81	39,22	0,39	0,82	1,21	0,32	0,68
P2 SN	10,40	36,85	0,46	1,34	1,80	0,26	0,74
P3 V	8,06	39,00	0,43	1,22	1,65	0,26	0,74
P4 A	9,68	37,36	0,41	0,88	1,29	0,32	0,68
P5 SN	13,29	33,82	0,61	0,88	1,49	0,41	0,59
P6 V	15,31	30,63	0,90	0,90	1,80	0,50	0,50
P7 A	13,83	32,83	0,66	0,94	1,60	0,41	0,59
P8 M	16,93	30,75	0,83	0,79	1,62	0,51	0,49
P9 M	15,88	32,56	0,49	0,83	1,32	0,37	0,63
P10 V	12,33	34,05	0,65	1,09	1,74	0,37	0,63
P11 SN	10,42	35,24	0,50	0,86	1,36	0,37	0,63
P12 A	10,91	35,58	0,40	0,94	1,34	0,30	0,70
P13 A	16,28	32,63	0,70	0,80	1,50	0,47	0,53
P14 M	13,61	32,65	0,69	0,78	1,47	0,47	0,53
P15 V	13,40	32,51	0,79	0,96	1,75	0,45	0,55
P16 SN	14,84	32,31	0,70	0,78	1,48	0,47	0,53

Annexe11: tableau des masses et pourcentage de carbone de la prairie et de la parcelle de blé

Parcelle	Masse < 50 μm	Masse > 50 μm	% C actif	%C stable	% C total/ 100g de terre	%C actif/ total	%C stable / total
Blé 1	18,12	31,35	0,18	0,16	0,34	0,53	0,47
Blé 2	22,22	26,94	0,28	0,2	0,48	0,58	0,42
Blé 3	29,77	19,26	0,24	0,22	0,46	0,52	0,48
Prairie 01	19,81	24,19	0,30	0,60	0,90	0,33	0,67
Prairie 02	20,12	20,03	0,30	0,50	0,80	0,38	0,63
Prairie 03	13,72	32,35	0,20	0,70	0,90	0,22	0,78

Annexe12: tableaux de la biodiversité

Prairie; site 01		
Espèce	Nom de l'espèce	Nombre de pied
Espèce 01	<i>Lathyrus ochrus</i>	13
Espèce 02	Espèce 02	7
Espèce 03	<i>Neslia paniculata</i>	10
Espèce 04	<i>Melilotus sp</i>	10
Espèce 05	Espèce 05	9
Espèce 06	<i>Trifolium sp</i>	5
Espèce 07	<i>Scandix pectenvenenis</i>	18
Espèce 08	Espèce 08	18
Espèce 09	<i>Sonchus olesaceus</i>	10
Espèce 10	Espèce 10	18
	Total	118

Prairie; site 03		
Espèce	Nom de l'espèce	Nombre de pied
Espèce 01	<i>Scandix pectenvenenis</i>	20
Espèce 02	<i>Plantago ofra</i>	14
Espèce 03	<i>Vicia sicula</i>	8
Espèce 04	<i>ormithogalum arabicum</i>	3
Espèce 05	<i>Neslia paniculata</i>	2
Espèce 06	Espèce 06	60
Espèce 07	Espèce 07	1
	Total	153

Prairie; site 04		
Espèce	Nom de l'espèce	Nombre de pied
Espèce 01	<i>Lathyrus ochrus</i>	28
Espèce 02	Espèce 02	10
Espèce 03	<i>neslia panicalata</i>	23 p
Espèce 04	Espèce 04	14
Espèce 05	<i>Medicago Sp</i>	6
Espèce 06	<i>Daucus carota</i>	2
Espèce 07	<i>scandix pectenvenenis (sulla)</i>	10
Espèce 08	<i>Centaurea pullata</i>	6
Espèce 09	Espèce 09	30
Espèce 10	<i>Yicia sicula</i>	7

Espèce 11	<i>bracécacée</i>	2
Espèce 12	<i>moutarde</i>	2
Espèce 13	Espèce 13	4
	Total	144

P3 vesce olivier, hrs couvert		
Espèce	Nom de l'espèce	Nombre de pied
Espèce 01	sulla	18
Espèce 02	vesce	350
Espèce 03	avoine	9
Espèce 04	moutarde	1
Espèce 05	lamier blanc	6
Espèce 06	masran	1
Espèce 07	convolvulus	3
Espèce 08	<i>trèfle</i>	1
Espèce 09	coqueliot	2
Espèce 10	liseron	7
	Total	398

P3 vesce olivier , sous couvert		
Espèce	Nom de l'espèce	Nombre de pied
Espèce 01	olivier	1
Espèce 02	sulla	6
Espèce 03	bourache	1
Espèce 04	convolvulus	1
Espèce 05	lamier blanc	1
Espèce 06	avoine	5
Espèce 07	vesce	160
Espèce 08	<i>liseron</i>	19
Espèce 09	moutarde	1
	Total	194

PA1 hors couvert		
Espèce	Nom de l'espèce	Nombre de pied
Espèce 01	bourache	2
Espèce 02	avoine sauvage	7
Espèce 03	lamier blanc	11
Espèce 04	convolvulus	3
Espèce 05	avoine domestique	15
Espèce 06	vesce	180
Espèce 07	moutarde	1
Espèce 08	<i>trèfle</i>	1
	<i>Total</i>	220

PA1 sous couvert		
Espèce	Nom de l'espèce	Nombre de pied
Espèce 01	orge	1
Espèce 02	espece 4	1
Espèce 03	lamier blanc	9
Espèce 04	esp 5	1
Espèce 05	esp6	2
Espèce 06	vesce	70
Espèce 07	convolvulus	2
Espèce 08	<i>avoine domestique</i>	2
Espèce 09	cerfeuil sauvage	2
Espèce 10	sulla	2
Espèce 11	coquelicot	1
Espèce 12	bourache	1
Espèce 13	liseron	3
	<i>Total</i>	

P2 hors couvert		
Espèce	Nom de l'espèce	Nombre de pied
Espèce 01	sulla	6
Espèce 02	convolvulus	3
Espèce 03	moutarde	3
Espèce 04	esp 5	6
Espèce 05	flamus Bovei	2
Espèce 06	esp9	2
Espèce 07	coquelicot	4
Espèce 08	<i>trèfle</i>	1
Espèce 09	lamier blanc	16
Espèce 10	aruma	1
Espèce 11	bourache	1
Espèce 12	Graminée => Amourette	1
Espèce 13	esp8	1
	total	46

P2 sous couvert		
Espèce	Nom de l'espèce	Nombre de pied
Espèce 01	chardon	1
Espèce 02	masran	2
Espèce 03	convolvulus	5
Espèce 04	moutarde	1
Espèce 05	esp 5 urosperma	2
Espèce 06	esp4 flamus	2
Espèce 07	avoine sauvage	8
Espèce 08	<i>Esp8</i>	2
Espèce 09	trèfle	1
Espèce 10	sulla	2
Espèce 11	lamier blanc	1
Espèce 12	bourache	1
Espèce 13	esp13	1
	total	29

P7 hors couvert		
Espèce	Nom de l'espèce	Nombre de pied
Espèce 01	avoine sauvage	22
Espèce 02	cerfeuil sauvage	2
Espèce 03	plantin	6
Espèce 04	sulla	10
Espèce 05	Esp5	7
Espèce 06	Esp6, urosperma	5
Espèce 07	Trefle	10
Espèce 08	<i>coniol</i>	10
	total	65

P7 sous couvert		
Espèce	Nom de l'espèce	Nombre de pied
Espèce 01	Sulla	4
Espèce 02	Liseron	80
Espèce 03	lamier blanc	4
Espèce 04	esp8 urosperma	5
Espèce 05	becs de gue	5
Espèce 06	Espèce 06	14
Espèce 07	trefle	7
Espèce 08	<i>coquelicot</i>	4
	total	123

Résumé

Les sols constituent le plus important réservoir de carbone terrestre. Un taux de croissance annuel du stock de carbone dans les sols de 4 pour 1000 permettrait de stopper l'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère. La perte en biodiversité d'un écosystème peut influencer le changement climatique si celle-ci altère les pools du carbone du sol par la réduction de la séquestration du carbone par les sols. En effet, une forte diversité des espèces végétales peut augmenter le carbone photosynthétisé et promouvoir ainsi la production d'une biomasse plus élevée, laquelle augmente le stockage du carbone dans les sols. L'objectif de cette étude était d'estimer l'influence d'une diminution de la biodiversité du couvert végétal sur le stockage du carbone du sol. Le carbone du sol sur une profondeur de 10 cm des sols des différents couverts végétaux dont la biodiversité s'érode par anthropisation a été comparé. L'étude a été menée dans des conditions environnementales similaires en termes de climat, de pente et de sol dans une région du Nord de l'Algérie, la Kabylie. Il s'agissait d'une prairie naturelle, d'une oliveraie, de l'association *Olea europea* L.(olivier)/*Vicia sativa* L.(vesce)/*Avena sativa* L. (avoine), vesce pure, avoine pure et d'un blé portées par un cambisol calcaric. L'échantillonnage des sols a été réalisé de 0 -10 cm sous tous les types de végétation. La diversité spécifique a été évaluée par l'indice de Shannon-Weaver et l'indice de Simpson. L'indice de Shannon-Weaver variait de 1,05 (vesce sous couvert végétal) à 3,14 (olivier en mono spécifique sous couvert). La prairie a présenté un indice Shannon-Weaver de 2,88. L'indice de Simpson variait de 0,12 à 0,78. L'olivier en mono-spécifique et la prairie ont présenté des indices de Shannon-Weaver et de Simpson indicateurs d'une forte biodiversité. C'est le sol de l'association de culture olivier/vesce/avoine sous couvert qui est le plus riche en carbone actif avec une teneur de 0,79 %. C'est le sol sous blé qui présente la teneur en carbone actif la plus faible 0,23%. Le carbone actif du sol sous prairie était de 0,27%, cette teneur est en dessous de celle attendue, vu la forte biodiversité de la végétation. La prairie était régulièrement fauchée, donc la restitution de résidus au sol était très faible. La teneur en carbone stable 1,04% était la plus importante sous vesce hors couvert. La plus faible teneur en carbone stable 0,19% a été mesurée sous la culture de blé. C'est le blé, écosystème la plus fortement anthropisé et à biodiversité la moins riche qui a montré la teneur en carbone actif et stable les plus faibles. Le fauchage des prairies, la culture de blé, agro système fortement anthropisé a limité la séquestration du carbone dans les sols.

Mots clés : Stockage du carbone - carbone du sol – biodiversité- écosystème- anthropisation