

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المسيلة-جامعة محمد بوضياف

Université Mohamed Boudiaf - M'Sila

FACULTE SCIENCES

**DEPARTEMENT DESSCIENCES
AGRONOMIQUES**

N° :49/DSA/2022



**DOMAINE : SCIENCES DE LA NATURE
ET DE LA VIE**

FILIERE : SCIENCESAGRONOMIQUES

OPTION : SCIENCE DU SOL

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique

Par : HERIZI Ikram

MANAA Imane

Intitulé

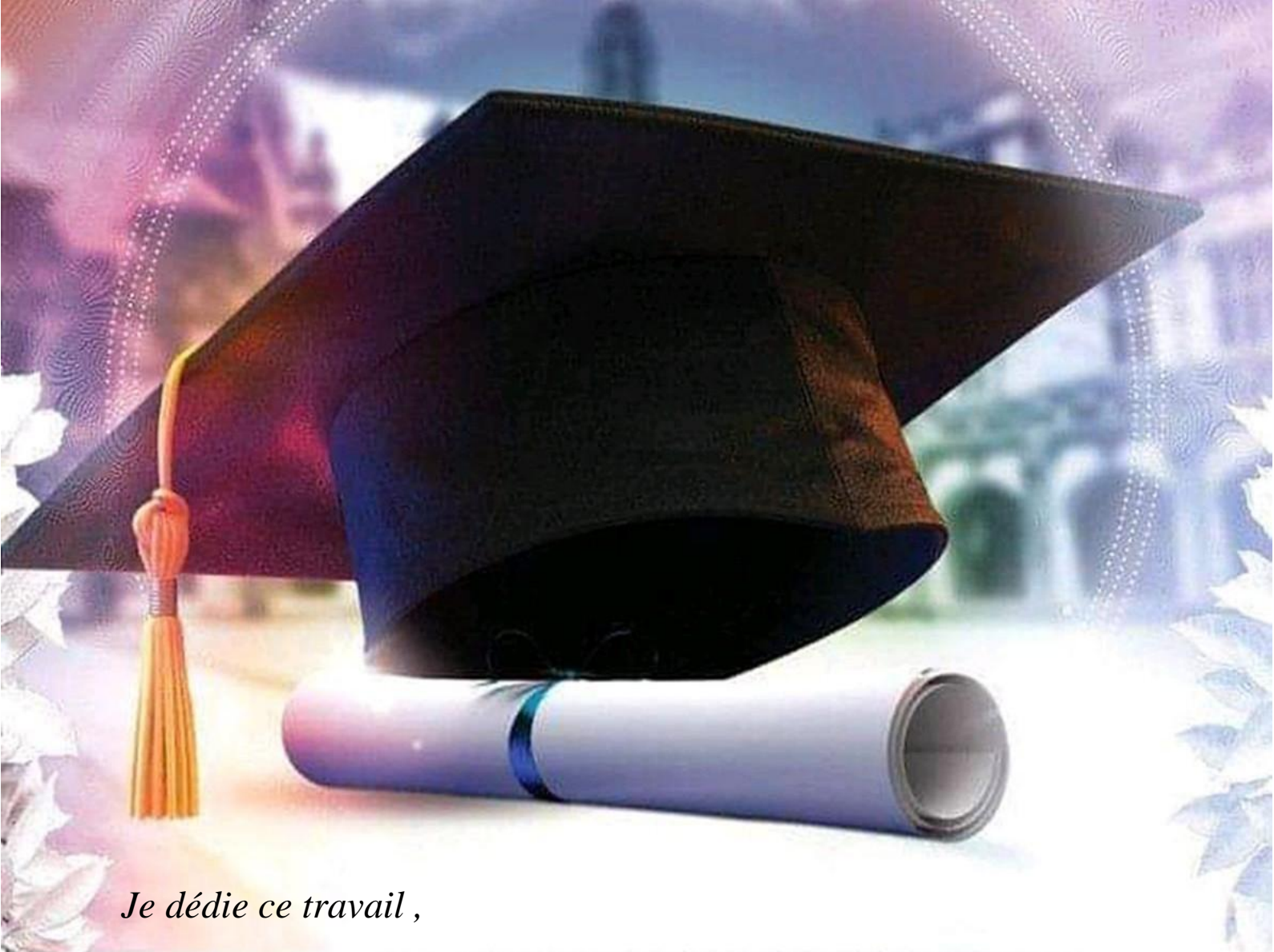
Caractérisation de la matière organique d'un Siérozem

De la région de M'sila

Soutenu devant le jury composé de :

M. GUENDOUZEN Omar	MAA	Université Med BOUDIAF- M'SILA	Président
M. TELLACHE Slimane	MAA	Université Med BOUDIAF - M'SILA	Rapporteur
Melle MADANI Djamila	MAA	Université Med BOUDIAF- M'SILA	Examinateur

Année universitaire : 2021 /2022



Je dédie ce travail ,

*comme preuve de respect , de gratitude , et de
reconnaissance à :*

A mes très chers parents

A mes frères YAAKOUB et ZAKARIA

A ma sœur ISRAA

*pour la patience et le soutien dont il a fait preuve pendant toute
la durée de ce travail et à qui je voudrais exprimer mes affections
Et mes gratitudes.*

À mes oncles HERIZI SACI ET HERIZI OMAR

*A tous ceux qui, ont contribué de près ou de loin à la réalisation
de ce modeste travail*

Merci infiniment.

IKRAM



Je dédie ce travail,

*Comme preuve de respect, de gratitude, et de
reconnaissance à :*

A mes très chers parents

A mes frères Abd ELHAKIM et KHALED

A ma sœurKENZA

*A ma famille MANAA ET ZAABAR, A tous mes amis Mes proches, je
vous remercie pour tous ces moments passés ensemble et de façon
désintéressée. , Je veux leur dire que je vous aime tellement et
j'espère que vous trouverez ce qui vous convient de bonheur dans les
années à venir à vous, mes professeurs.*

IMANE

REMERCEMENTS

En termes de rédaction de cette mémoire, nous remercions à tout instant notre dieu qui a toujours éclairé notre vie par le savoir, et nous a guidé dans le bon chemin.

*Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer notre reconnaissance et nos sincères remerciements : à nos encadreurs : **Mr. TALLECHE SLIMANE** pour avoir bien nous guider et nous conseiller durant notre préparation du mémoire.*

***Mr. Guendouzen A** pour l'honneur qu'il nous fait en présidant notre jury*

***Mr. MADANI Dj** d'avoir mis à notre disposition sa précieuse documentaire, de*

Son savoir

Nous remercions aussi toute l'équipe de laboratoire d'Agronomie

De l'université de M'sila

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.



Sommaire

LISTE DES

FIGURES

LISTE DES

TABLEAUX

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	
1. Données historiques et définitions	4
1.1 Généralité	4
1.2 Origine et nature des matières organiques	5
1.3 Le rôle de la matière organique du sol	5
1.4 Transformation des matières organiques dans le sol	6
1.1.1. Le processus d'humification	6
1.1.2. Le processus de minéralisation	6
1.5 Importance de la Matière Organique du Sol	6
1.6 Les composés organiques	8
1.1.3. La matière organique (MO) du sol	8
1.1.4. La composante vivante du sol	11
1.7 Les organismes vivants	14
2. Les matières organiques mortes	16
2.1 Données générales sur les matières organiques des sols	16
2.2 Composition chimique des matières organiques mortes	16
2.2.1 Composition élémentaire	17
2.2.2 Composition moléculaire	17
2.3 Méthodes d'étude des matières organiques mortes	18
2.3.1 Méthodes destructives	18
2.3.2 Méthodes physiques non destructives	18
2.4 Propriétés des matières organiques	19
2.4.1 Propriétés physiques	19
2.4.2 Propriétés chimiques des matières organiques mortes	19
2.5 Méthodes de séparation des constituants organiques	20
2.5.1 Fractionnement physique des constituants organiques	20
2.5.2 Fractionnement selon le critère dimensionnel	20
2.5.3 Fractionnement selon le critère densimétrique	21
2.5.4 Méthodes chimiques d'extraction et de séparation des constituants	21

2.5.5	Méthodes basées sur la solubilisation decomposés organiques.....	21
2.5.6	Méthodes basées sur la destructiondes minéraux	22
2.5.7	Méthode utilisant la destructiondes micro-organismes	22
2-6	Rôles des matièresorganiques mortes	22
3	Les organismes vivantsdu sol	23
3.1	Caractéristiquesgénérales	23
3.1.1	Les facteurs agissant sur lesorganismes vivants	24
3.1.2	Répartition des organismes vivants dansle sol	25
3.2	Les micro-organismesdu sol.....	25
3.2.1	Lesbactéries	26
3.2.2	Leschampignons	27
3.2.3	Leschampignons saprophytes	28
3.2.3	Leschampignonsmycorhiziens.....	29
3.2.4	Leschampignons endophytes	30
3.2.5	Leschampignons pathogènes/parasites	30
3.3	La faunedu sol	30
3.3.1	Microfaune (Taille0,2 mm)	31
3.3.2	Mésafaune mm Taille<4 mm)	31
3.3.3	La macrofaune (4 mm taille<80 mm).....	31
3.3.4	La mégafaune (80mm <taille)	32
3.4	Lesracines vivantes.....	32
3.5	Les rôles desorganismesvivants	32

Chapitre II : Milieu physique dans la zone d'étude

1	Situation géographique	35
2.	Les caractéristiques physiques	36
2.1	Géomorphologie.....	36
2.1.1	Cadre montagneux	36
2.1.2.	Lespiémonts.....	36
2.1.3.	Lesplaines	36
2.1.4.	ChotteelHodna	36
2.2	Hydrologie.....	37
2.3	Géologie	37
2.3.1	Lessecondaire	38
2.3.2	Letraitre.....	38
2.3.3	Lequartenaire	38
2.4	Pédologie	38
2.4.1	Les solsminérauxbruts	38

2.4.2 Les sols peu évolués	38
2.4.3 Les sols calcaires magnésiques	38
2.4.4 Lessols halomorphes	38
2.4.5 Les sols hydro-morphes	39
2.4.6 Les sols isohumiques (Siérozem)	39
2.5 Climat	39
2.5.1 Les précipitations	40
2.5.2 Température	40
2.5.3 Les autres facteurs climatiques	42
2.5.3.1 Les vents	42
2.5.3.2 L'humidité	43
2.5.4 Synthèse climatique	44
2.5.4.1 Diagramme ombrothermique de Bagnoulet et Gausson	44
2.5.4.2 Climagramme d'EMBERGER	45

Chapitre III : Matériel et méthodes

1. Matériel	54
1.1 Présentation de la zone d'étude	54
1.2 L'occupation du sol	54
2. Méthode	54
2.1.1 Stratégie d'échantillonnage des sols	54
2.1.2 Analyses physiques et chimiques des sols	54
2.1.2.1 La conductivité électrique	55
2.1.2.2 Le pH	55
2.1.2.3 Le calcaire total	55
2.1.2.4 Le calcaire actif	55
2.1.2.5 Dosage du carbone organique	55
2.1.2.6 Analyse granulométrique	55
2.1.2.7 Azote total	56
2.1.3 Analyse statistique	56

Chapitre IV: Résultats et Discussion

1. Résultats globaux	57
2. Analyses statistiques	57
2.1. Analyse de la variance	58
2.2. Analyse de corrélation	58
2.2.1. Relation carbone organique et conductivité électrique	58
2.2.2. RELATION CONDUCTIVITE ELECTRIQUE ET PH	59
2.2.3. Relation conductivité électrique et calcaire actif	60
3. Calcaire total et calcaire actif	61

4. Le pH et conductivité électrique	62
5. Texture	63
6. Carbone organique	65
Conclusion	
Références	

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1: Place et composition des matières organiques du sol</i>	4
<i>Figure 1: Les rôles de la matière Organique - C.Marsden</i>	8
<i>Figure 2: Les constituants de la matière organiques des sols adaptés de Calvet (2003) et Sebastia (2007)</i>	9
<i>Figure 3: Schéma d'une cellule bactérienne</i>	12
<i>Figure 5 : Photo en microscopie électronique à balayage (MEB) de microstructures induit par les racines de Festuce rubra (Dorioz et al. 1993).</i>	15
<i>Figure 6 : Photo d'observation en microscopie électronique à balayage (MEB) de microstructure de l'association des polysaccharides avec les argiles de type kaolinite. (Chenu C. , 1989)</i>	16
<i>Figure 7: Schéma des différents groupes de la biodiversité du sol classés par taille.</i>	23
<i>Figure 8: Arbre phylogénétique de la vie</i>	24
<i>Figure 9: Schéma simplifié de la boucle microbienne au sein de la rhizosphère de plantes</i>	27
<i>Figure 4: Champignon saprophyte vivant de manière parasite indifféremment sur le sol ou les végétaux (ici le Phellinus)</i>	28
<i>Figure 5: Coupe de racine colonisée avec les différentes structures endomycorhiziennes.</i>	35
<i>Figure 6: Situation géographique de la zone d'étude</i>	35
<i>Figure 7 : La géomorphologie de la zone d'étude</i>	37
<i>Figure 8 : La pédologie de la zone d'étude</i>	39
<i>Figure 9: diagramme ombrothermique de Bagnoul et Gaussen de la station de M'sila (2006-2016)</i>	44
<i>Figure 10 : Climagramme d'Emberger et représentation de la zone d'étude 2006-2016</i>	46
<i>Figure 11 Valeurs des calcaire total et actif en fonction de type d'utilisation du sol</i>	62
<i>Figure 12 Valeur moyenne de pH en fonction de type d'utilisation du sol</i>	62
<i>Figure 19 Valeur moyenne de la conductivite electrique en fonction de type d'ulisation du sol</i>	63
<i>Figure 13: Diagramme des textures des sites d'études</i>	64
<i>Figure 14 : Valeur de la texture en fonction de type d'utilisation du sol</i>	65
<i>Figure 15: Teneur en carbone organique en fonction de l'horizon</i>	66
<i>Figure 16 : Teneur de carbone organique en fonction de type d'utilisation du sol</i>	67

LISTE DES TABLEAUX

<i>Table 1: Quantification des principales fractions des matières organiques du sol</i>	5
<i>Table 2: Principales interventions des organismes vivants dans la dynamique des éléments nutritifs et dans la formation de la structure des sols (présentation adaptée d'après Linden et al . , 1994</i>	34
<i>Table 3: Répartitions interannuelle des précipitations (mm).</i>	40
<i>Table 4: Les températures moyen minimales et maximales (C) . Mois J F M J M A J U M : Températures moyennes mensuelles des maximal.</i>	41
<i>Table 5: Le vent la période (2006-2016) de la région de M'sila</i>	43
<i>Table 6: : Station météorologique de M'sila HUMIDITE de l'air- MOYENNES MENSUELLES 2006-2016 (%)</i>	44
<i>Table 7: Valeurs du quotient pluviothermique Entrer Dans le cas de M'sila</i>	47
<i>Table 8: Statistique descriptives</i>	57
<i>Table 9 Analyse de la variance</i>	58
<i>Table 10 Corrélation</i>	58
<i>Table 11 Régression carbone organique et connectivité électrique</i>	59
<i>Table 12 Valeur moyenne de calcaire totale et calcaire actif</i>	61
<i>Table 13: Valeur moyenne des fractions granulométrique</i>	63
<i>Table 14 : Valeurs moyenne de la texture regroupée</i>	64
<i>Table 15: Normme d'interpritation de la matiere organique du sol</i>	65

LISTE DES ABRÉVIATIONS

M.O: les matières organiques

M.O.F: les matières organiques fraîches

M.H: les matières humiques

M.O.S: La matière organique du sol

BC : blackCarbon



INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Ce travail de thèse a fait l'objet de collaboration est la matière organique d'un Siérozem. Il s'inscrit dans le cadre général de la biogéochimie du sol. La problématique retenue est l'étude du Caractérisation la matière organique d'un Siérozem de la région de M'sila. Le sol et sa matière organique une ressource précieuse « Le sol est essentiel à la vie ; il ne pourrait y avoir de vie sans sol et de sol sans vie » (**Kellogg C. , 1938**) ; Cette fine couche meuble entourant la croûte terrestre constitue en effet un milieu unique et indispensable au vivant.

C'est un système complexe, auto-organisé dont la dynamique dépend des interactions entre organismes et environnement (**Perry, 1995**).

Le présent manuscrit s'organise en trois chapitres. Ce chapitre fait l'objet d'un article rédigé en français pour faciliter son accessibilité à un public plus large.

1) Le premier chapitre : propose une synthèse des connaissances, concepts, enjeux et problématiques entourant notre sujet d'étude. Les grands objectifs et hypothèses de ce travail sont présentés à la fin de cette première section.

2) deuxième chapitre: correspond à des travaux à la fois méthodologiques et fondamentaux, Il consiste en des approches analytiques comparées et Pour finir,

3) troisième chapitre : Matériel et méthodes

4) Quatrième chapitre: est une discussion/conclusion sur les acquis méthodologiques et fondamentaux de la thèse.

L'étude des sols est un des éléments essentiels de la compréhension de l'environnement. Les sols constituent une mince couche recouvrant une grande partie de la terre ferme du globe. Ils retiennent les substances nutritives et l'eau utilisées par les végétaux et les animaux ; ils filtrent et épurent l'eau ; ils affectent la chimie de l'eau et la quantité d'eau qui retourne dans l'atmosphère ; nos aliments et la plupart des matériaux que nous utilisons pour la construction, la fabrication du papier et les fibres textiles dépendent d'eux. Les sols contiennent des millions de petits animaux et de micro-organismes jouant un rôle dans la décomposition des déchets.

Les sols sont le résultat d'une interaction dynamique entre deux mondes. Face à des considérations factuelles, un autre domaine de préoccupations intéresse l'activité humaine : celui des relations qui s'établissent entre l'homme et le sol, indépendamment des facteurs physiques qui contrôlent son évolution. Celles-ci n'intéressent pas seulement le terrain des faits mais aussi celui des perceptions, des cultures, des usages et des traditions. Cela signifie que le sol, par l'utilisation que nous en faisons, est la conservation.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Nous lui devons, la considération que nous lui accordons, n'est pas qu'une dimension de notre environnement rétréci à son aspect physique: le monde des faits. II En même temps, il prend une dimension politique et sensible à travers le rapport L'homme entretient la terre, d'abord comme source (terre nourricière).

Deuxièmement, en tant que symbole du lieu et de la fertilité (**Camuzard**).

La classification des sols est un des problèmes les plus ardues de la **pédologie**; **L'importance** économique de la matière organique* est difficile à quantifier. Elle est très dépendante du contexte pédologique de l'exploitation ainsi que de son système de production et des choix techniques de l'agriculteur. (**Picardie, 2007**)



Chapitre I
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1 Données historiques et définitions:

Les concepts liés à la MOS : une boîte noire à explorer ; dans la revue Science, présentent la MOS comme « le biomatériau le plus complexe sur Terre » et pointent la nécessité de développer des approches physique et biochimique pour une meilleure caractérisation et compréhension des processus qui régissent sa dynamique (Crawford, 2004).

La structure et la stabilisation de la MOS, bien qu'abondamment étudiés depuis des décennies, ne sont pas encore entièrement élucidés du fait de cette grande hétérogénéité et complexité.

1.1 Généralité:

Ce terme regroupe l'ensemble des constituants organiques morts ou vivants d'origine animale, végétale ou microbienne, transformés ou non, présents dans les sols. La partie « humus »* représente 80 à 90% du total.

Utilisé au singulier, ce terme fait couramment référence à la seule fraction humifiée des matières organiques, aussi appelée humus (Picardie, 2007).

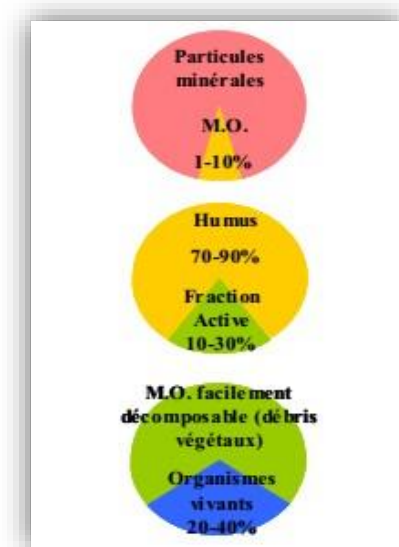


Figure 17: Place et composition des matières organiques du sol (Balabane, 2001)

Table 16: Quantification des principales fractions des matières organiques du sol (Mary B.).

Type de matière organique	Quantité (tonnes de carbone par hectare)
Résidus organiques frais, « libres »	0 à 4
Résidus organiques évolués (MOP)	2 à 4
Macrofaune	0,5
Biomasse microbienne	1 à 2
« Humus »	35
TOTAL	40

Les concepts liés à la MOS : une boîte noire à explorer ; dans la revue Science, présentent la MOS comme « le biomatériau le plus complexe sur Terre » et pointent la nécessité de développer des approches physique et biochimique pour une meilleure caractérisation et compréhension des processus qui régissent sa dynamique (Crawford, 2004).

La structure et la stabilisation de la MOS, bien qu'abondamment étudiés depuis des décennies, ne sont pas encore entièrement élucidés du fait de cette grande hétérogénéité et complexité.

1.2 Origine et nature des matières organiques

La matière organique apportée au sol peut être d'origine animale ou végétale. Dans les systèmes de culture, qu'ils soient agricoles ou potagers, les matières organiques sont généralement apportées par l'homme. Elles prennent la forme de fumier, fientes, lisier, compost, résidus de culture. (LES MATIERES ORGANIQUES ET LA FERTILITE DU SOL, s.d.)

1.3 Le rôle de la matière organique du sol

Le rôle de la matière organique dans le sol est bien plus important que sa proportion dans la masse du substrat. Similaire à l'humus du sol, la détermination de la matière organique du sol est généralement estimée en déterminant le carbone organique et en le multipliant par 1,724 (connu comme le facteur de von Bemmelen).

Une propriété importante de la matière organique du sol est qu'elle améliore la capacité d'un sol à retenir l'eau et les nutriments, et permet leur lente libération, améliorant ainsi les conditions de croissance des plantes. Un autre avantage de l'humus est qu'il aide le sol à se coller, ce qui permet aux Nématodes, ou bactéries microscopiques, de se désintégrer facilement dans le sol.

La matière organique est présente dans tout l'écosystème. Après la dégradation et la réaction, il peut se déplacer dans le sol et intégrer l'eau par le biais d'écoulements d'eau. La majorité des matières organiques qui ne sont pas déjà dans le sol provient des eaux souterraines.

Notez qu'une source de matière organique des eaux souterraines est la matière organique du sol et la matière organique sédimentaire. (definition-5582-matiere-organique-du-sol.html, s.d.)

1.4 Transformation des matières organiques dans lesol

Les matières organiques apportées au sol sont transformées par la faune du sol (vers de terre, bactéries, champignons, insectes, araignées, ...). On distingue:

1.1.1. Le processus d'humification:

Les parties plus difficilement dégradables de la matière organique sont transformées en humus ou composés humiques. Ces composés améliorent la structure du sol, sa teneur en eau et son pouvoir de filtration, et limitent les risques d'érosion et de battance.



L'érosion est la perte de particules de sol de surface, dans ce cas par action de l'eau.



Sous l'action de la pluie, la structure du sol peut se désagréger et ensuite former une croûte ; c'est le phénomène de « battance ».

Ces composés humiques viennent également renforcer la Capacité d'Echange Cationique du sol (CEC). Ces composés sont stables dans le sol, mais peuvent, à terme, subir le phénomène de minéralisation.

1.1.2. Le processus de minéralisation

Les parties plus facilement dégradables de la matière organique sont transformées en éléments nutritifs pour les végétaux, eau et gaz.

Ces processus sont le résultat d'une action biologique. On voit donc ici l'importance d'une faune du sol en bonne santé, afin de pouvoir tirer tous les avantages d'un apport de matières organiques pour le sol. (**LES MATIERES ORGANIQUES ET LA FERTILITE DU SOL, s.d.**)

1.5 Importance de la Matière Organique du Sol

Le sol contient un faible pourcentage massique de matière organique, généralement compris entre 1 et 5%.

Cette petite quantité de matière organique, dont le carbone organique constitue à peu près la moitié, est très importante pour le fonctionnement du sol et de l'écosystème tout entier. En effet, la matière organique du sol joue de multiples rôles dans les processus écologiques :

- C'est le substrat de base pour le réseau trophique détritifique : les microorganismes saprophytes (composés de bactéries, d'archées et de champignons) et de nombreux organismes de la faune du sol, dont les ingénieurs du sol, se nourrissent en métabolisant les composés organiques des litières et du sol. Ces organismes saprophages servent alors de substrat pour divers organismes prédateurs et omnivores.
 - C'est un réservoir d'éléments nutritifs, qui grâce à la minéralisation peuvent être libérés et rendus disponibles pour l'absorption par les plantes ou d'autres organismes du sol.
 - La matière organique retient à sa surface des cations et anions adsorbés. Elle a une capacité d'échange cationique très élevée : $\sim 200 \text{ cmol kg}^{-1}$ contre $\sim 30 \text{ cmol kg}^{-1}$ pour une argile de type illite. Ainsi, la teneur en matière organique du sol a une forte influence sur la capacité de ce sol à retenir et restituer les éléments nutritifs, en les protégeant de la lixiviation.
 - Les matières organiques contribuent à la structuration du sol. Certains composés produits par les organismes du sol, comme les polysaccharides, jouent un rôle de glu entre les particules minérales, contribuant ainsi à l'agrégation. Les MO stabilisées sont des matières colloïdales, qui participent à la formation du complexe argilo-humique grâce à leurs charges surfaciques. Cette liaison intime entre matière organique et argiles contribue également à la formation d'agrégats stables et donc de macroporosité, synonymes d'une structure favorable au bon enracinement et fonctionnement racinaire des plantes, ainsi qu'à la bonne infiltration et au drainage de l'eau.
 - La matière organique a une très forte capacité de rétention d'eau et permet donc d'augmenter la réserve utile du sol.
 - La matière organique colore le sol qui devient plus sombre en sa présence. Le sol absorbe alors davantage de rayonnement solaire et il s'échauffe plus. Son bilan énergétique est donc lié à sa teneur en matière organique, entre autres facteurs.
- (processus écologiques/co/Importance MOS, s.d.)

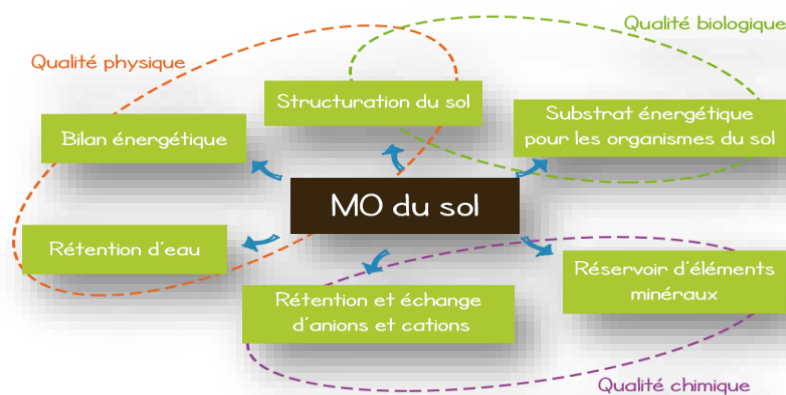


Figure 18: Les rôles de la matière Organique - C.Marsden

1.6 Les composés organiques

Les sols représentent un pool majeur dans le cycle du carbone et contiennent 172×10^{10} t de carbone. Ils constituent l'habitat des organismes photosynthétiques terrestres.

1.1.3. La matière organique (MO) du sol

La matière organique (MO) des sols est constituée de l'ensemble des composés contenant du carbone qui ont été formés par les organismes vivants. La MO du sol constitue un compartiment très hétérogène du sol en perpétuel renouvellement. On définit le turnover de la MO comme le temps de dégradation totale d'un composé organique dans un sol. Le turnover de la MO est influencé par les apports annuels au sol, il est en moyenne de 30 à 40 ans. La MO représente la plus grande réserve de carbone de la surface de la terre, toutefois elle ne représente que quelques pourcents de la masse totale du sol et environ 2 % de son volume.

La matière organique est essentiellement constituée de carbone, sa composition moyenne est de 50% de carbone, 40% d'oxygène, 5% d'hydrogène, 4% d'azote et 1% de soufre. Les constituants organiques interviennent particulièrement dans le fonctionnement du sol, car la MO représente la réserve essentielle de nutriments (N et P) pour les organismes du sol, (Stevenson F. , 1994.) et participe aussi à l'aération du sol, soutenant ainsi les organismes hétérotrophes et les processus biogéochimiques associés.

De plus, les propriétés du sol telles que leur contenu en argile, en eau mais aussi la diversité des communautés bactériennes sont des facteurs importants régulant la minéralisation de la MO. (Stevenson F. , 1994.).

La nature et la fonctionnalité de la MO dépendent fortement de son origine et son état de dégradation dans le sol. (Bonneau, 1979) On peut dissocier la MO des sols en trois classes principales (Figure 3).

La composante vivante (microorganismes, petits vertébrés, racines...), la matière organique particulaire (MOP) très peu dégradée, et la matière organique dissoute (MOD) fortement dégradée (Figure 3). Les constituants non vivants représentent environ 85% de la MO. Dans les sols agricoles, la majorité de la matière organique que l'on trouve dans le sol provient des apports de végétaux (résidus de récoltes), des engrais verts enfouis dans le sol, feuilles et branches mortes, excréments, mais aussi d'organismes morts sur ou dans le sol (animaux extérieurs et animaux du sol, comme les vers de terre). Si certaines des molécules organiques du sol sont héritées directement des débris organiques, la plupart sont synthétisées dans le sol, à la suite de processus physiques, chimiques et biochimiques complexes (par dégradation bactérienne) qui constituent l'humification de la MO. (Chenu & Plante, 2006) Néanmoins, la proportion des différentes formes de matière organique dépend généralement de l'activité biologique du sol. La matière organique joue donc un rôle prépondérant dans les propriétés du sol, et le fonctionnement des écosystèmes.

Sur une méthodologie de fractionnement physique et chimique des agrégats des sols: origine de la matière organique des fractions obtenues. Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'académie des Sciences série D, 291, 381-384.

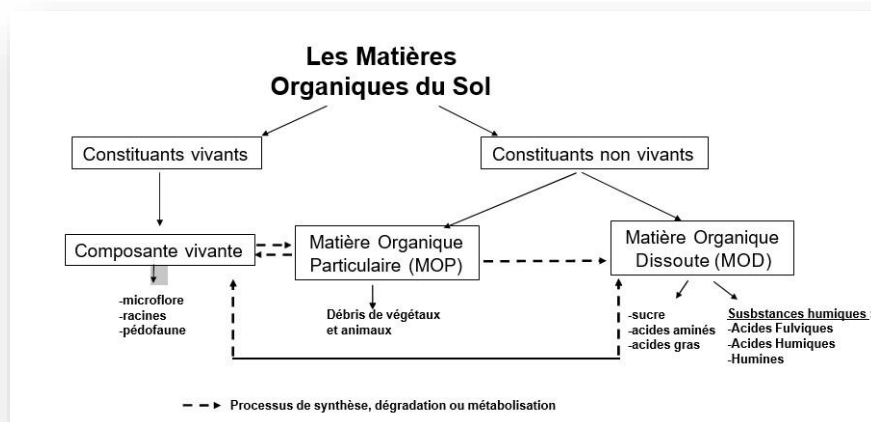


Figure 19: Les constituants de la matière organiques des sols adaptés de Calvet (2003) et Sebastia (2007)

La matière organique des sols influence les propriétés des sols. Pour cela elle intervient au niveau des propriétés physiques, chimiques et biologiques. Les fonctions physiques de la MO interviennent dans la stabilisation des agrégats du sol, via la rétention en eau, ainsi que les propriétés thermiques du sol. Les principales fonctions chimiques de la MOS sont sa forte contribution à la capacité d'échange cationique (Stevenson F. , 1994.), son rôle de tampon dans le pH du sol, et la complexation des cations inorganiques. La fonction biochimique la plus fondamentale de la MO est l'approvisionnement de l'énergie métabolique, laquelle contrôle les processus biologiques. Le matériel organique est aussi utilisé pour la conversion des macronutriments (N, P, et S) à l'intérieur

des structures organiques en une forme inorganique, lesquels sont soit immobilisés soit utilisés pour la synthèse de nouveaux tissus à l'intérieur d'organismes du sol ou minéralisés et relâchés à l'intérieur du pool de nutriments minéraux du sol. L'azote du sol est présent à plus de 95 % dans la phase organique du sol. Celui-ci se divise sous plusieurs formes (azote insoluble, acides aminés, ammonium, ammoniac), dont les proportions évoluent dans le temps avec son cycle bien connu faisant intervenir les bactéries du sol.

(Stevenson F. , 1994.)

Au cours de la décomposition de ces composés, la MO est transformée et évolue graduellement, devenant plus ou moins rapidement non reconnaissable. La MO se dégrade en plusieurs phases (soilhealth.com/organic, s.d.) qui correspondent chacune à des compartiments spécifiques de la matière organique :

- Décomposition des composés facilement dégradables, tels que les sucres, l'amidon et les protéines. Le temps de dégradation de ces éléments est court (quelques jours). Dans ce compartiment, le carbone et l'énergie de ces composés sont facilement disponibles aux organismes vivants du sol. La plupart des microorganismes du sol sont capable de les décomposer.
- Décomposition des composés plus récalcitrants, tels que la cellulose et la lignine, qui peut prendre quelques années. Ces composés sont plus difficiles à dégrader car ils possèdent des chaînes moléculaires plus longues et portent des fonctions plus difficiles à dégrader.
- Décomposition des composés qui ont été formés par des combinaisons stables et localisées à l'intérieur des agrégats de sol, tels que les phénols. Le temps de dégradation de ceux-ci est en moyenne de l'ordre de la décennie.
- Décomposition des substances humiques, lesquelles résultent de la transformation des composés organiques par les microorganismes, dont le temps de dégradation peut aller de la décennie à des milliers d'années.

Dans un milieu biologique actif, la décomposition de la matière organique se conduit par la formation d'humine, d'acides humiques (AH) et d'acides fulviques (AF), constituant ce que l'on appelle les substances humiques. Dans le cadre de la matière organique morte, les substances humiques représentent un pool majeur de la rétention du carbone dans les sols. Les substances humiques s'ionisent en fonction du pH et sont généralement négativement chargées aux pH environnementaux. Cette charge négative provient de la dissociation des protons des groupes carboxyliques ($R-COOH$; $4 < pH < 6$) et phénoliques ($R-OH$; $9 < pH < 11$), majoritaires, ainsi que des groupes sulfurés ($R-SO_3H$; $pH < 2$) et sulfhydryles ($R-SH$; $pH < 7$), minoritaires. Ces équilibres de

dissociation peuvent être représentés avec l'équation suivante :



Les amines font exception à la règle puisqu'elles sont neutres à pH ambiant, et positivement chargées à pH basique ($N-H; 8.5 < pH < 12.5$). Toutefois, ce groupe minoritaire ne peut en aucun cas inverser la charge négative de la MO qui est principalement déterminée par les charges négatives des groupes carboxyles et phénols. Néanmoins, l'estimation de la quantité de sites réactifs organiques dans les sols reste très difficile.

La respiration microbienne liée à la dégradation de la MO récalcitrante génère des quantités importantes de glucose et d'autres composés facilement dégradables, permettant ainsi le recyclage de la MO récalcitrante. Ces molécules, issues de l'humification, sont réutilisées comme nutriments par les plantes, définissant ainsi le recyclage, i.e. le 'turnover' de la MO réfractaire. L'incorporation de MO dans les sols peut modifier l'équilibre fragile qui existe généralement entre la synthèse et la dégradation de la MO (**Lugato, et al., 2010**). Cette interférence affecte la biologie, la physique et la chimie du sol. Ainsi, l'incorporation de la MO peut impacter l'agrégation du sol, les propriétés hydriques et le transfert de nutriments, donc l'activité biologique et le nombre d'organismes actifs, c'est à dire l'ensemble de la chaîne de processus biogéochimique du sol. (**Sumner, 2000**)

1.1.4. La composante vivante du sol

Les organismes vivants du sol sont particulièrement diversifiés en taille et en espèce. La taille des organismes vivants du sol s'étend de moins de 0.1 µm avec les virus, jusqu'à la taille de la drosophile passant par les bactéries de taille ~1 µm et l'étendue importante en taille des insectes présents dans les sols.

A cela s'ajoutent les végétaux, qui agissent sur le sol via la croissance des racines et le prélèvement de l'eau et des nutriments en solution. Tous ces organismes interviennent dans les processus biogéochimiques conditionnant et définissant le sol. Les organismes vivants de taille >5 mm ont un rôle spécifique dans la mesure où ils brassent le sol et aèrent ainsi activement le sol.

L'ensemble des êtres vivants sur Terre peut être classé en deux groupes qui sont les procaryotes et les eucaryotes.

La principale différence réside dans la présence dans les cellules d'un noyau cellulaire délimité ou non par une membrane contenant l'ensemble du matériel génétique. Le groupe des procaryotes est lui-même subdivisé en deux sous-groupes, les bactéries et les Arch bactéries. (**Woese & Fox, 1977**) Dans la suite de cette étude nous nous intéresserons principalement aux bactéries du sol. Les communautés bactériennes sont importantes dans les sols à cause de leur rôle clé dans les processus des écosystèmes, tels que La décomposition de la MO, les cycles biogéochimiques du C et de la N,

ainsi que leurs symbioses possibles avec les plantes. (Nannipieri, et al., 2003)

Les bactéries sont omniprésentes dans l'ensemble des écosystèmes, à des concentrations très variables, où elles jouent un rôle très important dans les cycles biochimiques (e.g. cycles du C, N, S, ...). Dans les sols, les bactéries représentent le groupe biologique le plus important métaboliquement mais aussi en concentration (10^6 à 10^{10} cellules par gramme de sol sec) et en biomasse (40-60% de la biomasse des sols). Les bactéries ont une taille comprise entre 10^{-5} et 10^{-7} mètres (Figure I-2) et leur forme peut être classée en 3 grandes catégories : sphérique (ou cocci), cylindrique (ou bâtonnets), et spiralée (ou hélicoïdales). Leur structure cellulaire (Figure I-5) peut être décrite en deux unités de base : i) la cellule est constituée d'un cytoplasme dans lequel se situe l'ensemble des fonctions vitales, et où l'on trouve l'ensemble du matériel génétique, ainsi que les enzymes ; ii) le cytoplasme est entouré d'une membrane cytoplasmique composée de deux feuillettes lipidiques. Les bactéries possèdent une paroi qui leur permet de garder la stabilité de la structure de la cellule et qui correspond à l'enveloppe externe. Il existe deux types de structures de parois bactériennes : les parois à « Gram positif », lesquelles sont relativement épaisses et composées de peptidoglycane, d'acide téichoïque et de muréine ; les parois des bactéries à « Gram négatif » sont composées de deux membranes encadrant un espace périplasmique, dans lequel peut avoir lieu des réactions métaboliques. Une troisième unité de base existe pour les bactéries mobiles qui possèdent un ou plusieurs flagelles ou des pilis leur permettant de se déplacer.

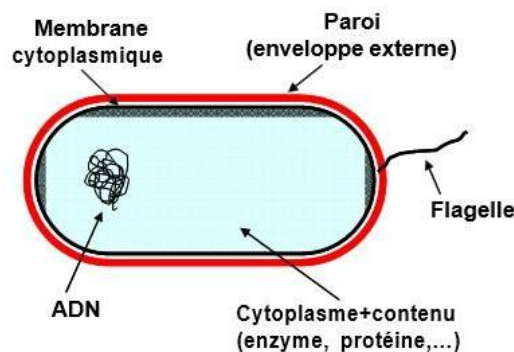


Figure 20: Schéma d'une cellule bactérienne

Les bactéries se multiplient par division cellulaire, ce qui permet de les considérer comme des clones naturels. Cette division cellulaire permet la transmission de l'ensemble du code génétique de la cellule mère à la cellule fille. La croissance des bactéries dans un milieu se fait de manière exponentielle après une phase de latence, jusqu'à un plateau. Les taux de croissance vont dépendre des conditions physico-chimiques du milieu dans lequel les bactéries sont présentes et en particulier de la disponibilité des nutriments. La plupart des bactéries se multiplie dans des conditions modérées, (Lemaitre, 1998) mais leur croissance et leur diversité sont très variables et peuvent être modifiées par divers paramètres chimiques (concentration en métaux, oxygène, pH) ou physique (température,

salinité, pression hydrostatique, ...). Une méthode devenue classique pour représenter la diversité des communautés bactériennes est la mesure d'un indice de diversité déterminé à partir de l'empreinte génétique des communautés obtenues par la méthode moléculaire ARISA (Automated Ribosomal (rRNA) Intergenic Spacer Analysis); (Fisher & Triplett, 1999). (Ranjard, Brothier, & Nazareth, 2000) Bien qu'imparfaite, car ne considérant que les populations les plus représentées dans le sol cette approche permet de relier l'empreinte génétique mesurée à la structure des communautés bactériennes.

Le comportement bio-physico-chimique de la MO influence fortement la stabilité des agrégats des sols. Dans les sols, la MO peut influencer la hiérarchie de l'agrégation de deux manières : i) une augmentation de la concentration en C induit une augmentation de la classe de taille des agrégats, et ii) un fort contenu en MO nouvellement apporté (carbone frais) facilement dégradable est plus présent dans les macro agrégats que dans les micro agrégats. (Six, H., S., & Denef, 2004) Il existe ainsi des agents chimiques de liaison dont l'efficacité dépend de leur dimension. Les composés stabilisants (organiques et inorganiques) de petite taille permettent alors la stabilisation des micro-agrégats. A l'opposé, les racines et autres composés de plus grandes tailles sont considérés comme des agents de liaison entre des particules séparées par des longues distances ou par des pores. C'est pourquoi, pour étudier le rôle de la MO dans l'agrégation des sols, il faut bien tenir compte que les sols sont composés d'agrégats et de particules de tailles similaires.

La MO des sols se distribue dans les agrégats de toutes tailles (Figure I-8), à des stades de dégradation très différents, allant du débris végétal dans les macro-agrégats aux macromolécules organiques des complexes argilo-humiques. Ainsi, la MO dégradée, présente sous forme de macromolécules de type acides humiques ou fulviques, peut être associée aux fractions fines des sols. Cette matière organique associée aux argiles est considérée comme très évoluée et stable dans le temps (de l'ordre de la décennie). (Andreux, Bruckert, Correa, & Souchier, 1980), (Balabane & Plante, 2004) Elle s'organise sous forme de complexes organo-minéraux riches en Ca, Mn, Fe et P (Turchenek & Oades, 1979). En effet, Chenu & Plante (2006) ont montré par une dispersion complète du sol que les complexes organo-minéraux sont formés par la liaison entre la MO évoluée (fraction humiques) et les minéraux primaires.

(Christensen, 2001) a défini alors trois niveaux d'organisation structurale des sols en lien avec les différentes MO. D'abord les micro-agrégats (<20 µm) où les principaux agents de stabilisation sont les produits microbiens, les exsudats racinaires, les cations polyvalents et d'autres agents de liaison persistants (polymères organiques), qui sont les plus stables dans le temps. Il définit ensuite les agrégats intermédiaires (20-250 µm) qui sont constitués de micro-agrégats et de MO libre et occluse, dont la stabilisation est due à des agents de liaison de transition tels que les polysaccharides.

Enfin les macro-agrégats constitués à la fois d'agréments intermédiaires et de MO (libre et occluse) et dont les agents de liaisons sont temporaires (racines et hyphes). Pour maintenir la structure du sol il existe différents niveaux de liaison.

La MO des sols joue un rôle important dans la formation des micro-agrégats (**Gale, Cambardella, C.A., & Bailey, 2000**), par son rôle de liant. L'utilisation du carbone par les microorganismes pour former des composés organiques liant les particules du sol entre elles dépend de la labilité de la MO, c'est-à-dire sa capacité à se dégrader. L'amendement d'un sol avec une MO fraîche et peu dégradée, constituée principalement de MOP conduira ainsi à un sol plus structuré qu'un sol non amendé contenant de la MO plus ancienne, y compris à une teneur équivalente en MO. La diminution de la taille de la MO sous l'effet de la biodégradation par les microorganismes permet l'incorporation du carbone dans des agrégats détaillés de plus en plus petite jusqu'à la minéralisation totale de cette MO (**Andreux, Bruckert, Correa, & Souchier, 1980**); (**Tisdall & Oades, 1982**) De plus, l'augmentation du stock de carbone favorise le processus d'agrégation conduisant à la formation d'agréments de taille de plus en plus grande. (**Oorts, H., Merckx, & Nicolardot, 2007**) La qualité et la quantité de carbone dans les sols jouent donc un rôle varié mais prépondérant dans la hiérarchisation des sols en agrégats. De ce fait, les cultures du sol affectant les teneurs ou la distribution de la MO ont une incidence directe sur le potentiel d'agrégation des sols. (**John, Yamashita, Ludwig, & Flessa, 2005**) Ainsi, les cultures menées sur le long terme peuvent conduire à l'altération de l'agrégation des sols ainsi qu'à la perte de la MO. La matière organique joue donc un rôle primordial dans le maintien de la structure en agrégats des sols (**Balabane & Plante, 2004**), en améliorant leur stabilité structurale et leur résistance aux stress extrêmes (hydrique, mécanique, ...).

1.7 Les organismes vivants

Les organismes vivant dans les sols impactent clairement la stabilité des agrégats. Ils sont répertoriés en trois catégories : la faune, la flore (spécifiquement les racines), et les microorganismes (bactéries).

Pour la faune, de nombreuses études sur l'impact des vers de terre (**Marinissen & Dexter, 1990**) ; (**Brown, Barois, & Lavelle, 2000**) sur la formation et la stabilisation des agrégats, ont été menées avec différentes espèces modèles.

Il a ainsi été montré que les vers de terre jouent un rôle direct et rapide sur la formation des micro-agrégats ainsi que sur l'incorporation de carbone frais à l'intérieur de ces micro-agrégats. L'impact direct ou indirect des vers de terre sur l'agrégation varie avec l'espèce de vers de terre, la qualité de la litière et du sol parent (**Bronick & Lal, 2005**).

La flore stabilise le sol de deux façons différentes : d'un côté les résidus de plantes, riches en

carbone, produisent sous l'effet de la biodégradation microbienne des composés humiques très réactifs qui stabilisent les agrégats des sols, et d'un autre côté les racines jouent aussi un rôle important dans la stabilisation du sol par l'étendue de leur réseau qui s'infiltré dans le sol et dans les agrégats (**Dorioz, Robert, & Chenu, 1993**) (**Angers & Caron, 1998**).

En se développant, les racines sont capables d'exercer des pressions importantes qui vont compresser les agrégats et les séparer les uns des autres. De plus les exsudats organiques libérés par les racines ainsi que les fines racines favorisent l'activité biologique impliquée dans la formation d'un ciment humique impliqué dans l'agrégation des constituants des sols (**Hillel, 1998**). La pénétration des racines dans le sol est alors un bon indicateur de la stabilité des agrégats selon leur taille.

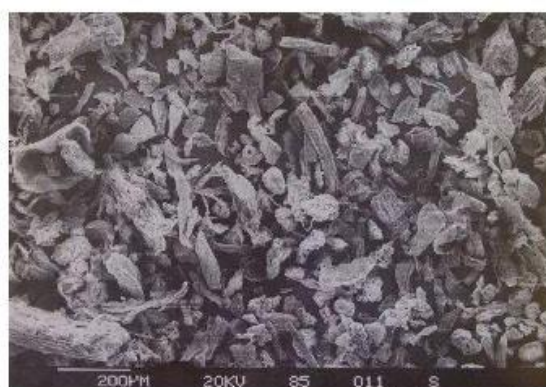


Figure 5 : Photo en microscopie électronique à balayage (MEB) de microstructures induit par les racines de Festuca rubra (Dorioz et al. 1993).

a=racine, b=colonies bactériennes, f=fissure

A plus fine échelle les micro-organismes jouent également un rôle important dans la stabilité des agrégats. Leur stabilité dépend de plusieurs facteurs en lien avec l'échelle d'étude tels que la concentration en champignons et bactéries, la texture du sol, ou sa minéralogie. Par exemple, la formation de mycélium fongique facilite l'accumulation de MO (**Jastrow, 1996**) et ces effets sur l'agrégation se sont révélés plus importants dans les sols argileux que dans les sols sableux. Les champignons souvent localisés dans les macros pores sont plus sensibles à la dessiccation du sol que les bactéries, plutôt localisées dans les micro-agrégats. C'est pourquoi le mycélium fongique va affecter de manière directe préférentiellement les liens entre les macro-agrégats (**Denef, et al., 2001**).

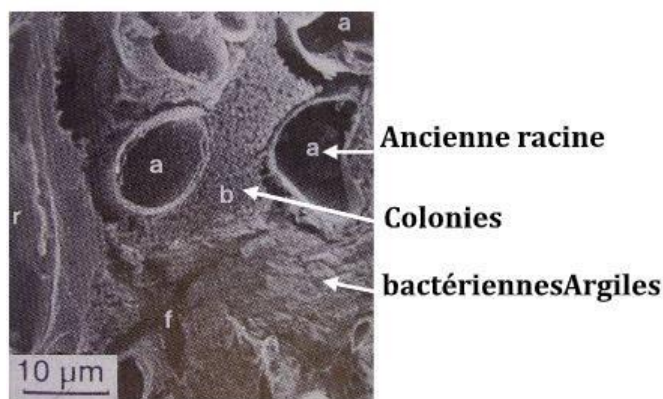


Figure 6 : Photo d'observation en microscopie électronique à balayage (MEB) de microstructure de l'association des polysaccharides avec les argiles de type kaolinite. (Chenu C. , 1989)

Le développement du mycélium fongique et les polysaccharides qu'ils libèrent améliorent la micro-agrégation (Chenu C. , 1993) (Figure I-10). Les fractions fines sont enrichies en matières organiques évoluées et en nutriments, ce qui permet une augmentation de la biomasse bactérienne laquelle influence aussi l'agrégation du sol. (Sessitsch, Weilharter, Gerzabek, Kirchmann, & Kandeler, 2001) Réciproquement, les bactéries des sols peuvent trouver refuge à l'intérieur des micro-agrégats, ce qui influence la diversité microbienne et l'activité bactérienne (Hattori, 1988). L'activité des populations microbiennes joue ainsi un rôle notable dans l'agrégation (Six, Bossuyt, Degryse, & Denef, 2004). Dans les sols à texture grossière (sols sableux) l'agrégation n'est que faiblement reliée à la biomasse microbienne ainsi qu'à leurs produits (i.e. sucres, biofilm), car seuls les réseaux d'hyphes sont capables de lier les grosses particules sableuses pour former des agrégats stables. Au contraire, dans les sols argileux, des changements dans le contexte environnemental local (texture, physico-chimie, ...) peuvent amener à une réorganisation des complexes argilo-humiques et de leur relation avec les microorganismes. (Young & Crawford, 2004) ; (Bronick C. &, 2005) (Milleret, Le Bayon, C., Gobat, & Boivin, 2009).

2 Les matières organiques mortes

2.1 Données générales sur les matières organiques des sols

Toutes les substances organiques particulières et moléculaires contenues dans le sol. Autrement dit, il s'agit de tous les constituants organiques non vivants. Les résidus végétaux font partie de la matière organique du sol quand ils lui sont incorporés mécaniquement, soit par l'action de la faune et de la microfaune pour les litières, soit par les travaux du sol pour les sols cultivés.

2.2 Composition chimique des matières organiques mortes

La chimie organique est l'étude de la structure, propriétés, composition, réactions et préparation des composés contenant du carbone. Elle est la chimie des composés carbonés, autres que les sels simples (carbonates, oxydes, carbures). La plupart des composés organiques sont covalents car ils

contiennent du carbone et de l'hydrogène. L'élément fondamental de la chimie organique est le carbone

2.2.1 Composition élémentaire

- Carbone: Les sols sont la plus grande réserve de carbone à la surface de la Terre. La quantité de carbone organique est très variable selon le type de sol, mais elle dépend aussi d'autres facteurs : le temps, le climat, la végétation, les roches parentales et la topographie.
- Azote: L'atmosphère et les océans contiennent la plus grande partie de l'azote de la proportion contenue dans les sols n'étant environ que de 0,04 %. L'azote s'y trouve principalement sous forme organique, 90 % environ, 10 % correspondant à de l'ammonium fixé de l'ordre de 0,06 % à 0,3 %.
- Phosphore: Le phosphore des sols a une origine principalement minérale, mais une partie parfois importante (15 % à 80 %) du phosphore total se trouve sous forme organique.
- Soufre: La plus grande partie du soufre se trouve dans le sol sous forme organique parfois jusqu'à 95 %, voire 99 %, du soufre total (H.W, 2009), car la forme inorganique SO_4 , ne reste pas dans le sol, étant sujette au transport dans les eaux.

2.2.2 Composition moléculaire

- Composés organiques individualisés

Les sols contiennent une grande variété de composés organiques d'origines diverses qui existent à l'état libre pour une petite partie et, pour la plus grande partie, à l'état associé aux colloïdes humiques et minéraux, ou comme constituants des substances humiques. S'agit des composés azotés, des hydrates de carbone et des lipides. L'inventaire de ces composés a le plus souvent été fait sur des solutions obtenues par extraction, ce qui donne une image globale de la composition moléculaire.

La réalité de cette représentation est toute fois mise en question par l'utilisation de la spectrométrie de rayons X in situ à une échelle nanométrique (< 50 nm).

Elle révèle une image tout à fait différente en montrant des bio molécules localisées dans les micro agrégats dans la composition est différente de celle qui est déterminée à une échelle macroscopique (al, 2008).

Les substances humiques Les substances humiques ne peuvent être caractérisées que par des ensembles de valeurs de la constante de dissociation K.

Elles supposent que les substances humiques contiennent des distributions continues de groupes fonctionnels susceptibles de lier les protons et les cations métalliques. Il a été montré que la rétention des protons par des substances humiques peut être convenablement décrite avec un modèle de distribution continue donné par une loi de Gauss.

2.3 Méthodes d'étude des matières organiques mortes

2.3.1 Méthodes destructives

L'on peut Les méthodes utilisées sont variées. Leur description est exposée dans plusieurs ouvrages comme ceux de (Schnitzer & Khan, 1972) et de (Stevenson F., 1994.). Plusieurs réactions chimiques permettent de transformer des constituants organiques des sols en composés qu'ensuite extraire. Leur analyse fournit des informations sur les constituants d'où ils sont issus et constitue un moyen de les caractériser.

- Méthodes chimiques

Plusieurs réactions chimiques permettent de transformer des constituants organiques des sols en composés qu'on peut ensuite extraire. Leur analyse fournit des informations sur les constituants d'où ils sont issus et constitue un moyen de les caractériser. Leur description est exposée dans plusieurs ouvrages, comme ceux de (Schnitzer & Khan, 1972) et de (Stevenson F., 1994.).

- Méthodes thermiques

A– Méthode thermogravimétrique Le chauffage à des températures supérieures à 400 ° C provoque la destruction des substances humiques par pyrolyse et entraîne une perte de masse.

B– Méthode couplant la pyrolyse et la spectrométrie de masse On utilise l'énergie thermique pour rompre les liaisons les plus faibles. Les composés produits sont ensuite analysés à l'aide d'un spectromètre de masse.

2.3.2 Méthodes physiques non destructives

Elles sont basées sur l'absorption ou progrès technologiques tant pour les matériels de spectrométrie que pour les moyens de Les méthodes spectroscopiques se sont beaucoup développées en raison d'importants T'émissions d'énergie dues aux transitions électroniques atomiques et moléculaires, aux vibrations intramoléculaires et aux propriétés magnétiques méthodes spectroscopiques.

2.4 Propriétés des matières organiques

2.4.1 Propriétés physiques

Propriétés physiques visibles, infrarouges, etc.), et, d'autre part, la taille et la forme des particules. Celles-ci sont soumises à diverses radiations, bases des méthodes d'étude spectrométriques (rayons UV). Les propriétés physiques concernent, d'une part, le comportement des molécules par les méthodes granulométriques et densimétriques. En r déjà été décrites pour les matières organiques particulières à l'occasion de leur séparation celles de composés moléculaires extraits comme les substances humiques sont plus difficile à cerner étant donné le caractère incertain de la réalité de leur existence dans les sols. Deux propriétés sont intéressantes parce qu'elles déterminent l'aire et l'accessibilité des interfaces avec le milieu environnant, les minéraux et la solution du sol. Ils'agit de la taille, des particules et de leur aire spécifique de surface.

-Dimensions des particules humiques

Les acides humiques et fulviques sont des colloïdes, c'est-à-dire des substances dans les particules ont des dimensions intermédiaires situant entre celles des molécules qui forment de vraies solutions et celles des molécules suffisamment grandes pour sédimenter sous l'effet de la gravité et former des suspensions.

-Masse moléculaire

Les substances humiques extraites d'un matériau terreux n'ont pas toutes les mêmes dimensions. C'est pour cette raison que ce sont des colloïdes polydispersés. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour déterminer les masses moléculaires des substances humiques : la centrifugation, la viscosimétrie, la cryoscopie, l'osmomètre, la diffraction des rayons X et des électrons, la diffusion des rayons X aux petits angles et la chromatographie avec des tamis moléculaires. Des références bibliographiques sur ces méthodes sont données dans plusieurs publications (G, Glebova, & YM, 1975) Stevenson F. , 1994.)

2.4.2 Propriétés chimiques des matières organiques mortes:

- Ionisation des groupes chimiques fonctionnels:

Du point de vue de l'ionisation, les acides fulviques et humiques possèdent deux types de groupes chimiques fonctionnels. 1. Des groupes qui s'ionisent par fixation d'un proton. Ce sont les groupes porteurs de fonctions aminées primaires, secondaires et tertiaires: $R-NH_2$, $RR'-NH$, $RR'R''-N$ (où R, R' et R'' sont des groupes d'atomes). Ce type d'ionisation conduit à l'apparition de charges électriques positives. Il présente un intérêt pour l'étude des substances humiques, mais n'en a pas en revanche pour les sols. Outre le fait que ces groupes nesoient pas très abondants, la protonation n'a

lieu qu'en milieux très acides, ce qui n'est généralement pas rencontré, en particulier dans les sols cultivés. 2. Des groupes qui s'ionisent par dissociation ionique. Ce sont les groupes acides, qui sont les plus abondants puisqu'il s'agit des groupes carboxyliques, phénoliques et alcooliques.

-Complexation des cations métalliques:

Les cations métalliques établissent des interactions électrostatiques avec les charges électriques négatives dans on vient de parler. Ces réactions sont également dues à des réactions chimiques de complexation résultant de la formation de liaisons de coordination (note complémentaire 1-5). Parmi les nombreux groupements fonctionnels portés par les composés organiques du sol, plusieurs possèdent des atomes donneurs de paires d'électrons. Il s'agit principalement des atomes d'oxygène et d'azote, bien que le soufre et le phosphore puissent aussi établir ce genre de liaisons et jouer ainsi le rôle de ligands.

-Propriétés de rétention:

Les substances humiques peuvent retenir de nombreuses molécules, ionisées ou non ionisées, et jouer un rôle important dans le devenir des substances polluantes dans le sol

-Stabilité chimique:

Les matières organiques moléculaires sont très riches en groupements fonctionnels divers, dans la stabilité est variée. Ils confèrent à ces matières une grande réactivité chimique il est de plus en plus admis que la durée de vie des molécules organiques est davantage déterminée par leur protection physique et physicochimique que par leur récalcitrance chimique ((Salomé et al., 2010))

2.5 Méthodes de séparation des constituants organiques

2.5.1 Fractionnement physique des constituants organiques

Ce type de séparation a d'abord été proposé dans le cadre des études de la stabilité structurale des sols et de ses relations avec les techniques culturales (Henin & Turc, 1949)(Monnier, Turc, & Luusinang, 1962) . La méthodologie de ce fractionnement a été ultérieurement développée, en particulier par (Balesdent et al. (1991)). Le fractionnement physique permet de séparer les matières organiques en fonction de leur taille et de leur localisation par rapport aux minéraux du sol. Deux critères sont utilisés.

2.5.2 Fractionnement selon le critère dimensionnel

Il s'agit d'une séparation granulométrique réalisée sur les matériaux terreux sans destruction des matières organiques, contrairement à l'analyse granulométrique des minéraux du sol . Les techniques utilisées sont les mêmes : après la dispersion du matériau, les particules dont la taille est supérieure à 50 µm sont séparées par tamisage et les plus petites par sédimentation ou centrifugation.

Lors de ces opérations, on sépare les matières organiques particulaires principalement contenues dans les fractions supérieures à 50 µm et les agrégats constitués par des assemblages de matières organiques plus ou moins transformées et de minéraux. Les agrégats sont classés selon les dimensions utilisées pour l'analyse granulométrique, mais il faut bien comprendre que ce ne sont pas des sables, des limons et des argiles au sens granulométrique, comme on les définit pour les constituants minéraux.

2.5.3 Fractionnement selon le critère densimétrique

Il permet de compléter l'information obtenue par le fractionnement dimensionnel en séparant par flottation les particules organiques, les associations organominérales (des composés organiques liés à des particules minérales) et les particules minérales. Les premières ont une masse volumique proche de celle des tissus végétaux d'où elles sont issues ($< 1,5 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$), les autres, au contraire, se situent dans des agrégats dans la masse volumique est plus proche de celle des minéraux ($\approx 2,65 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$). Les fractionnements de symétrie sont effectués avec des solutions minérales, comme le chlorure de zinc (ZnCl_2 , $1,61 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$) et le polytungstate de sodium ($\text{Na}_6(\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{42})$).

Ce dernier est très intéressant, car il permet d'obtenir des liquides dont la masse volumique peut varier de $1 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ à $3,1 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$. On peut ainsi séparer les débris végétaux en cours de décomposition ou « matières organiques particulières » (MOP) selon une méthode normalisée AFNOR (NF X31-416, 2007).

2.5.4 Méthodes chimiques d'extraction et de séparation des constituants

Contrairement aux méthodes physiques censées ne pas modifier les constituants organiques, les méthodes chimiques permettent de les extraire en les modifiant plus ou moins. Cela veut dire que les composés extraits n'existent pas nécessairement dans le sol, ce qui rend l'interprétation parfois difficile. Toutes les méthodes chimiques s'appliquent au matériau terreux dans sa totalité ou aux fractions séparées par les méthodes physiques.

2.5.5 Méthodes basées sur la solubilisation de composés organiques

Le traitement d'un matériau terreux par un solvant donne deux fractions : l'une soluble pouvant faire l'objet d'une analyse chimique qualitative et quantitative, l'autre insoluble et que l'on ne peut pas véritablement connaître. La nature et la signification des substances dissoutes dépendent du caractère aqueux ou organique du solvant et de son action sur les composés organiques contenus dans le sol (Hayes, 2005).

Solubilisation par des solvants aqueux La solubilisation par l'eau froide extrait des composés organiques qui ne sont pas liés à des phases solides ou dans lesquelles ils se libèrent facilement. Ce sont généralement des molécules telles que des acides organiques aminés ou non aminés, des glucides simples, des

peptides et des polysaccharides de petite taille. Des produits colloïdaux sont également extraits, ce qui nécessite de les distinguer des composés dissous. Il est admis que les matières organiques dissoutes sont celles qui passent à travers d'un filtre dans le diamètre des pores est de 0,45 µm (K. e., 2000)

2.5.6 Méthodes basées sur la destruction des minéraux

Le réactif le plus utilisé est l'acide fluorhydrique qui, en dissolvant les minéraux siliceux La destruction des minéraux permet d'extraire les composés organiques qui leur sont liés, entraîne la libération d'une quantité de carbone organique pouvant atteindre 80 % du carbone organique total ((Eusterhues et al., 2003))

2.5.7 Méthode utilisant la destruction des micro-organismes

Méthode utilisant la destruction des micro – organismes vivants par une fumigation au chloroforme, puis à déterminer la quantité de carbone cela La méthode la plus utilisée consiste à détruire les membranes des micro – organismes puis solubiliser (al V. e., 1987). Cette quantité sert ensuite à calculer la quantité de carbone de la biomasse microbienne. Les constituants organiques moléculaires peuvent se trouver dans le sol sous plusieurs Complexes macromoléculaires insolubles dans l'eau.

2-6 Rôles des matières organiques mortes

Rôles des matières organiques mortes quelques pourcents pour les sols cultivés, les matières organiques du sol jouent plusieurs rôles. Bien que la teneur en carbone organique des sols soit généralement petite, de l'ordre de 1 à 5 %, ces matières organiques jouent des rôles importants dans l'expression des diverses fonctions de ce dernier. Ces rôles sont explicités à l'occasion de l'étude des processus qui gouvernent le fonctionnement des sols. Seule une liste en est donnée dans ce paragraphe

3 Les organismes vivants du sol

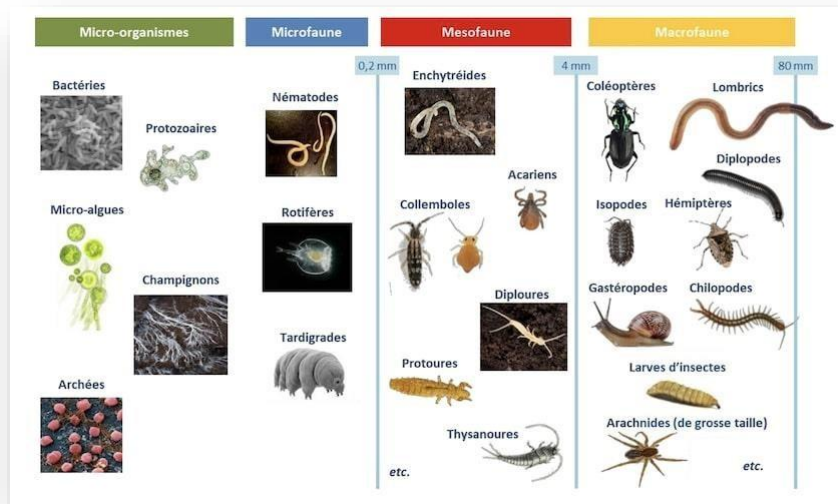


Figure 7: Schéma des différents groupes de la biodiversité du sol classés par taille.

[Source : © Quentin Vincent – Étude des paramètres abiotiques, biotiques et fonctionnels, et de leurs interactions dans des sols délaissés. Thèse de doctorat – Université de Lorraine – <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01896274/document>]

Les organismes du sol sont généralement classés en quatre groupes selon la taille des individus : micro-organismes (ou microflore), microfaune, mésofaune et macrofaune). Cette classification reflète notamment la capacité des différents organismes à circuler dans les pores du sol (Figure 1). De plus, la flore supérieure (arbres, arbustes, plantes herbacées) intervient par sa partie racinaire, qui représente une biomasse importante et assure d'importantes fonctions dans le sol.

Les sections suivantes détaillent les principaux groupes de micro-organismes et de la faune du sol. Il est à noter que les virus ne sont pas considérés comme partie prenante de la biodiversité des sols car, bien que présents dans le milieu et influençant la dynamique des populations des organismes, ce ne sont pas des êtres vivants.

3.1 Caractéristiques générales

Les organismes vivants du sol sont variés et nombreux. On estime le nombre d'espèces à environ 30 000 pour les bactéries, 1 500 000 pour les champignons, 60 000 pour les algues, 10 000 pour les protozoaires, 500 000 pour les nématodes et 3 000 pour les vers de terre

(Pankhurst, 1998). Ces organismes sont de puissants agents de la pédogenèse et participent aussi aux différentes fonctions du sol. Selon les situations, il leur correspond une biomasse de l'ordre de 15% de la masse de matière organique (figure 1-24), mais elle présente une importante

variabilités spatiale et temporelle. Les graines des végétaux supérieurs sont aussi des organismes vivants du sol. On en dénombre en moyenne 5 000 au m² sur 30 cm de profondeur (**Barralis & Chadeuf, 1987**). Elles se trouvent à l'état de dormance et une petite partie, quelques pourcents, germe chaque année. Les caractéristiques anatomiques et physiologiques des organismes vivants ainsi que la dynamique de leurs populations sont décrites, analysées et discutées dans les ouvrages de microbiologie et d'écologie du sol (exemples : Alexander, 1961 ; Dommergues et Mangen 1970 ; Coyne, 1999 ; Lavelle et Spain, 2001) **LIVRE LE SOL RAOUL CALVET**

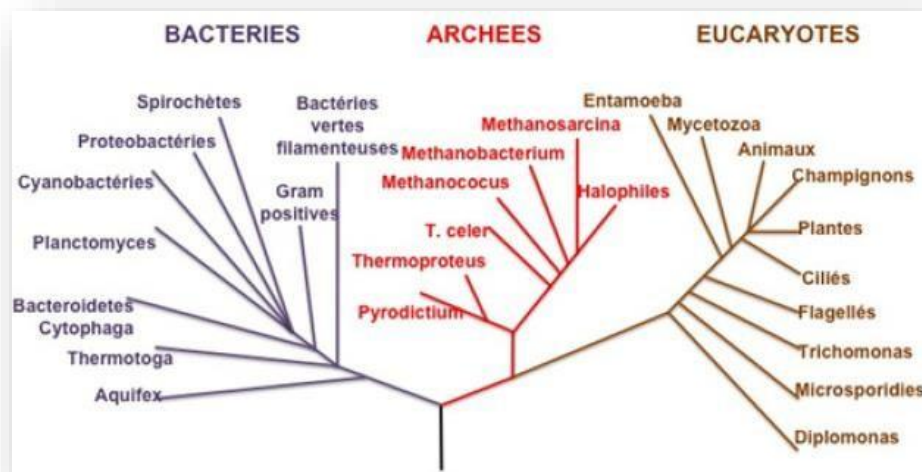


Figure 8: Arbre phylogénétique de la vie

Auteurs : Eric Blanchart - Joséphine Peigné - Jean-François Vian

On peut trouver dans les sols les trois grands domaines du vivant : les bactéries et archées (constituées de cellules sans noyau), les eucaryotes (constituées de cellules avec noyau, pouvant être unicellulaires comme les protozoaires ou pluricellulaires comme les animaux, les plantes et les champignons).

3.1.1 Les facteurs agissant sur les organismes vivants

Les facteurs agissant sur les organismes vivants Leur abondance et leur nature dépendent du type de sol, de la végétation, du climat et des diverses actions anthropiques qui ont une influence sur leur croissance et leur activité. Les sols, ces facteurs sont les suivants : L'état d'hydratation du sol : il permet Concernant de distinguer (**Lavelle P & Spain, 2001**) les organismes aquatiques (les micro-organismes) et les organismes qui ont besoin d'air et d'eau : la mésofaune, la macrofaune et les racines.

- La température : certains organismes étant plus thermophiles que d'autres. Les sources d'éléments nutritifs et d'énergie : elles influencent beaucoup la croissance et l'activité des populations selon leur capacité adaptative, qu'ils soient du type « < r » ou « < K » (pour les micro-organismes).

Cela explique l'influence de la nature des couverts végétaux et des divers apports de matières organiques exogènes et de produits fertilisants.

-Les caractéristiques de la structure du sol: elles fixent l'espace poral accessible et disponible aux organismes:

- pores de diamètre inférieur à 20 μm - 50 μm → micro - organismes;
- pores de diamètre compris entre 0,1 mm et 2 mm → mésofaune;
- pores de diamètre supérieur à 2 mm → macrofaune.

Il est généralement admis que les spores de diamètre inférieur à 0,2 μm ne sont pas accessibles, ce qui a des conséquences sur l'activité biologique (partie 2 , chapitre 3) . La structure et ses variations sont donc un facteur important du fonctionnement biologique du sol.

3.1.2 Répartition des organismes vivants dans le sol

Répartition des organismes vivants dans les solutions dues aux interventions culturales. Elle dépend de l'accessibilité des spores, mais aussi de l'hétérogénéité de la répartition des végétaux et de toutes les modifications. La répartition des organismes vivants dans le sol est hétérogène en raison de la structure de facteurs physiques, trophiques et physicochimiques dont l'action permet d'identifier des sphères d'influence, comme l'ont proposé Beare et al. , 1995 (cités par Pankhurst et al., actuelles, on peut considérer que les zones où l'activité des organismes présente une unité sont les suivantes : La surface du sol où les litières et les résidus végétaux sont accumulés.

- Dans le sol:

- la zone de quelques centimètres de diamètre autour des particules de matières organiques, la détritosphère.
- les espaces interagrégats et intra -agrégats.
- la zone d'influence des galeries de vers de terre, la drilosphère;
- la zone d'influence autour des racines vivantes, la rhizosphère. Chacun de ces volumes joue un rôle important dans les processus de transformation des matières organiques, de biodisponibilité des ions et des molécules non ionisées, de genèse de la structure des sols et, plus généralement, de la pédogenèse.

3.2 Les micro-organismes du sol

Les micro-organismes du sol sont extrêmement abondants et d'une grande diversité taxonomique et fonctionnelle. Ils comprennent des bactéries, des champignons, des microalgues, des

archées et des protistes. Le fonctionnement biologique des sols est fortement lié à l'activité microbienne, ce qui confère à ces micro-organismes un rôle majeur dans de nombreuses fonctions du sol comme nous le verrons ci-après.

3.2.1 Les bactéries

Les bactéries sont de loin les microorganismes du sol les plus nombreux et les plus divers. Elles présentent une grande variété de formes et de tailles (majoritairement inférieures à 2 μm). On estime qu'un gramme de sol renferme environ un milliard de bactéries et entre 2000 et 10000 espèces bactériennes selon leur état de santé. Les études de métagénomique (Lire Code-barres ADN pour caractériser la biodiversité) sur différents sols (prairies, forêts, sols arides, agricoles *etc.*), ont permis d'identifier des séquences appartenant aux *Proteobacteria* (40%), aux *Acidobacteria* (20%) et aux *Actinobacteria* (13%).

Les bactéries jouent un rôle clé notamment dans le recyclage des nutriments, le développement (par la formation de symbioses), ou encore la structuration du sol. Elles contribuent également à la régulation des maladies, et à la dépollution des sols contaminés. Elles interagissent dans la rhizosphère des plantes (région du sol directement formée et fortement influencée par l'association des racines et des micro-organismes du sol) avec lesquelles elles peuvent former des **symbioses** avec des végétaux et elles peuvent être également **pathogènes**, autant pour les animaux que pour les végétaux.

C'est avant tout par leurs fonctions de **minéralisation** (minéralisation de la matière organique, oxydo-réduction de composés inorganiques, solubilisation ou précipitation de minéraux, transformation de composés organiques plus ou moins récalcitrants ...), que les bactéries jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement des sols. Elles sont ainsi à la base de la régulation des principaux cycles biogéochimiques des sols (carbone, azote, phosphore, soufre...) et elles sont capables de:

- Réduire les sulfates en sulfites et sulfides (bactéries sulfato-réductrices),
- Oxyder le soufre (*Thiobacillus* par exemple),
- Fixer l'azote atmosphérique (diazotrophie seule ou en symbiose avec des plantes),
- Produire des nitrates (bactéries nitrifiantes),
- Rendre disponible le phosphore (par la phosphatase alcaline par exemple)⁹ *etc.*

De plus, certaines bactéries, notamment celles dites PGPR (*Plant Growth Promoting Rhizobacteria*, des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes), ont la **capacité de développer**

des symbioses avec les plantes, qui leur permettent d'augmenter la mise à disposition d'éléments nutritifs pour leur croissance.

Les bactéries peuvent également favoriser la dépollution des sols contaminés par des métaux lourds (on parle d'éléments traces métalliques ou ETM) en modifiant leur disponibilité mais interviennent surtout dans la dépollution des composés organiques tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) en les minéralisant au moins partiellement.

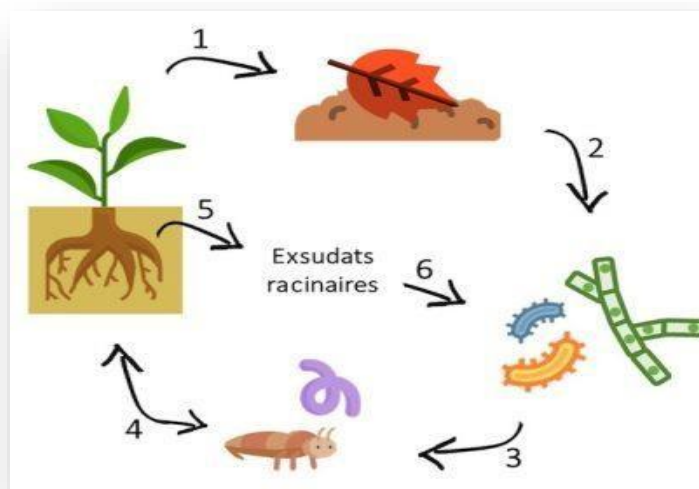


Figure 9: Schéma simplifié de la boucle microbienne au sein de la rhizosphère de plantes

[Source : © Quentin Vincent]

Les biofilms que forment les bactéries dans le sol constituent une quantité de biomasse microbienne très importante qui y immobilise de grandes quantités de nutriments. Divers processus tels que la prédation de ces micro-organismes par les protozoaires, nématodes ou microarthropodes, peuvent conduire à la libération prolongée ou rapide de ces nutriments immobilisés en excès. Cette remobilisation de nutriments est ainsi nommée la «boucle microbienne», considérée comme un point de contrôle primaire de la disponibilité des nutriments au sein de la rhizosphère.

3.2.2 Les champignons

Les champignons sont communément classés en deux groupes : les levures, unicellulaires, et les champignons, pluricellulaires, qui forment des ramifications appelées hyphes. Ce sont ces fins filaments blancs que l'on observe très souvent à la surface du sol ou des feuilles lors d'une promenade en forêt. Ces filaments constituent une biomasse très importante (plusieurs tonnes par hectare) et aussi

un réseau impressionnant circulant à travers le sol sur de longues distances : un mètre carré de sol de prairie ou de forêt contient plusieurs kilomètres d'hyphes.

La grande diversité des champignons a conduit à les classer en groupes taxonomiques aux noms latins souvent complexes, tels que chytridiomycètes, glomeromycètes, les basidiomycètes, les ascomycètes, mucoromycètes (anciennement zygomycètes). Avec respectivement 56%, 31% et 10%, ces trois derniers groupes représentent la quasi-totalité de la communauté fongique du sol. Pour des raisons pratiques, les champignons peuvent également être classés selon leur mode d'alimentation dans le sol : saprophyte, mycorhizien, endophyte et pathogène.



3.2.3 Les champignons saprophytes



Figure 21: Champignon saprophyte vivant de manière parasite indifféremment sur le sol ou les végétaux (ici le Phellinus)

[Source : © Quentin Vincent]

Les champignons saprophytes se nourrissent de matières organiques (MO) mortes déjà plus ou moins décomposées ou dégradées par d'autres organismes. Ces MOM leur fournissent les éléments nutritifs qui sont prédigérés grâce à l'excrétion d'enzymes extracellulaires fongiques. Les saprophytes représentent, en nombre estimé d'organismes, environ 44% de la communauté fongique, avec une faible variation entre les différents types d'écosystème. Pour les champignons aussi, une

classification plus fonctionnelle a été développée : ce sont les pourritures blanches, brunes et molles. Ces appellations sont directement liées à la décomposition des litières des plantes qui varient suivant les espèces. Cette classification fait référence à des caractéristiques visuelles de la dégradation de la lignine, et il faut noter qu'elles sont en réalité sous le contrôle de leur capacité de dégradation de la cellulose et l'hémicellulose, deux éléments majeurs constitutifs des plantes et donc de leur litière.

3.2.3 Les champignons mycorhiziens

Les champignons mycorhiziens forment des associations symbiotiques avec les racines des plantes. Ces symbioses plante-champignon sont extrêmement répandues et concernent 80 à 90% des espèces végétales. Dans cette relation à bénéfice réciproque, le champignon reçoit de la plante des éléments nécessaires à sa croissance comme les sucres et les vitamines. Il absorbe de son côté divers éléments du sol, dont le phosphore, qu'il transfère en retour à la plante et accroît ainsi considérablement le volume de sol exploré par les plantes pour leur croissance.

On distingue deux grands groupes de champignons mycorhiziens : les ectomycorhiziens et les endomycorhiziens. Les champignons ectomycorhiziens forment un réseau d'hyphes (réseau de Hartig) à la surface des racines des plantes colonisées. Cela forme un manchon périphérique qui sert de matrice d'échange entre la plante et le champignon, et ce dernier est alors capable de s'insérer entre les cellules corticales végétales sans pouvoir toutefois y pénétrer. Les hôtes végétaux de ces champignons sont surtout de type arbustif et arboré. Plus de 95% des ectomycorhizes appartiennent au groupe des basidiomycètes.

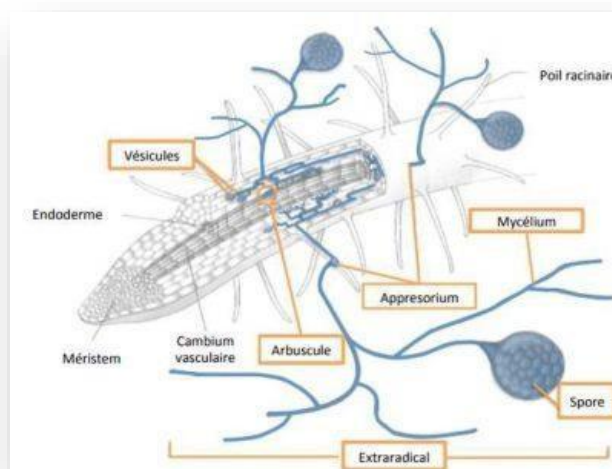


Figure 22: Coupe de racine colonisée avec les différentes structures endomycorhiziennes.

[Source : © J. André Fortin, Christian Plenchette, Yves Piché – LES MYCORHIZES – L'essor de la nouvelle révolution verte.]

Les champignons endomycorhiziens forment des structures intracellulaires, les hyphes

entrant à l'intérieur des cellules racinaires pour effectuer des échanges étroits avec la plante. On distingue 3 types d'endomycorhizes : éricoïdes, d'orchidées et à arbuscules. Les hyphes des champignons mycorhiziens à arbuscules (MA) forment des arbuscules dans les cellules du cortex racinaire, permettant ainsi des échanges directs entre racine et champignon. Des hyphes extraradiculaires se développent aussi sur plusieurs centimètres à l'extérieur de la racine, explorant le sol alentour, et apportant une multitude de spores.

Les champignons MA (exclusivement des glomeromycètes) sont des symbiotrophes obligatoires puisque sans l'interaction avec la plante hôte qui leur fournit des éléments carbonés, ils ne peuvent accomplir leur cycle de développement. Pour la plante, le principal avantage est une meilleure nutrition hydrique et minérale, en particulier en phosphore apporté par le champignon, ce qui se traduit le plus souvent par une augmentation de la biomasse végétale par rapport à une plante non colonisée.

3.2.4 Les champignons endophytes

Les champignons endophytes (racinaires) ont un mode de vie qui se caractérise par la colonisation des structures internes d'une plante de manière asymptomatique. En effet, ces champignons prélèvent des nutriments de l'hôte sans que ce dernier ne présente de signes de maladie et demeurent intégralement dans les tissus racinaires, à l'inverse des champignons mycorhiziens qui colonisent les plantes tout en se développant dans la rhizosphère. Les champignons endophytes sont très majoritairement issus des ascomycètes et basidiomycètes, dont les trois membres les plus connus sont les DSE (*Dark Septate Endophytes*), les Sebacinales et les *Trichoderma*. Comme les champignons mycorhiziens, les champignons endophytes favorisent la croissance et la résistance aux stress abiotiques de la plante hôte.

3.2.5 Les champignons pathogènes/parasites

Les champignons pathogènes peuvent être principalement des parasites d'autres champignons, des pathogènes des animaux ou des pathogènes des plantes (phytopathogènes). Ces champignons phytopathogènes du sol peuvent infecter les racines, ou s'introduire dans ses systèmes vasculaires et coloniser l'ensemble de l'organisme en remontant les vaisseaux de xylème, même s'ils s'attaquent surtout aux parties aériennes.

3.3 La faune du sol

Si on reprend l'image de l'observation du sol avec une bêche, on peut facilement distinguer des animaux de taille très variable : celle-ci sert à classer la faune du sol en quatre groupes : microfaune, mésofaune, macrofaune et mégafaune. On définit la faune du sol comme l'ensemble des animaux qui ont au moins une partie de leur cycle biologique dans le sol. Cette faune représente

près d'un quart (23%) de la diversité totale des organismes vivants décrite à ce jour avec des distributions horizontale et verticale très hétérogènes. Ainsi, dans les sols bruns des régions tempérées, la faune se localise principalement dans les 10 à 20 premiers centimètres du sol et ses annexes (litière, bois mort *etc.*).

3.3.1 Microfaune (Taille 0,2mm)

Invisible à l'œil nu, la microfaune est constituée d'individus généralement plus petits que 200µm qui peuvent donc vivre dans la porosité capillaire du sol. Les rotifères et les tardigrades font partie de la microfaune du sol, mais ce sont surtout les protozoaires et nématodes qui constituent l'essentiel de cette microfaune. En effet, les protozoaires présentent une abondance variant de 100 à 1000 millions d'individus au mètre carré. Ce groupe est très diversifiée de même que leur nutrition, mais la plupart des protozoaires peuvent ingérer des particules et se nourrissent de bactéries. Ces organismes, comme les nématodes, vivent dans le film d'eau entourant les particules du sol. Environ 30 000 espèces de nématodes sont connues à ce jour, mais cela ne représenterait qu'environ 5% du nombre d'espèces existantes. Ils sont classés en cinq groupes trophiques : les bactérivores, les fongivores, les omnivores (se nourrissent de bactéries et de champignons), les phytoparasites (parasites des plantes) et les prédateurs (se nourrissent d'autres animaux) Les nématodes jouent un rôle clé dans la minéralisation et la décomposition des matières organiques et dans la régulation des communautés microbiennes.

3.3.2 Mésofaune mm Taille <4 mm)

La mésofaune (ou microarthropodes ou encore méso-invertébrés) est constituée d'animaux ayant une taille entre 0,2 à 4 mm environ. Les collemboles et les acariens sont les deux principaux représentants de ce groupe. Les protoures, diploures, thysanoures, les enchytraéides, et les myriapodes symphiles, font également partie de la mésofaune mais leur abondance est bien plus faible.

Les collemboles sont probablement le groupe d'hexapode le plus abondant sur Terre (jusqu'à 200'000 individus au m⁻² dans des sols bruns non cultivés des régions tempérées) et avec une forte diversité (environ 8000 espèces connues, dont plus de 2000 en Europe. Les collemboles sont essentiellement décomposeurs, se nourrissant d'hyphes mycéliens et de matières organiques, ils se retrouvent donc surtout dans le sol et les litières (feuilles et bois morts). Ils ont ainsi un rôle majeur dans les processus de décomposition de la litière par micro-fragmentation et brassage de la matière organique.

3.3.3 La macrofaune (4 mm taille <80mm)

La macrofaune (4 mm < taille < 80 mm) Elle est elle aussi constituée d'une très grande variété

d'organismes tels que des vers, des insectes, des myriapodes, des mollusques et des araignées. Les vers de terre représentent de kilogrammes / hectare) que par leur rôle dans les processus de transport et de biotransformation (probablement la catégorie la plus importante, tant par leur biomasse (plusieurs centaines physiologiques très variées ont été inventoriées, décrites et réparties en trois groupes éco formation se déroulant dans le sol. De nombreuses espèces possédant des caractéristiques logiques (BouchéM, 1972). Les espèces épigées sont localisées près de la surface du sol, tandis que les espèces endogées vivent en profondeur et que les espèces anéciques se déplacent dans tout le profil du sol. La biomasse de vers de terre dépend de la nature du sol, de la végétation, du climat et des pratiques culturales pour les sols cultivés. Elle est de 30 g à 100 g / m², les petites valeurs étant observées sous les climats froids et tropicaux et les plus élevées dans les milieux tempérés (Lavelle P & Spain, 2001). Les systèmes de culture tendant à maintenir ou à augmenter la quantité de matières organiques dans le sol conduisent à des biomasses de vers de terre plus grandes que dans les systèmes conventionnels (Pelosiet al., 2009 ; Overstreet et al., 2010). Les besoins en eau des vers de terre font qu'ils se déplacent plus ou moins en profondeur selon l'état de sécheresse de la surface du sol. Ils ingèrent de grandes quantités de terre, assurent un étroit mélange entre les minéraux et les matières organiques et ont ainsi une influence marquée sur l'activité des micro - organismes du sol.

3.3.4 La mégafaune (80 mm < taille)

Ce sont les animaux de grande taille (vertébrés, reptiles, amphibiens) qui utilisent le sol comme habitat.

3.4 Les racines vivantes


Les racines vivantes représentent une masse de carbone de l'ordre de 5 % à 15 % de la masse totale de carbone organique du sol, différentes selon les écosystèmes. En moyenne, la masse de racines est de l'ordre de 0,2 kg m⁻² pour les cultures et de 5 kg m⁻² pour les forêts. (Gregory, 2006)

3.5 Les rôles des organismes vivants

Les organismes vivants du sol participent aux cycles biogéochimiques des éléments, les conséquences agronomiques et environnementales sont étudiées dans la troisième partie de cet ouvrage. Le tableau donne une présentation schématique de leurs différents rôles. Tableau : Principales interventions des organismes vivants.

Table 17: Principales interventions des organismes vivants dans la dynamique des éléments nutritifs et dans la formation de la structure des sols (présentation adaptée d'après Linden et al . , 1994

	Dynamique des éléments chimiques	Formation de la structure des sols
Bactéries, Champignons	Biodégradation des matières organique Minéralisation des formes organiques de C, N, P et S Immobilisation des formes inorganiques de C, N, P et S par l'organisation microbienne	Production de composés organiques liants (polysaccharides) Production par les champignons des filaments (hyphes mycéliennes) qui agrègent les particules minérales et les micro agrégats
Microfaune	Régulation des populations bactériennes et fongiques Intervention dans le recyclage des éléments nutritifs	Action indirecte sur la structure par son influence sur les bactéries et les champignons Production de matières fécales
Mésafaune	Régulation des population bactériennes et fongiques Intervention dans le recyclage des éléments nutritifs Fragmentation des résidus végétaux	Action indirecte sur la structure par son influence sur les bactéries et les champignons Formation de pores Production de matières fécales
Macrofaune	Fragmentation des résidus	Mélange des matières organiques et
	végétaux Interaction avec l'activité des micro-organismes	des minéraux Transport des matières organiques Formation de pores Production de matières fécales
Racine vivantes	Absorption des éléments nutritifs Intervention sur la dynamique des nutritifs le pH et les composés organiques excrétés Milieux favorables aux micro-organismes (rhizosphère)	Production de polysaccharides Formation de pores Action de compression



Chapitre II
Milieu physique

1 Situation géographique :

Le Honda signifie des plaines des plaine entourées par des montagnes (FAO, 1973) la plaine du Honda est insérée dans un cadre montagneux , elle constitue un ensemble de Plaine située à l'est et du nord d'une vaste sebka , plaine qu'enrichissent de leurs eaux les rivières originaire du réseaux hydrographique, dutelleaunordetdel'atlassaharienausud(MIMOUNE,1995) LarégiondeM'sila est située au sud - est de l'Algérie , elle fait partie du bassin endoréique du Honda caractérise par l'étendue de ses plaines arides , riche en sels et à couverts végétales clairsemé . La zone d'étude est située dans le périmètre du ksob qui se trouve au nord duchott.

Nossitesd'étudeappartiennentàlapépinièredeMsila(Msilavert)situéenhorsdechatteel Hodna au sud de barrage de Ksob (voir figure13)



Figure 23: Situation géographique de la zone d'étude

2. Les caractéristiques physiques

2.1 Géomorphologie

Le Hodna par son relief et par sa structure est une vaste dépression topographique et également un important bassin tectonique dont l'origine remonte au plissement pyrénéen (lutécien supérieure) qui a donné naissance aux premières chaînes tertiaires avec une dépression dont le djebel Meharga est devenu le centre.

C'est exactement la surface sautée entre les chaînes des montagnes qui entourent le bassin versant du Hodna et le chott lui-même, qu'est au point de vue agricole le plus intéressant (FAO, 1973) Le domaine d'étude est sauté entre la chaîne de montagne qui entoure le bassin versant du Hodna et le chott lui-même, qu'est au point de vue agricole le plus intéressant. On distingue quatre ensembles géomorphologiques :

2.1.1 Cadre montagneux

Les monts du Hodna formant une barrière orientée Est-Ouest qui réduit les influences Nord de M'sila culmine à 1863 m. Par ailleurs, cet écran dont l'altitude varie entre 1400 à 2000 m.

2.1.2. Les piémonts

C'est la zone de transition entre la montagne et la plaine, qui s'allonge d'Ouest en Est aux pieds des montagnes du versant Nord entre les cotes 441 m et 500 m.

C'est un ensemble correspondant de collines qui sont découpées et ravinées par les oueds qui descendent des montagnes (les oueds de M'sila et Selmane) et par des réseaux temporaires qui coulent après les pluies.

Les collines sont représentées par des plans inclinés et constituées par des dépôts Miocène elles plongent vers le centre de la cuvette sous les alluvions récentes.

2.1.3. Les plaines

La plaine de M'sila couvre une superficie d'environ 500 km². Elle est limitée au nord et à l'est par les glaciers. Au Sud, la courbe de niveau 400 m marque grossièrement le passage de la plaine au chott d'où une pente de 0,55%.

2.1.4. Chott el Hodna

Le chott el Hodna fait partie d'une série de chotts qui s'est développée là où convergent les eaux issues de l'Atlas saharien au sud et l'Atlas tellien au nord. Le chott a une forme elliptique, à une eau salée et s'étend sur 77 km de long et 19 km de large. Son altitude moyenne est de 392 m et retenue entre les coordonnées géographiques suivantes : 35 ° 18'N - 35 ° 32'N et 4 ° 06'E - 5 ° 15'E

Nos site d'étude appartient à la zone des piémonts, représenté par les glacié au cone d'accumulation pour le site naturel , par contre le cite cultive est située sur un lit caillouteux

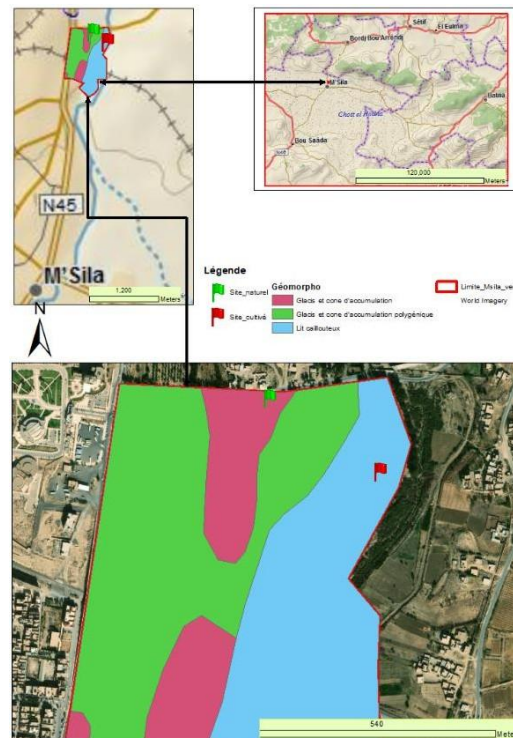


Figure 24 : La géomorphologie de la zone d'étude

2.2 Hydrologie

Le régime hydrologique du Hodna est lié au régime pluviométrique caractérisé par une forte irrégularité. La majorité des cours d'eau n'ont pas de débits permanents à l'exception de l'oued el Han, k'sob, selmane, berhoum, soubella alimentés par des sources et retenues par des « ceds » traditionnelle, conçues pour stocker de l'eau pour l'irrigation. Le bassin versant présente environ 1/5 de la totalité du bassin hydrologique du Hodna. Le sous-sol renferme beaucoup de formations aquifères répartis en plusieurs niveaux (FAO, 1973). Les principales nappes aquifères des bassins de Hodna sont, la nappe phréatique qui se trouve à une profondeur supérieure à 40 cm, le taux de salinité de l'eau est de (moins 2g/l au nord) et la nappe captive profonde de 150 à 250 m, elle est peu chargée en sels (0,582g/l). (MIMOUNE, 1995). Les réseaux hydrographiques très diversifiés, il y a au moins 22 cours d'eau qui assurent l'alimentation du chott. (BOUMEZBEUR, 2002)

2.3 Géologie

La région de Hodna appartient selon (GUIRARD, 1973) à un domaine dit pré-atlasique, le bassin de Hodna est situé au croisement de systèmes structuraux très différents : l'atlasien au nord et l'atlas saharien au sud, elle présente les formations suivantes :

2.3.1 Lessecondaire

- a- Trias : présente une lithologie composée de marnes et sels
- b- Jurassique: n'affleure qu'à la faveur d'accidents majeurs dans la partie orientale des monts des Hodna, Il est caractérisé par la présence de calcaire.
- c- Crétacé : il forme par des bancs de marnes et de grès avec interaction de calcaire.

2.3.2 Le tertiaire

- a. Eocène : les formations paléogènes affleurent en bandes plus ou moins parallèles sur le plan méridional des monts du Hodna. Il est présent par des grès rouges, des argilles varices, des calcaires et des conglomérats.
- b. Oligocène continental : il est formé par des conglomérats, des grès fins friables et des marnes rougeâtres.
- c. Miocène : il est constitué d'une alternance de marnes gypseuses avec des grès et calcaire.

2.3.3 Le quaternaire

Est présent par d'anciennes alluvions et des sédiments fins.

Nos sites font partie de quaternaire

2.4 Pédologie

Selon l'étude pédologique de là (FAO, 1973) les sols de la région du Hodna sont les suivants :

2.4.1 Les sols minéraux bruts

Les sols minéraux bruts: d'apports alluviaux qui sont des sols très évolués, constitués de profils de type (A) C. (A) R ou R. la matière organique se trouve sous forme de traces dans les 20 cm supérieures et atteint là 1,5 %, dans les 2-3 cm supérieures.

2.4.2 Les sols peu évolués

Ce sont des sols caractérisés par une altération physique plus poussée. Le profil est de type AC. La matière organique peut exister en quantités élevées dans les 20 cm supérieures.

2.4.3 Les sols calcimagnésiques

Ces types de sols sont déterminés par la présence d'ions alcalino-terreux dans les horizons supérieurs et dans la partie inférieure si elle existe le profil de ces sols est de type AR ou AC ou A(B)R ou A(B)C.

2.4.4 Les sols halomorphes

Ces types de sols sont caractérisés par la présence d'une forte teneur en sels de sodium, et/ou par le sodium échangeable « sols sodiques ».

2.4.5 Les sols hydromorphes

Ces types de sols sont caractérisés par une hydrophobie importante. L'excès d'eau peut se traduire par l'engorgement permanent d'une partie ou de la totalité du profil. L'eau peut provenir de la nappe phréatique ou de la surface en condition de drainage imparfait. L'hydromorphie est caractérisée par l'horizon (Gley) ou de pseudogley.

2.4.6 Les sols isohumiques (Siérozem)

Ils sont des sols à profil de type A(B)C, et parfois ABC le type de profil AC existe rarement. On peut rencontrer en profondeur un horizon de dogley ou un horizon à croûte calcaire ou gypseuse ou encore la matière organique est incorporée dans tout le profil, et est très évoluée dans les horizons supérieurs.

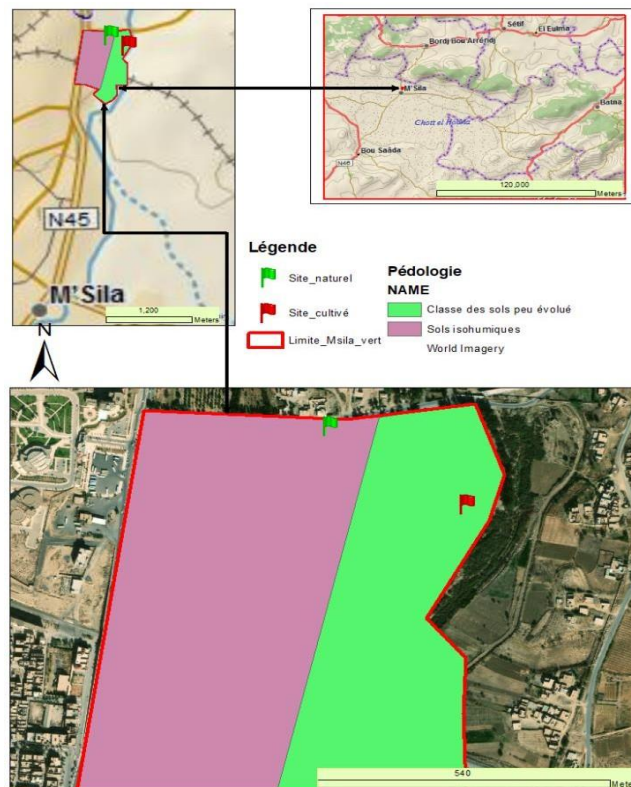


Figure 25 : La pédologie de la zone d'étude

2.5 Climat

La région d'étude est une partie du sous bassin versant d'oued k'sob (M'sila) lequel fait partie du bassin versant endoréique Hodnéen. Dans cette étude, on procédera à des calculs à partir des données météorologiques disponibles. Le Hodna est caractérisé par des conditions climatiques

sévères un été chaud et sec, un hiver et des saisons intermédiaire troublés par le passage sur la méditerranée et plus rarement sur le Sahara du nord, de perturbations cycloniques donnant un régime des vents variables et quelquefois des pluies (MIMOUNE, 1995) Les principaux éléments du climat (pluies , température , vent ...) sont étudiés sur la base des données récoltées auprès de la station météorologique de M'sila (1998-2014).

2.5.1 Les précipitations

On distingue sous le terme général de pluviométrie la quantité totale de précipitation reçue par unité de surface et unité de temps. Il constitue un facteur écologique d'importance fondamentale. (RAMADE, 2003) Sur la région d'El - Hodna, on relève un gradient de 40mm pour 100mm la partie Nord et un gradient de 20mm pour la partie Sud (Djebaili, 1984).

Les précipitations pour la station météorologique de M'sila s'étalon sur la période allant de 2006 à 2016. La variation interannuelle des précipitations est présentée dans le tableau suivant :

Table 18: Répartitions interannuelle des précipitations (mm).

Mois	J	F	M	A	M	J	JT	A	S	O	N	D	Total
Station météorologique de M'sila (2006-2016)													
441	12,90	16,00	14,00	31,67	16,55	9,00	6,89	5,50	21,27	23,50	15,10	16,11	188,49
La zone d'étude													
500	13,64	16,91	14,80	33,48	17,49	9,51	7,28	5,81	22,49	24,84	15,96	17,03	218,80

Les quantités pluviométriques sont réparties d'une manière hétérogène où la période pluvieuse s'étend de septembre jusqu'à Mai.

Afin de connaître la quantité de précipitation aux différentes phases de développement de la végétation, nous avons calculé le pourcentage des précipitations de chaque saison par rapport au total annuel.

2.5.2 Température

La température représente un facteur limitant de premier ordre important car elle conditionne la répartition de la totalité des espèces et des communautés d'être vivant dans la biosphère (RAMADE, 2003)

L'étude de la variation de la température dans le temps a une grande importance dans l'évolution de la matière organique des faits qu'elle constitue le paramètre principal qui conduit le phénomène de dégradation de la matière organique, autrement dit, elle a une grande influence sur le bilan humique. Elle intervient aussi dans la répartition de la totalité des espèces et des communautés d'être vivant dans la biosphère.

Les températures moyen minimales et maximales (2006-2016). Sont représenté dans le tableau suivant :

**Table 19: Les températures moyen minimales et maximales (C) . Mois J F M J M A J U M :
Températures moyennes mensuelles des maximal.**

Mois	J	F	M	A	M	J	JT	A	S	O	N	D	Moy
Station météorologique de M'sila (2006-2016) à 441m d'altitude													
T.min	-1,55	-1,76	0,55455	4,6	9,00909	14,2182	19,2091	19,7727	14,0545	8,70909	3,17273	-0,5909	12,9
T.max	19,79	21,6818	27,7182	32,1636	36,8	40,9091	43,7	43,0818	38,2636	33,6364	24,6545	19,5818	25,6
M+m/2	8,70	10,3	13,9	16,8	22	27,8	31,6	31	25,7	20,2	13,5	9,4	19,2
Mois	J	F	M	A	M	J	JT	A	S	O	N	D	Moy
Station météorologique de M'sila (2006-2016) à 500m d'altitude													
Tmin	-1,78	-2,00	0,32	4,36	8,77	13,98	18,97	19,54	13,82	8,47	2,94	-0,83	7,21
Tmax	19,38	21,27	27,31	31,75	36,39	40,50	43,29	42,67	37,85	33,22	24,24	19,17	31,42
Moy	8,80	9,64	13,81	18,06	22,58	27,24	31,13	31,10	25,83	20,85	13,59	9,17	19,32

TABLEAU DU QUOTIENT PLUVIOTHERMIQUE

Données	P (mm)	m(°C)	M(°C)	M-m(°C)	Q2	EtageBioclimatique
station 441	188,49	271,39	316,85	45,46	14,22	aride inferieure
station 500	218,80	271,15	316,44	45,29	16,57	aride inferieure

M : Températures moyennes mensuelles des maximal.

m : Températures moyennes mensuelles des minimal

M + m / 2 : Températures moyennes mensuelles (T Max + T min / 2)

L'analyse des données climatique montre que le maximum des températures moyennes mensuelles est enregistré au niveau de la station 441 courant le mois de juillet avec une valeur de 43.7 °C contre un minimum de -1.76°C en Février. Par ailleurs, les températures enregistrées au niveau de la station 500 sont respectivement de 43.29° C pour le mois de juillet et de -2.00 le mois de Février.

En ce qui concerne les moyennes annuelles de températures pour l'année (2006-2016) au niveau des mêmes stations, elles sont de 441 est 45.46, et la station 500 est 45.29.

❖ Les températures maximales décroissent de **0,7°C** avec l'élévation de **100m** d'altitude.

Dans notre zone d'étude:

0,7°C → 100m

X°C → 375,71m

Donc:
$$T^{\circ}C = \frac{375.71 \times 0,7}{100} = 2.63^{\circ}C$$

Donc, chaque valeur de la T°C max mensuelle de station de M'sila à **441m** d'altitude diminue de **2,63 °C** respectivement pour déterminer les valeurs de T°C max mensuelles de la région

de 441m et 500m.

❖ Les températures minimales décroissent de **0,4 °C** pour **100m** d'altitude.

Dans notre zone d'étude:

0,4→100m

X°C→375,71m.

Donc:
$$T^{\circ}\text{C} = \frac{375,71 \times 0,4}{100} = 1,50^{\circ}\text{C}$$

❖ Les températures moyennes décroissent de **0,55°C** pour une hausse de **100m** d'altitude.

Dans notre zone d'étude:

0,55°C→100m

X°C→375,71m

Donc:
$$T^{\circ}\text{C} = \frac{375,71 \times 0,55}{100} = 2,07^{\circ}\text{C}$$

Donc, chaque valeur de la **T°C** moyenne de la station de M'sila à **441m** d'altitude diminue de **2,07°C** respectivement pour les valeurs de **T°C** moyenne de la région de Hammam Dalaa.

2.5.3 Les autres facteurs climatiques

2.5.3.1 Les vents

Le vent est un phénomène continu au désert ou il joue un rôle considérable en provoquant une érosion intense grâce au particule sableuse qu'il transporte (**RAMADE, 2003**).

Les vents dominants qui soufflent dans la région de M'sila sont :

Le vent d'ouest, dit dhahraoui est pluvieux, il est fréquent en automne, en hiver et au printemps. Le vent du Nord (N); est dit Bahriest moins fréquent, il est froid et sec. Les vents à directions variable (Var), qui soufflent surtout pendant les saisons sèches. Lesiroco: vent chaud et sec, souffle général du sud, il entrave le développement des cultures il constitue la cause du faible tapis végétal dans la wilaya de m'sila pour ce que les vents chauds et secs accentuent le dessèchement des substrats et limite l'installation de la végétation (**RAMADE, 2003**)

Les vents du Nord sont fréquents pendant l'hiver, alors que ceux du Nord - est bien repartis toute l'année accèdent facilement dans la cuvette du Hodna par la vallée de l'oued Barika. Ceux du sud n'atteignent le Hodna qu'en été, période durant laquelle ils soufflent avec des rafales brûlantes.

Table 20: Le vent la période (2006-2016) de la région de M'sila

	JAN	FEB	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
2006	4	4	5	5	4	6	3	4	3	4	4	3
2007	3	5	5	5	5	5	4	4	3	4	4	5
2008	3	4	5	6	5	5	4	3	4	2	3	3
2010	4	4	4	4	5	4	3	3	4	3	4	3
2011	3	5	4	4	5	4	5	3	4	3	4	4
2012	4	5	5	6	4	4	5	5	4	5	4	4
2013	5	5	7	5	6	5	4	4	4	4	5	3
2014	4	4	5	5	5	5	4	4	3	3	4	5
2015	5	6	6	4	5	4	4	4	5	4	4	2
2016	3	5	5	5	5	5	4	4	4	4	5	4
Moyenn e	3,72	3,54	4	3,63	3,81	4,63	5	4,81	4,81	4,54	4	4

Les vents soufflent à leurs maximums pendant le mois d'octobre avec 3,69 m/s. le Sirocco qui sévit à partir du printemps accroît le déficit hydrique des cultures.

2.5.3.2 L'humidité

L'humidité relative moyenne mensuelle prend une valeur de 35% au mois de juillet qui est considéré comme le mois le plus sec alors que le plus humide est décembre avec une valeur de 75,62%.

Table 21: : Station météorologique de M’sila HUMIDITE de l’air- MOYENNES MENSUELLES 2006-2016 (%)

	JAN	FE V	MA R	AV R	MA I	JUI N	JUI L	AU T	SEP	OC T	NO V	DE C
2006	76	80	71	51	51	34	38	40	54	51	71	82
2007	75	71	69	71	55	46	33	37	59	67	75	76
2008	73	63	63	48	49	44	37	41	55	78	80	88
2009	86	79	69	72	43	38	30	40	63	60	66	77
2010	76	73	65	64	53	42	33	37	46	62	72	65
2011	70	68	65	61	54	47	36	35	48	61	76	77
2012	79	67	56	71	42	33	25	25	39	57	76	76
2013	74	67	57	51	49	39	32	34	48	50	67	81
2014	77	64	61	44	43	41	28	31	43	45	64	76
2015	71	73	59	46	39	36	28	36	47	62	63	67
2016	65	61	53	50	40	30	26	30	42	48	65	69
Moyenne	74.7	69.6	62.5	57.1	47.0	39.0	31.4	35.0	49.4	58.2	70.4	75.8
	2	3	4	8	9	9	5	9	5	7	5	1

2.5.4 Synthèseclimatique

Nous avons retenu les paramètres les plus importants, la température, les précipitations le vent pour définir le type du climat de notre région d’étude.

2.5.4.1 Diagramme ombrothermique de bagnouls etgaussen

Le Diagramme ombrothermique de Bagnouls et gaussen est une méthode graphique qui permet de définir les périodes sèches et humides de l’année. Les mois sont portés en abscisses, et onordonnées les précipitations (P) et les températures (T) , avec $P = 2T$.

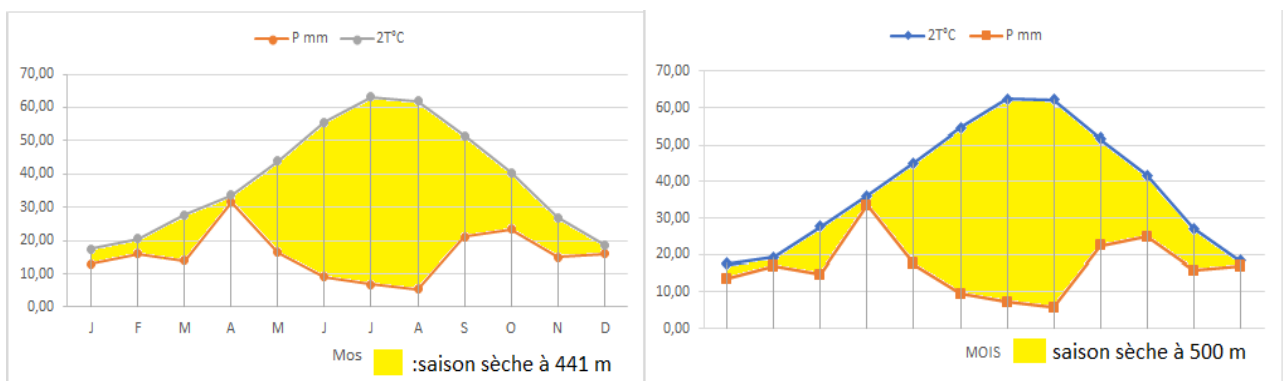


Figure 26: diagramme ombrothermique de Bagnoul et Gaussien de la station de M’sila (2006-2016)

La figure porte sur le diagramme ombrothermique de la région d’étude établi à partir des données pluviométriquesetthermiquesmoyennesmensuellescalculéessurunepériodede10ans.Unepériode estconsidéréesèche lorsquela courbedepluviositésetrouveendessousdelacourbedetempérature

; il s'agit le plus souvent d'une saison sèche estivale. Dans notre cas la saison sèche est longue de 10 mois elle s'étale donc presque sur toute de l'année.

2.5.4.2 Climagramme D'EMBERGER

Le climagramme d'Emberger permet de limiter les étages bioclimatiques et de placer une station dans l'un des étages d'Emberger (humide, subhumide, semi - aride, aride et saharien). Le quotient pluviométrique s'écrit : $Q2 = 3,43 \times p / (M - m)$

Q2 : Le quotient pluviométrique.

P : précipitations moyennes annuelles en mm .

M : moyenne des températures maximales du mois le plus Chaud en kelvin ($^{\circ}C + 273 + 2$).

m : Moyenne des températures minimales du mois le plus froid kelvin.

Ce quotient croit avec les hauteurs des précipitations, mais décroît avec les amplitudes thermiques annuelles, c'est - à - dire les différences entre le mois le plus chauds et les mois le plus froids.

La valeur de ce quotient est $Q2(441) = 14,22$, et $Q2(500) = 16,57$ donc connaissant la moyenne de température minimales du mois le plus froid ($m(441) = -1,55^{\circ}C$),

et ' $m(500) = -1,78$ on peut donc placer la zone de M'sila dans l'étage Aride inférieure sur le diagramme d'Emberger voir figure ci-dessous.

Table 22: Valeurs du quotient pluviométrique Entrer Dans le cas de M'sila

Données	P (mm)	m(°C)	M(°C)	M-m(°C)	Q2	Etage Bioclimatique
station 441	188,49	271,39	316,85	45,46	14,22	aride inférieure
station 500	218,80	271,15	316,44	45,29	16,57	aride inférieure

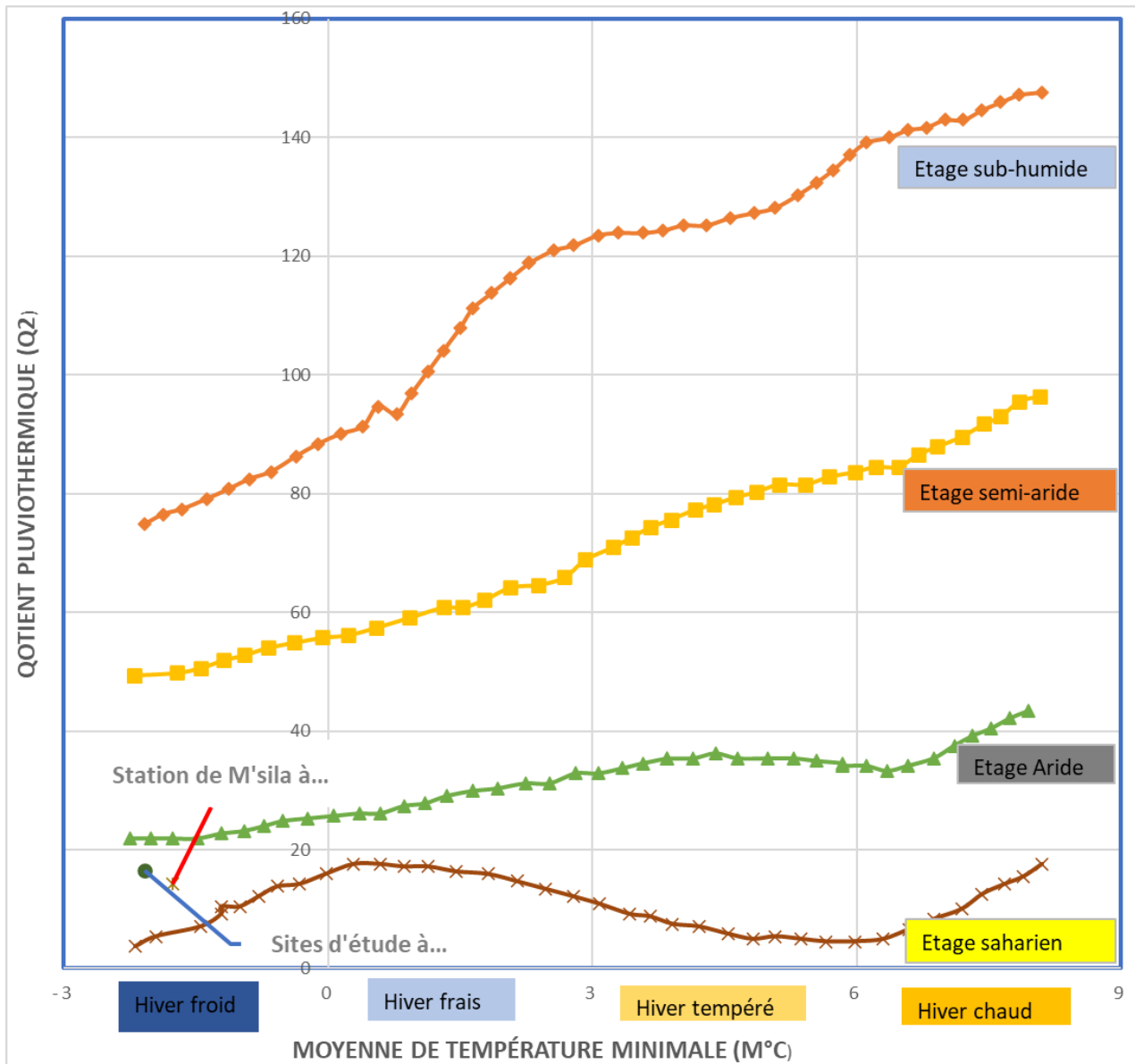


Figure 27 : Climagramme d'Emberger et représentation de la zone d'étude 2006-2016



Chapitre III
Matériel et méthodes

1. Matériel

Cette étude vise à mettre en évidence l'application des différentes méthodes d'interpolation déterministes (IDW : l'inverse de la distance pondéré) et probabilistes (statistique et géostatistique) pour cartographier la conductivité électrique du sol et analyser sa variabilité spatiale et ses relations avec les autres caractéristiques du sol.

1.1 Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude fait partie des périmètres irrigués de Ksob c'est une pépinière appartenant à la commune de M'sila, et gérée par l'office des périmètres irrigués Sa superficie fait plus de 60 ha, à vocation arboricole (olivier, abricotier). Les sols de la zone d'étude appartiennent aux deux classes peu évoluées alluviaux et isohumique (Siérozem).

1.2 L'occupation du sol

La zone d'étude est majoritairement occupée par l'abricotier suivi par l'olivier et en fin par les céréales les terres nues sont minoritaires.

2. Méthode

L'étude de la caractérisation de la matière organique en milieu comporte :

- Le choix des sites d'échantillonnage se base sur les facteurs et le calcaire afin de déterminer l'effet de la matière organique du sol.
- Les échantillons destinés à la caractérisation de la matière organique sont prélevés à partir de deux profils choisis après consultation d'étude antérieure et prospection du terrain (pépinière de M'sila)
- Analyse au laboratoire des caractéristiques du sol
- Traitements 2.1 Méthodologie d'échantillonnage et d'analyse des sols

2.1.1 Stratégie d'échantillonnage des sols

Les profils sont ouverts et décrits selon les fiches de description du sol de l'AFES (Agence Française d'Etude des Sol). Ensuite des échantillons de 1 kg sont prélevés de chaque horizon à des fins d'analyse statistique des données et l'expression des résultats. Figure: Localisation des profils d'échantillonnage.

2.1.2 Analyses physiques et chimiques des sols

Les échantillons ont été séchés à l'air, à la température ambiante. Les sols séchés ont ensuite été broyés et tamisés à 2 mm. Le tamisât représente la terre fine qui va subir les analyses ultérieures. Le refus constitue les éléments grossiers, il est pesé pour être exprimé en pourcent du poids total de l'échantillon de terre

2.1.2.1 La conductivité électrique

Elle représente la quantité des sels solubles dans la solution du sol, on mesure la conductivité électrique par un conductimètre dans une suspension (sol/eau de 1/5). (AUBERT, 1978)

2.1.2.2 Le pH

Le pH est l'abréviation du potentiel hydrogène qui est un paramètre servant à définir si un milieu est acide ou basique.

Par mesure de pH on peut distinguer entre :

- Acidité actuelle ou pHeau
- Acidité totale ou pHKCl

Le pH eau, pH kCl est mesuré par voie électro métrique sur une suspension aqueuse dont le rapport sol /eau (respectivement : sol /solution KCl N) = (1/2,5).

2.1.2.3 Le calcaire total

Dans cette étude nous avons retenu la méthode volumétrique nommée aussi la méthode « Calcimètre de Bernard ». Elle est basée sur la mesure du volume de CO₂ dégagé suite à l'action d'un excès d'acide de chlorure (HCL) sur un poids connu d'un échantillon de sol [CITATION BAI06 \l 1036].

2.1.2.4 Calcaire actif

On agite la terre avec une quantité connue d'oxalate d'ammonium N/5. On filtre. On titre au permanganate cette solution avant et après son contact avec la terre. La différence entre les deux titrages correspond à la quantité de calcium du carbonate ayant réagi sur l'oxalate d'ammonium. [CITATION AUB78 \l 1036]

2.1.2.5 Dosage du carbone organique

La technique d'attaque consiste en une oxydation de la matière organique à chaud (135°) au bichromate de potassium en présence d'acide sulfurique (WOLKILIBLÉK). Le dichromate réduit est dosé par colorimétrie à 586 nm (couleur des ions Cr⁺³ bleu vert), il est proportionnel à la teneur en carbone de l'échantillon

2.1.2.6 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a été réalisée selon la méthode internationale comme suite :

- L'analyse granulométrique s'effectue sur une prise d'essai de terre fine (éléments <2mm).
- attaque des ciments organiques par H₂O₂ et dispersion par d'hexa métaphosphates desodium.
- Les éléments fins (argile, limon fin et grossier) sont déterminés par la densimétrie.
- Les sables fins et grossiers sont déterminés par tamisage humide et secs respectivement.
- La texture du sol est déterminée par le triangle des textures de la sol taxonomie.

2.1.2.7 Azote total

L'échantillon est minéralisé en milieu acide sulfurique en présence de cuivre(II) et d'un catalyseur (oxyde de titane). Dans les conditions de minéralisation, l'azote organique est retrouvé sous forme ammonium. - Les ions ammonium sont transformés en ammoniac par passage en milieu alcalin.

On entraîne NH₃ à la vapeur d'eau et on dose le condensât recueilli par dosage volumétrique acide/base.

N'a pas été réalisé faute de matérielles

2.1.3 Analyse statistique

Les analyses statistiques (statistiques descriptive, variances corrélations) ont été réalisées à l'aide de Statistiques



Chapitre IV
Résultats et Discussion

1. Résultats globaux

Les résultats obtenus pour les différentes variables sont donnés dans le tableau 1, où figurent la moyenne, minimum, maximum, et l'écart type qui montre une dispersion importante pour les données limon fin et sable grossier ainsi que de la granulométrie et le calcaire actif.

Table 23: Statistique descriptives

Variable	NValide	moyenne	Minimum	Maximum	Ecart type
A%	12	31.75	26.00	37.00	3.73
Lf%	12	8.29	0.50	18.00	6.03
Lg%	12	26.42	9.89	48.55	10.36
Sf%	12	23.07	0.72	34.71	10.55
Sg%	12	10.48	6.50	14.48	2.85
Hr%	8	1.84	0.93	4.29	1.09
Ha%	8	20.64	17.55	21.97	1.34
CalcaireT%	24	36.90	31.60	41.61	2.91
CalcaireA%	24	25.60	13.00	39.00	7.91
CO%	24	2.05	0.22	2.77	0.79
MO%	24	3.53	0.38	4.76	1.36
pH	24	8.47	8.20	8.84	0.18
CE mMhos/cm	24	0.524333	0.325000	0.708000	0.140999

2. Analyses statistiques

Les résultats des analyses statistiques des paramètres étudiés sont répertoriés dans le tableau 9. L'examen des valeurs de l'écart type révèle des valeurs élevées pour les paramètres limon grossier et limon fin.

2.1. Analyse de la variance

Les analyse de la variance selon les variables de classement le type d'utilisation du sol (naturel, cultivate) les parcelles et l'horizon révèle des différences significatives pour les paramètres études selon le type d'utilisation (Cultive, naturel) et l'horizon et

Est non significative pour la parcelle, Dénotant une homogénéité des parcelles au niveau de chaque type d'utilisation

Table 24 Analyse de la variance

Effect	Multivariate Tests of Significance (Statglobale.sta) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition					
	Test	Value	F	Effect df	Error df	p
Intercept	Wilks	0.000042	76560.80	5	16	0.000000
Sol	Wilks	0.049723	61.16	5	16	0.000000
Parcelle	Wilks	0.531395	2.82	5	16	0.051717
Horizon	Wilks	0.380898	5.20	5	16	0.005045

2.2. Analyse de corrélation

L'analyse de corrélation montre une régression négative de carbone organique avec le calcaire totale et la conductivité électrique est positive avec le PH

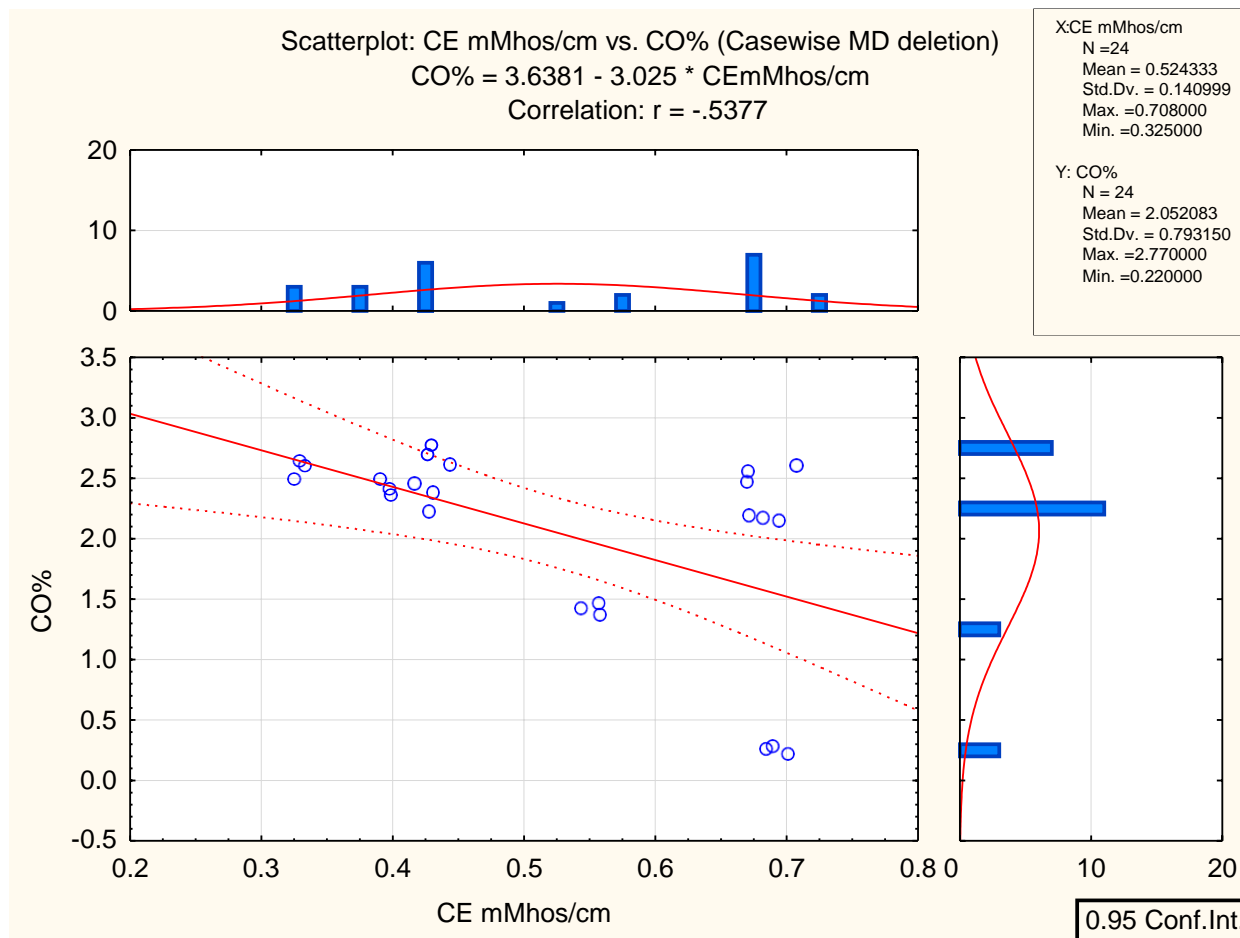
Table 25 Corrélation

Variable	Correlations (Statglobale.sta) Marked correlations are significant at p < .05000 N=24 (Casewise deletion of missing data)			
	CalcaireT%	CalcaireA%	pH	CE mMhos/cm
CO%	-0.459862	-0.089002	0.570523	-0.537715

2.2.1. Relation carbone organique et conductivité électrique

Le carbone organique diminue lorsque la conductivité électrique (salinité augment) avec une formule de régression $CO\% = 3.6381 - 3.025 * CE$ avec un coefficient de corrélation $r = -0.5377$ sous ci et due probablement à l'effet dépressif de la salinité sur la croissance végétale .

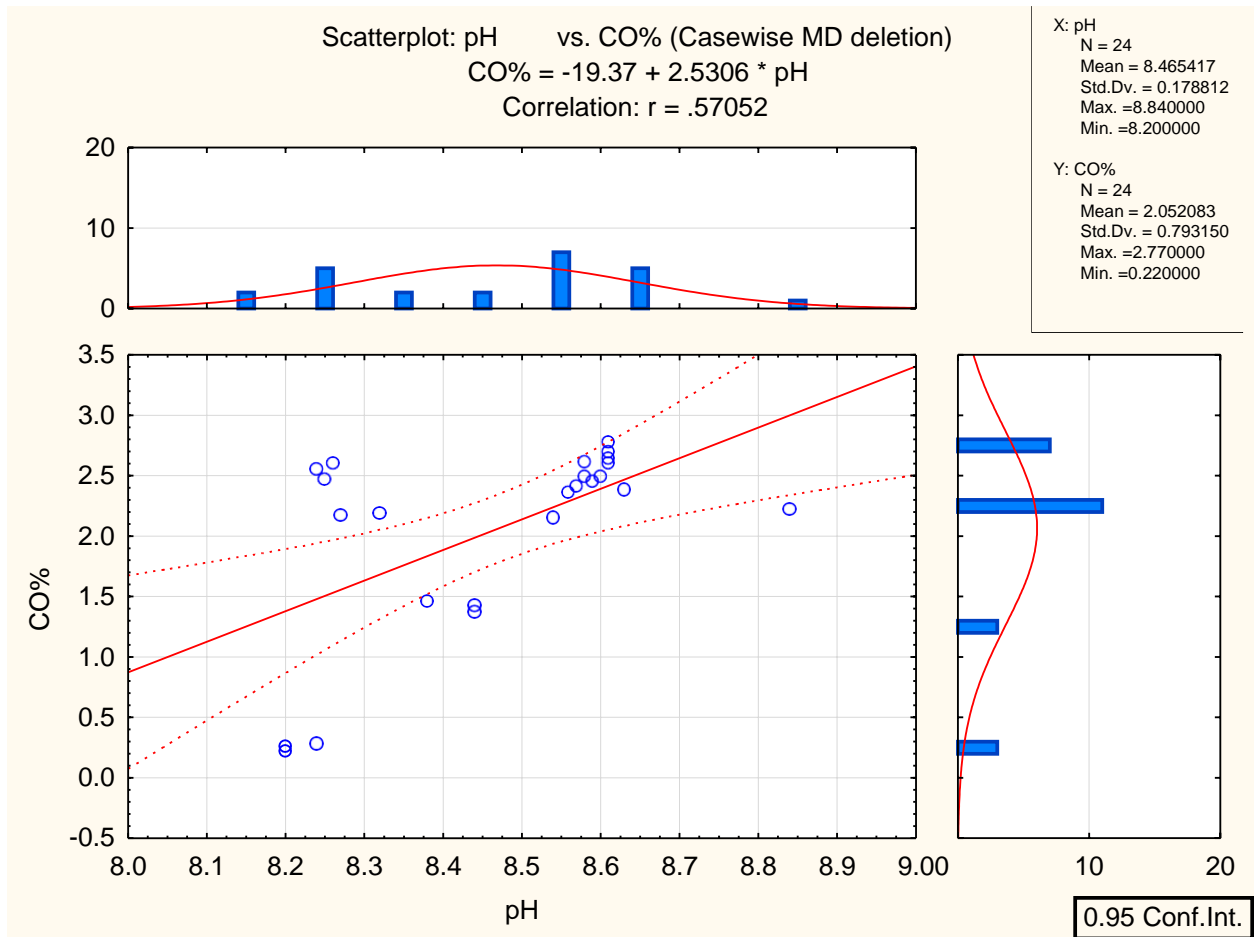
Table 26 Régression carbone organique et connectivité électrique



2.2.2. RELATION CONDICTIVITE ELECTIQUE ETPH

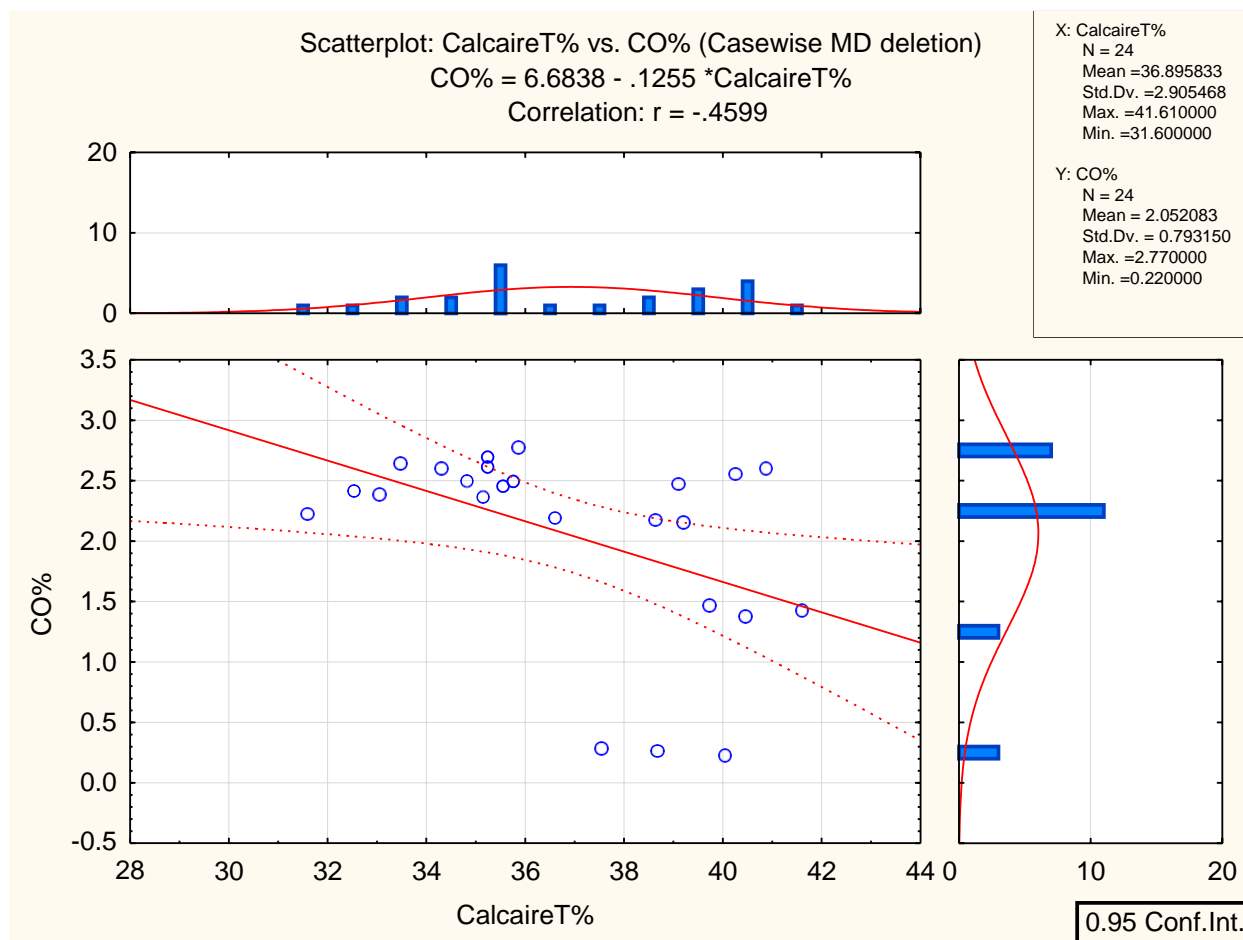
Le Ph a un effet positif sur le carbone organique en suivant la formule :

$CO\% = 19.37 + 2.5306 * Ph$ forte d'un coefficient de corrélation $r = 0.57052$



2.2.3. Relation conductivité électrique et le calcaireactif

Le calcaire totale a une action négatif sur le carbone organique, la diminutions suit une formule de corrélation de $CO\% = 6.6838-1255*\text{calcaire totale}$, avec un coefficient $r = 0.4599$



3. Calcaire total et calcaireactif

Les résultats concernant les valeurs moyenne de calcaire totale et actif vis-à-vis le type d'utilisation (naturel – cultivée) sont consignés dans le tableau qui suit :

Table 27 Valeur moyenne de calcaire totale et calcaire actif

Sol	CalcaireT	CalcaireT	CalcaireT	CalcaireT	CalcaireA	CalcaireA	CalcaireA	CalcaireA
	% Mean	% Std.Err.	% -95.00%	% +95.00%	% Mean	% Std.Err.	% -95.00%	% +95.00%
Nat	39.40167	0.342737	38.68673	40.11660	21.25000	1.865764	17.35808	25.14192
Cult	34.39000	0.342737	33.67506	35.10494	29.95833	1.865764	26.06642	33.85025

Les valeurs de calcaire total sont plus importantes en sol naturelle qu'en sol cultivée,

L'inverse est constaté en ce qui concerne le calcaire actif ceci peut être due à l'action de travail de sol voire (figure 18).

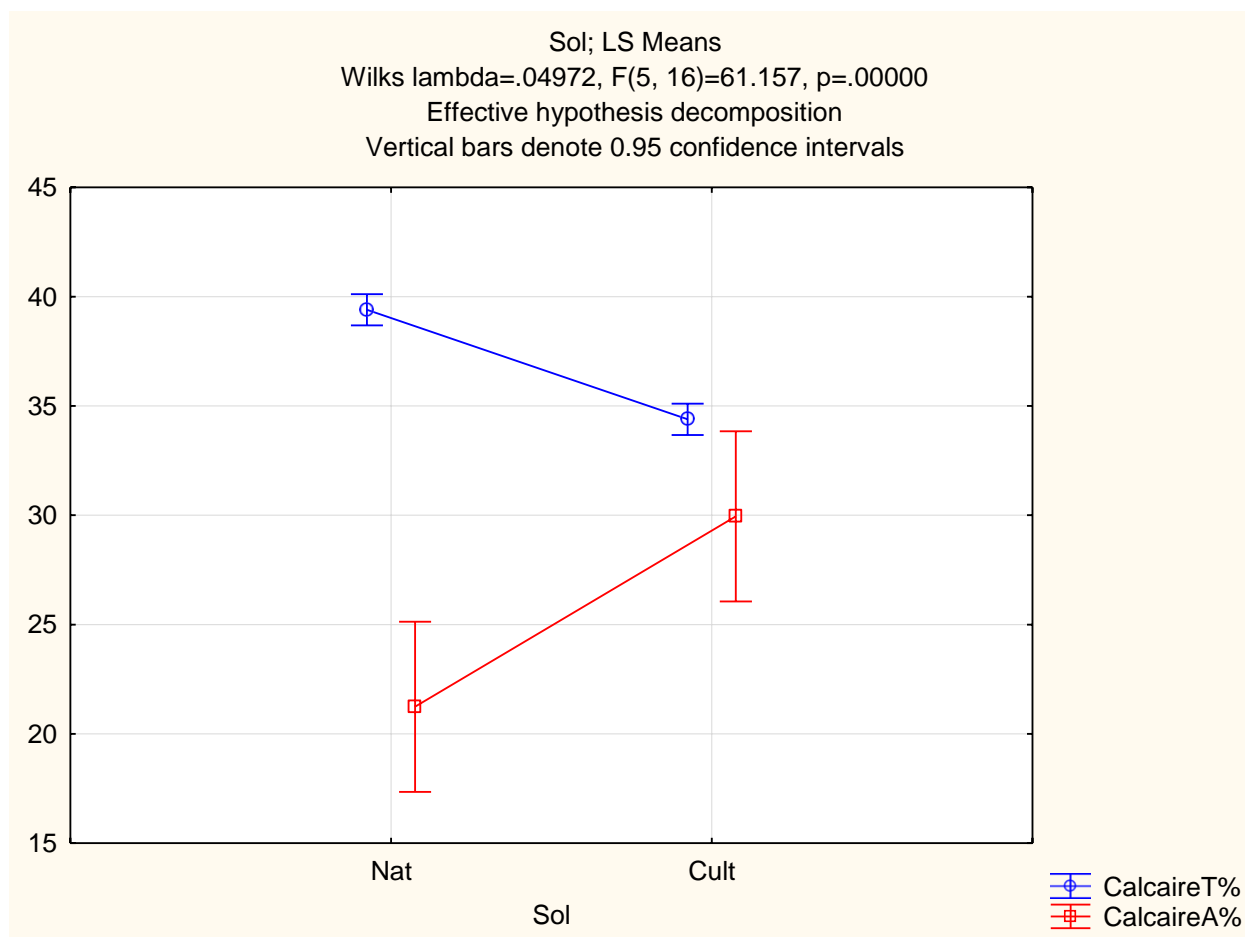


Figure 28 Valeurs des calcaire total et actif en fonction de type d'utilisation du sol

4. Le pH et conductivité électrique

Selon la soil taxonomy (USDA 1975) Le Ph est alcalin pour le sol nature (<8.5) et fortement alcalin pour le sol cultivée (>8.5) voir (Figure 19).

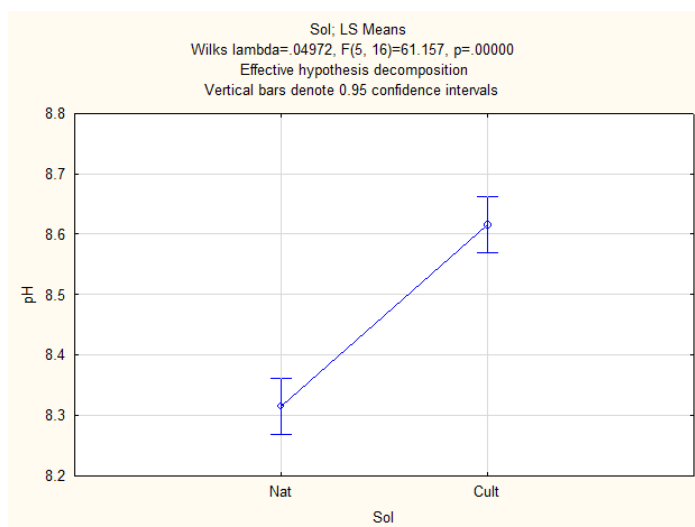


Figure 29 Valeur moyenne de pH en fonction de type d'utilisation du sol

Les valeurs de la conductivité électrique sont inférieures à 0.6 mS/cm pour les sols cultivés indiquant qu'ils ne sont pas salés, alors que les sols naturels présentent des valeurs comprises entre 0.6 et 1.2 mS/cm donc ils sont peu salés. Voir (Figure 20)

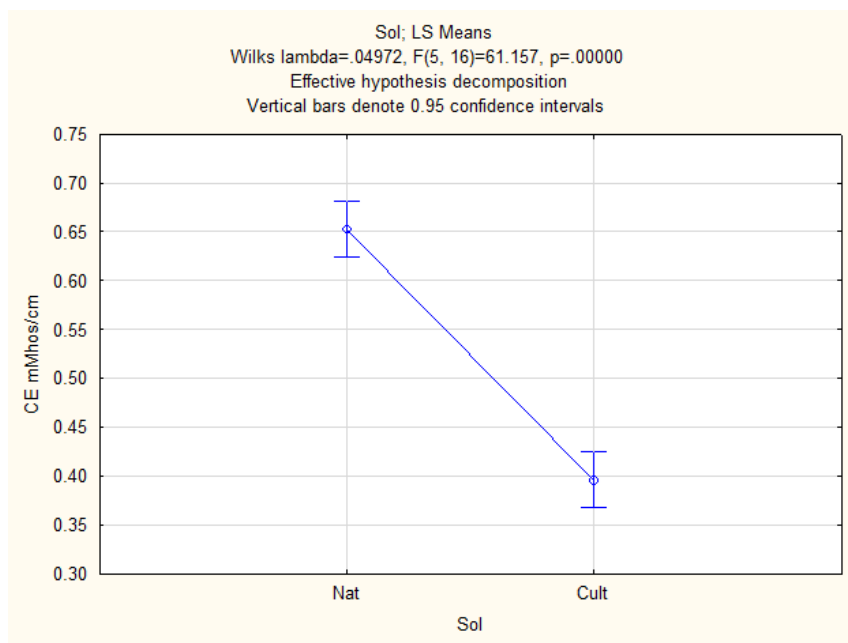


Figure 19 Valeur moyenne de la conductivité électrique en fonction de type d'utilisation du sol

5. Texture

Les valeurs moyennes des fractions de la texture sont consignées dans le tableau qui suit

Table 28: Valeur moyenne des fractions granulométrique

Variab le	N Valide	Moyenne	Minimu m	Maximu m	Ecart type
A%	12	31.75	26.00	37.00	3.73
Lf%	12	8.29	0.50	18.00	6.03
Lg%	12	26.42	9.89	48.55	10.36
Sf%	12	23.07	0.72	34.71	10.55
Sg%	12	10.48	6.50	14.48	2.85

Le regroupement des fractions limon et sables donne les résultats de la texture en trois fractions argile limon et sable voir tableau 14

Table 29 : Valeurs moyenne de la texture regroupée

Descriptive Statistics (Feuil1 in granulométrie)					
Variable	N Valid	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart type
A%	12	31.75000	26.00000	37.00000	3.73254
L%	12	34.70833	23.18000	55.55000	9.98735
S%	12	33.54167	9.45000	46.82000	12.94014

Le diagramme des textures de la sol taxonomy (USDA 1975) montre que les valeurs de la granulométries de nos sols, les classes parmi la texture équilibré argileuse (Clay loam) pour les sols cultivés et équilibré argileux sableuse pour les sols naturelle (sandy clay loam). Voire (figure 21)

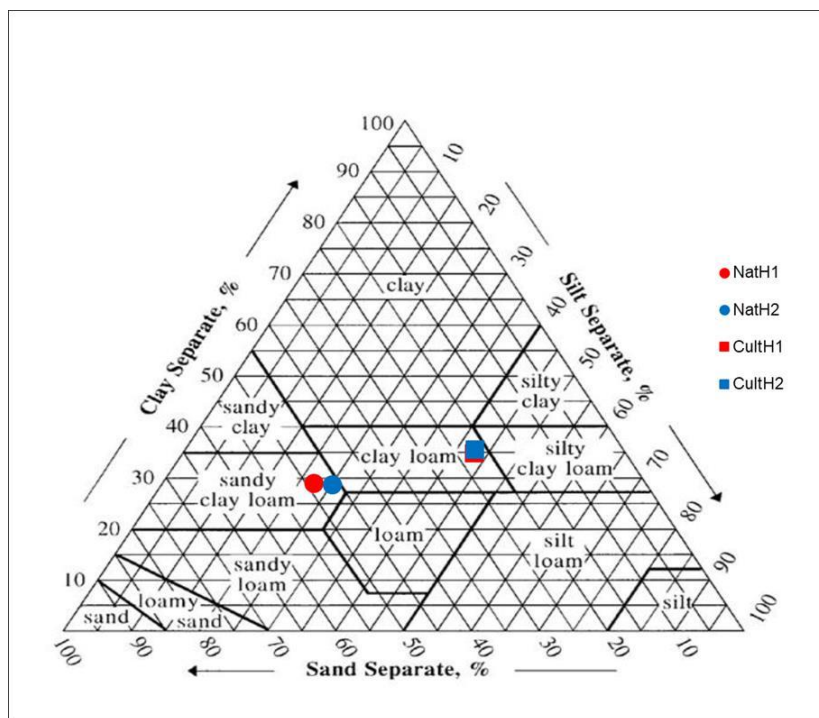


Figure 30: Diagramme des textures des sites d'études

Les sols naturels sont moins pour vu en argile et en limon que les sols cultivate et plus riche en sable voire (figure 22)

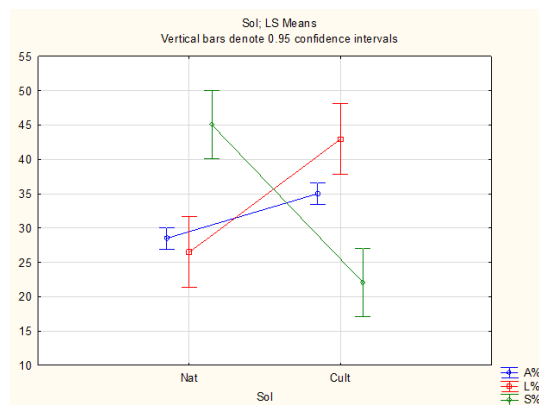


Figure 31 : Valeur de la texture en fonction de type d'utilisation du sol

6. Carboneorganique

Selon (AFEQ 1987) le niveau de la matière organique de nos sols (3.53%), on tenant compte de la texture (Loam argileuse) est considéré comme pauvre nécessitant des amendements organiques .voire (tableau 15)

Table 30: Normme d'interpritation de la matiere organique du sol

Niveau	Texture légère	Texture lourde
	Sable à loam	Loam argileux à argile lourde
Très pauvre	0,0 – 2,0 %	0,0 – 2,0 %
Pauvre	2,1 – 3,5 %	2,1 – 4,5 %
Moyen	3,6 – 6,5 %	4,6 – 10,0 %
Riche	6,6 – 8,0 %	10,1 – 13,0 %
Très riche	> 8,0 %	> 13,0 %

(Association des fabricants d'engrais du Québec , (1987))

Le niveau de carbone organique est plus élevé dans l’horizon 2, par rapport a l’horizon de surface, ceci est constaté dans les sols des milieux arides.

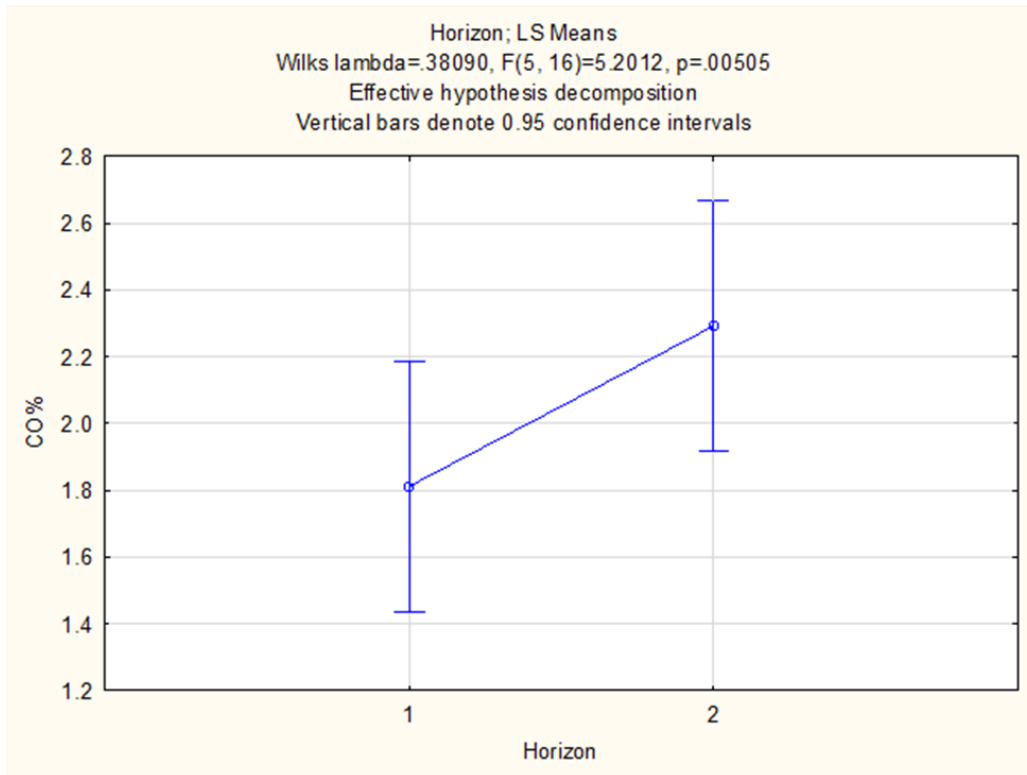


Figure 32: Teneur en carbone organique en fonction de l'horizon

Les sols cultivés sont plus riches en carbone organique par rapport au sol naturelle 2.5% et 1.6 respectivement ceci est due peut être a d'éventuels amendement organique pratique sur les sols cultivate

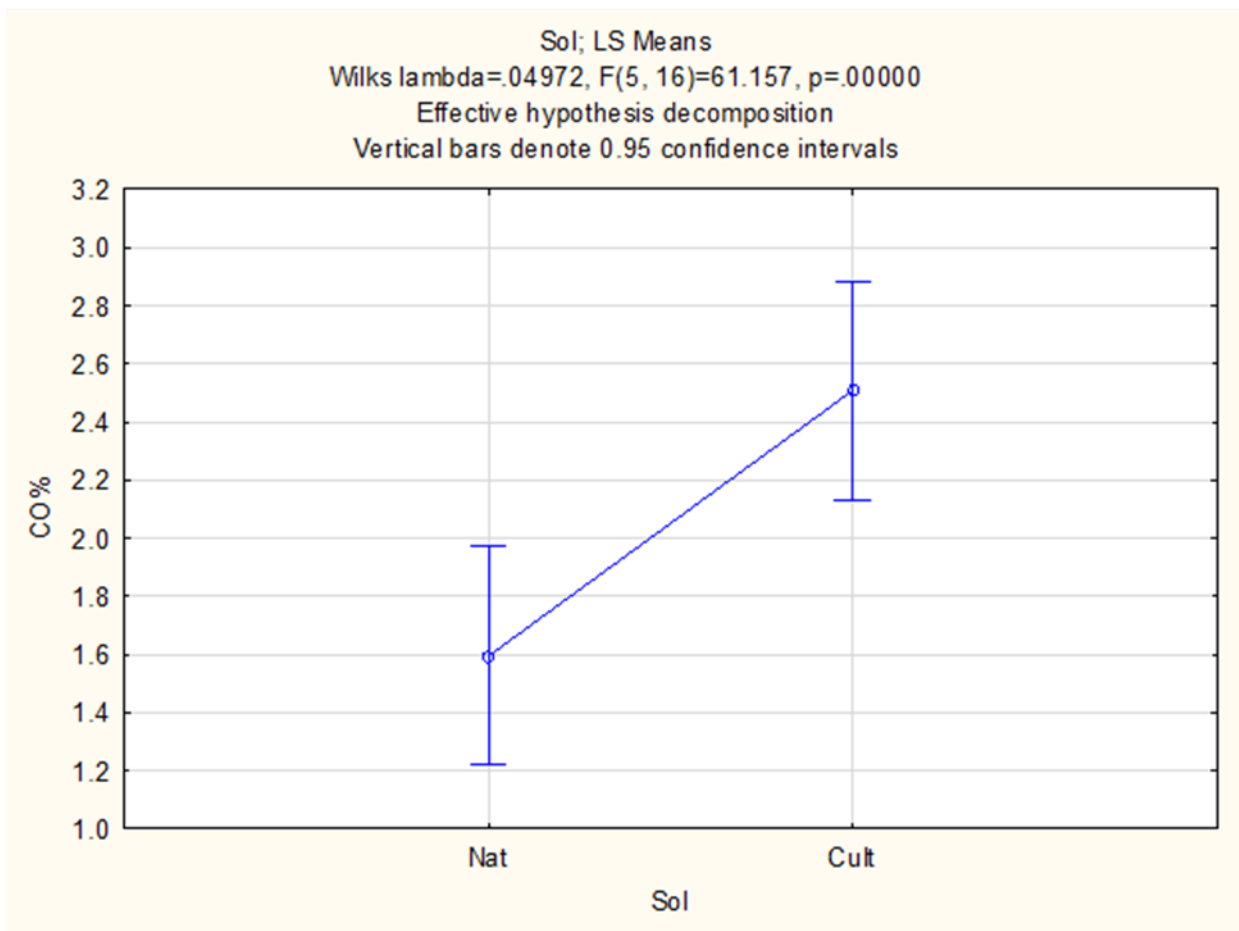


Figure 33 : Teneur de carbone organique en fonction de type d'utilisation du sol

Conclusion

A travers cette étude menée au niveau de la pépinière à Msila, ce travail interdisciplinaire vise à interagir entre la géochimie environnementale, la physique des sols et la microbiologie pour contribuer à la qualité et à la quantité de la matière organique et à son contrôle de la rétention, de l'impact et du mouvement dans le sol. Par conséquent, nous avons voulu mieux comprendre les propriétés de la matière organique entre les sols naturels et cultivés et leur effet sur la physique et la fertilité des sols, et avoir des effets positifs sur la construction et la porosité du sol B, augmentant la capacité du sol à retenir l'humidité et réduisant la processus d'érosion.

La matière organique moderne et ses produits de fermentation pouvant se trouver dans le sol tels que les racines, les brindilles, les tiges, les feuilles fraîches ou séchées, les déchets de gros animaux, d'insectes et de petits animaux, les bactéries qui vivent dans le sol, et les enzymes libérées par celles-ci bactéries.

- Le sol cultivé est plus riche en carbone organique par rapport au sol naturel La matière organique a une surface spécifique élevée selon les caractéristiques de la matière organique et son rôle dans l'amélioration de la fertilité physique et chimique du sol. Il possède de nombreuses propriétés qui permettent une meilleure agrégation des particules du sol et améliorent ainsi sa structure.

La matière organique du sol se compose de quatre parties : La matière organique vivante composée d'organismes vivants

) appelée biomasse), matière organique fraîche, sous-produits et humus. Matière organique Les produits frais en transit et l'humus constituent la matière organique morte.

La teneur en matière organique du sol dépend de la nature du sol et du travail effectué.

Le sol naturel est moins susceptible de contenir de l'argile et du limon que le sol cultivé et est plus riche en sable

-Les sols isohumiques ont une teneur en matière organique quasi constante sur tout le profil et se limitent donc à un seul horizon A porteur d'humus (5% de matière organique], remarquable par sa structure grumeleuse et sa fertilité(

Cette recherche mérite d'être poursuivie pour mieux servir les agriculteurs de la région.

Mots clés : Isohumique ; humus; le sol; Biomasse; Propriétés; la biologie; géologie; L'environnement

Conclusion

Through this study conducted at the nursery level in Msila, this interdisciplinary work is designed to interact between environmental geochemistry, soil physics and microbiology to contribute to the quality and quantity of organic matter and how it controls retention, impact and movement in the ground.

Therefore, we wanted to better understand the properties of organic matter between natural and cultivated soils and their effect on soil physics and fertility, and have positive effects on the building and porosity of soil B, increasing the ability of soil to retain moisture and reducing the erosion process.

Modern organic matter and its fermentative products that may be found in the soil such as roots, twigs, stems, fresh or dried leaves, waste of large animals, insects and small animals, bacteria that live in the soil, and the enzymes released by these bacteria.

- Cultivated soil is richer in organic carbon compared to natural soil. The organic matter has a high specific surface area according to the characteristics of the organic matter and its role in improving the physical and

chemical fertility of the soil. It has many properties that allow a better aggregation of soil particles and thus improve its structure.

Soil organic matter consists of four parts: Living organic matter made up of living organisms

) called biomass), fresh organic matter, by-products and humus. Organic matter Fresh products in transit and humus make up the dead organic matter.

The organic matter content of the soil depends on the nature of the soil and the work done.

Natural soil is less likely to contain clay and silt than cultivated soil and is richer in sand

-Isohumic soils have a nearly constant content of organic matter throughout the profile and are therefore limited to a single A horizon bearing humus (5% organic matter], which is remarkable for its lumpy structure and fertility(

This research deserves to be continued to better serve the farmers in the region.

Keywords: Isohumic; humus; the soil; Biomass; Properties; biology; geology; The environment

الخلاصة:

من خلال هذه الدراسة التي أجريت على مستوى المشتلة بالمسيلة تم تصميم هذا العمل متعدد التخصصات للتفاعل بين الكيمياء الجيولوجية البيئية ، وفيزياء التربة والبيولوجيا الدقيقة للمساهمة في جودة وكمية المادة العضوية وكيف تتحكم في الاحتفاظ والتأثير والحركة في الأرضية. لذلك أردنا أن نفهم بشكل أفضل خصائص المادة العضوية بين التربة الطبيعية والمزروعة وتأثيرها على فيزياء التربة والخصوبة وله آثار إيجابية على بناء ومسامية التربة ب ويزيد من قدرة التربة على الاحتفاظ بالرطوبة ويقلل من عملية التعرية.

- المواد العضوية الحديثة ومنتجاتها التخمرية التي قد توجد في التربة مثل الجذور والأغصان والسيقان والأوراق الطازجة أو المجففة ونفايات الحيوانات الكبيرة والحشرات والحيوانات الصغيرة والبكتيريا التي تعيش في التربة والإنزيمات التي تطلقها هذه البكتيريا .

- التربة المزروعة أكثر ثراءً في الكربون العضوي مقارنة بالتربة الطبيعية المادة العضوية لها مساحة سطح محددة عالية وفقاً لخصائص المادة العضوية دورها في تحسين الخصوبة الفيزيائية والكيميائية للتربة. لها العديد من الخصائص التي تسمح بتجميع أفضل لجزيئات التربة وبالتالي تحسين هيكلها.

- تتكون المادة العضوية في التربة من أربعة أجزاء: مادة عضوية حية تتكون من كائنات حية

(تسمى الكتلة الحيوية) والمواد العضوية الطازجة والمنتجات العابرة والديبال. مادة عضوية تشكل المنتجات الطازجة العابرة والديبال المادة العضوية الميتة.

-يعتمد محتوى المادة العضوية للتربة على طبيعة التربة والعمل المنجز.

تقل احتمالية احتواء التربة الطبيعية على الطين والطين عن التربة المزروعة وتكون أكثر ثراءً بالرمال

- تتميز التربة Insoumis بمحتوى ثابت تقريباً من المواد العضوية في جميع أنحاء المظهر الجانبي ، وبالتالي يقتصر على أفق A واحد يحمل الديبال (5 ٪ مادة عضوية] ، وهو أمر رائع بسبب بنيته المتكثلة وخصوبته)

يستحق هذا البحث أن يستمر لتقديم خدمة أفضل للمزارعين في المنطقة.

الكلمات المفتاحية: المادة العضوية Insoumis؛ الديبال؛ التربة؛ الكتلة الحيوية؛ خصائص؛ بيولوجيا؛ جيولوجيا؛ البيئة

Références

- LES MATIERES ORGANIQUES ET LA FERTILITE DU SOL. (s.d.). Récupéré sur <http://www.requasud.be>.
- (Eusterhues et al., (2003).
- al, V. e. (1987).
- Andreux, F., Bruckert, S., Correa, A., & Souchier, B. (1980). *Sur une méthodologie de fractionnement physique et chimique des agrégats des sols: origine de la matière organique des fractions obtenues. Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'académie.*
- Angers, D., & Caron, J. (1998). *Plant-induced changes in soil structure: Processes and feedbacks* (Vol. 42). Biogeochemistry.
- AUBERT. (1978). *Méthodes d'analyses des sols.*
- Balabane, C. C. (2001). *Matières organiques et activités biologiques des* (éd. Une approche des matières organiques par leurs fonctions. In Perspectives Agricoles).
- Balabane, M., & Plante, A. (2004). *Aggregation and carbon storage in silty soil using physical fractionation techniques* (Vol. 55). Eur J SoilScience.
- Balabane, M., & Plante, A. (2004). *Aggregation and carbon storage in silty soil using physical fractionation techniques* (Vol. 55). Eur J SoilScience.
- Balesdent et al. (1991), C. (s.d.).
- Barralis, G., & Chadeuf, R. (1987). *Potential semencier des terres arables* (Vol. 27). weed Research.
- Bonneau, M. (1979). *Pédologie. Masson.* Paris; New York; Barcelone.
- Bouché M, B. (1972). *Lombriciens de France Ecologie et systematique.* Institut national de la recherche agronomique.
- BOUMEZBEUR, A. (2002). *Atlas des 26 zone humides Algériennes internationale.* Alger: Direction générale des forêts.
- Brodowski, S. A. (2007). *Black carbon contribution to stable humus in German arable soils* (éd. Geoderma 139).
- Bronick, C. &. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124, 3-22.
- Bronick, C., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. 124, 3-22.
- Brown, G., Barois, I., & Lavelle, P. (2000). Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactions with other edaphic functional domains. 36, 177-198.
- Calvet, R. (2003). *Le sol: propriétés et fonctions* (éd. Edition France Agricole et Dunod, Vol. Tome 1&2). Paris.
- Calvet, R. (2003). *Le sol: propriétés et fonctions.* (éd. France Agricole et Dunod,). paris.
- Camuzard, J.-P. (s.d.). *Le solun milieu complexe au pouvoir épurateur limité.* paris.
- Chenu, C. (1989). *Influence of a fungal polysaccharide, scleroglucan, on clay microstructures.*
- Chenu, C. (1993). *Clay- or sand-polysaccharide associations as models for the interface between micro-organisms and soil: water related properties and microstructure*, 56, 143-156.

- Chenu, C., & Plante. (2006). *Clay-sized organo-mineral complexes in a cultivation chronosequence: revisiting the concept of the « primary organo-mineral complex »*. Eur J Soil Science.
- Christensen, B. (2001). *Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover* (Vol. 52). Eur J Soil Science.
- Crawford, Y. e. (2004). *la revue Science*.
- Czimczik, C. M. (2007). *Controls on black carbon storage in soils. Global Biogeochemical Cycles* 21.
- definition-5582-matiere-organique-du-sol.html*. (s.d.). Récupéré sur <https://www.aquaportail.com/>.
- Denef, K., Six, J., Bossuyt, H., Frey, S., Elliott, E., Merckx, R., & al, e. (2001). *Influence of dry-wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics* (Vol. 33). Soil Biology and Biochemistry,.
- Djebaili, S. (1984). *Steepe Algérienne: phytosociologie et écologie* . OPU.
- Dorioz, J., Robert, M., & Chenu, C. (1993). The role of roots, fungi and bacteria on clay particle organization. An experimental approach. 56, 179-194.
- FAO. (1973). *fao.org*. Récupéré sur <https://www.fao.org/>.
- Fisher, M., & Triplett, E. (1999). *Automated Approach for Ribosomal Intergenic Spacer Analysis of Microbial Diversity and Its Application to Freshwater Bacterial Communities* (Vol. 65). Applied and Environmental Microbiology.
- G, G., Glebova, D. A., & YM, A. (1975). *Molecular Marameters of Humic Acids Codes* (Vol. 56).
- G, O. D. (1975). *Molecular Marameters of Humic Acids Codes* (Vol. 56).
- Gale, W., Cambardella, C.A., & Bailey, T. (2000). Root-Derived Carbon and the Formation and Stabilization of Aggregates. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 201-207.
- Gobat, J. A. (2010). *Le sol vivant: Bases de pédologie, Biologie des sols*. (éd. Ed.Presses Polytechniques et Universitaires Romandes 3ème éd.).
- Gregory, P. (2006). Roots, Rhizosphere and Soil: the Route to a Better Understanding of Soil Science? *European Journal of Soil Science*, 57, 2-12.
- Hattori, T. (1988). *Soil aggregats as microhabitats of microorganisms*. Tohoku University, Reports of the Institue for Agricultural Research.
- Henin, S., & Turc, L. (1949). *Essai de fractionnement des matières organiques du sol* (Vol. 34).
- Hillel, D. (1998). Environmental soil physics. *Academic Press*.
- Jastrow, J. (1996). *Soil aggregate formation and the accural of particulate and mineral- associated organic matter*. (Vol. 28). Soil Biology and Biochemistry,.
- John, B., Yamashita, T., Ludwig, B., & Flessa, H. (2005). Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use. 128, 63-79.
- Kalbitz, K. S.-H. (2000). *Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils*.
- Kellogg, C. (1938). *Soil and society* USDA Yearbook of Agriculture 75th Congress.
- Kögel-Knabner, I. (2002). *The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter*. *Soil Biology and Biochemistry*.

- Lavelle P, & Spain, A. (2001). Kluwers Academic Publishers.
- Lemaitre, C. (1998). *Biodétérioration des matériaux*. Les Ulis [France]: EDP Sciences.
- LES MATIERES ORGANIQUES ET LA FERTILITE DU SOL. (s.d.). Récupéré sur <http://www.requasud.be>.
- Liang, B. L. (2008). *Stability of biomass derived black carbon in soils*. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72.
- Lugato, E., Simonetti, G., Morari, F., Nardi, S., Berti, & A. & Giardini, L. (2010). Distribution of organic and humic carbon in wet-sieved aggregates of different soils under long- term fertilization experiment. *Geoderma*, 157, 80-85.
- MacCarthy, P. (2001). *The principles of humic substances*. *Soil Science*.
- Marinissen, J., & Dexter, A. (1990). *Mechanisms of stabilization of earthworm casts and artificial casts* (Vol. 9). Biol Fertl Soils.
- Milleret, R., Le Bayon, R., C., L. F., Gobat, J.-M., & Boivin, P. (2009). Impact of roots, mycorrhizas and earthworms on soil physical properties as assessed by shrinkage analysis. *Journal of Hydrology*, 373, 499-507.
- MIMOUNE, S. (1995). *Gestion des sols salés et désertification dans une cuvette endoréique en Algérie (sud de cott el Hodna)*. these doc.
- Monnier, G., Turc, L., & Luusinang, C. J. (1962). *Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol*. In *Annales Agronomiques* (Vol. 13).
- Nannipieri, P., Ascher, J., Ceccherini, M., Landi, L., Pietramellara, G., & Renella, G. (2003). *Microbial diversity and soil functions* (Vol. 54). Eur J Soil Science.
- Oorts, K. B., H., L. J., Merckx, R., & Nicolardot, B. (2007). *Carbon and nitrogen stocks in relation to organic matter fractions, aggregation and pore size distribution in no-tillage and conventional tillage in northern France*. Eur J Soil Sci.
- Pankhurst, C. (1998). *Biodiversity of Soil Organisms as an indicator of Soil Health In Biological indicators of Soil Health*.
- Perry, D. (1995). *Self-organizing systems across scales* *Trends in Ecology and Evolution* .
- Picardie, T. R. (2007). *Mémento Sols et Matières Organiques*.
- processusecologiques/co/ImportanceMOS*. (s.d.). Récupéré sur <https://www.supagro.fr/ress-pepites/processusecologiques/co/ImportanceMOS.html>.
- RAMADE, S. (2003). *Elements d'ecologie, Ecologie fondamentale* (Vol. 3eme Edition DUNOD).
- Ranjard, L., Brothier, E., & Nazareth, S. (2000). *Sequencing Bands of Ribosomal Intergenic Spacer Analysis Fingerprints for Characterization and Microscale Distribution of Soil Bacterium Populations Responding to Mercury Spiking*. Applied and Environmental Mi.
- Schmidt, M. N. (2000). *Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges* (éd. Global Biogeochemical Cycles 14,).
- Schnitzer, & Khan, S. (1972). *Humic Substances in the Enviroment*. Marcel Dekker.
- Schnitzer, M. K. (1972). *Humic substances in the environment*. Marcel Dekker. inc., New York.
- Schwenk, & al., G. e. (2004). *Soil organic matter, biological activity, and productivity: myths and realities*. In: *Soil Biology in Agriculture* (Eds R. Lines Kelly). DPI NSW.

- Sessitsch, A., Weilharter, A., Gerzabek, M., Kirchmann, H., & Kandeler, E. (2001). *Microbial Population Structures in Soil Particle Size Fractions of a Long-Term Fertilizer Field Experiment*. (Vol. 67). Applied and Environmental Microbiology.
- Six, J. B., H., D., S., & Denef, K. (2004). *A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics*1* (Vol. 79). Soil and Tillage Research.
- Six, J. F. (2006). *Bacterial and Fungal Contributions to Carbon Sequestration in Agroecosystems*. Soil Science Society of America Journal .
- Six, J., Bossuyt, H., Degryse, S., & Denef, K. (2004). *A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics* (Vol. 79). Soil and Tillage Research.
- soilhealth.com/organic*. (s.d.). Récupéré sur <http://www.soilhealth.com/organic/#one>.
- SOL, h. L. (s.d.). <http://www.requasud.be/> *LES MATIERES ORGANIQUES ET LA FERTILITE DU SOL*. Récupéré sur <http://www.requasud.be>.
- Stevenson, F. (1994). *Humus Chemistry: genesis, composition, reactions*. New York: Wiley.
- Stevenson, F. (1982). *Humus Chemistry Genesis Composition Reactions*. (Vol. 2). New York: John Wiley and Sons.
- Stevenson, F. (1994). *Humus Chemistry: genesis, composition, reactions*. 2nd ed. New York: Wiley.
- Stevenson, F. (1994). *Humus Chemistry: genesis, composition, reactions* (éd. 2nd). New York: Wiley.
- Sumner, M. (2000). *Handbook of soil science*. Boca Raton Fla: CRC Press.
- Tisdall, J., & Oades, J. (1982). *Organic matter and water-stable aggregates in soils*.
- Turchenek, L., & Oades, J. (1979). Fractionation of organo-mineral complexes by sedimentation and density techniques. *Geoderma*, 21, 311-343.
- Woese, C., & Fox, G. (1977). *Phylogenetic Structure of the Prokaryotic Domain: The Primary Kingdoms*. *Proceedings of the National Academy of Sciences* (Vol. 74).
- Young, I., & Crawford, J. (2004). *Interactions and Self-Organization in the Soil-Microbe Complex* (Vol. 304). Science.