

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued



FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE DES

PROCEDES ET PETROCHIMIE

Mémoire de fin d'étude

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Génie des procédés

Spécialité: Génie chimique

Thème

**Amélioration du sol par la biodégradation de la matière organique
(Formation des substances humiques)**

Par l'étudiant : BOUHOREIRA Mahmoud

Soutenu devant le jury composé de :

Dre. AHMOUDA Kaouthar	MCA	Université d'El Oued	Présidente
Dr. ROUAHNA Nouredine	MCA	Université d'El Oued	Examineur
Dr. BOUHOREIRA Abdelaziz	MCA	Université d'El Oued	Rapporteur

2023/2024

Dédicace

***Merci Allah de m'avoir donné la capacité
d'écrire Et de réfléchir, la force d'y croire, la
patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le
bonheur.***

***De lever mes mains vers le ciel et de dire y krim.
Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a
donné la vie, le symbole de tendresse, qui
s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma
réussit, ma mère.***

***A mon père (Allah yarhmo), école de mon
enfance, qui a été mon ombre durant toutes les
années passées des études, que dieu l'accueil en
son vaste paradis.***

***A mes chers frères et chères seures : Med
Lakhder, Abdellah, Khemria , Sadia et Chabana
A ma femme et mes enfants : Wissal ,loudjine,
Med Nadjib ,Sedrat, Taj eddine.***

***A mes chers amis Abdelkader , Nacereddine, et
Abdelouha.***

***A tous ceux qui m'aiment, a tous ceux que j'aime,
Je dédie ce travail.***

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Allah Le tout puissant pour m'avoir donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce travail. Sans sa miséricorde, ce travail n'aurait pas abouti.

Avant de présenter ce travail, je tiens à remercier tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à sa réalisation :

Mes remerciements vont tout d'abord à Monsieur (Dr. BOUHOREIRA Abdelaziz) pour avoir accepté de diriger ce travail dans les meilleures conditions.

Qu'il trouve ici, l'expression de ma profonde reconnaissance, mon immense gratitude et mon grand respect, pour tous ses efforts, son savoir, ses idées, ses conseils et ses encouragements.

À Madame (Dre. AHMOUDA Kaouthar) et Monsieur (Dr. ROUAHNA Nouredine) ; les membres de jury pour l'honneur qu'ils ont fait pour accepter de juger ce travail.

Je tiens également à remercier tous ceux et celles qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail et soutenus dans les moments difficiles.

Résumé :

L'amélioration du sol par la biodégradation de la matière organique est un processus naturel ou contrôlé dans lequel les micro-organismes décomposent les débris végétaux, les résidus de cultures où le compost dans le sol. Ce processus libère des nutriments essentiels pour les plantes, améliore la structure du sol en favorisant la formation d'agrégats, et augmente sa capacité de rétention d'eau et d'oxygène. En favorisant une activité biologique bénéfique, cette méthode contribue à la fertilité du sol et à la santé des écosystèmes. Les substances humiques (SH) sont des composés organiques résultant de la transformation physique, chimique et microbiologique des résidus végétaux et animaux. Dans ce contexte on a étudié l'influence des vers de terre sur la transformation de la matière organique dans le sol au niveau de deux sites dans la commune de Blidet Amor qui située dans la wilaya de Tougourt, les résultats obtenus indiquent que l'évolution des propriétés physico-chimiques et biologiques des échantillons des sols qui comportent la matière organique et les vers de terre atténuent des paramètres significatifs ; pH équilibré (7.2) , conductivité (4.4 mS /cm), température (38°C) , humidité (40%), DCO (198 mg/l) et DBO5 (205 mg/l) par rapport aux témoins sans vers de terre.

Mots clés : Sol, matière organique, substance humique, biodégradation.

Abstract :

Soil improvement through biodegradation of organic matter is a natural or controlled process in which microorganisms break down plant debris, crop residues where compost in the soil. This process releases essential nutrients for plants, improves soil structure by promoting the formation of aggregates, and increases its water and oxygen retention capacity. By promoting beneficial biological activity, this method contributes to soil fertility and ecosystem health. Humic substances (SH) are organic compounds resulting from the physical, chemical and microbiological transformation of plant and animal residues. For this purpose we carried out a study was carried out on the influence of earthworms on the transformation of organic matter in the soil at two sites in the commune of Blidet Amor which is located in the wilaya of Tougourt, the results obtained indicate that the evolution of the physicochemical and biological properties of the soil samples which contain organic matter and earthworms attenuate significant parameters; Balanced pH (7.2), conductivity (4.4 mS/cm), temperature (38°C), humidity (40%), COD (198 mg/l) and DBO5 (205 mg/l) compared to controls without earthworms.

Keywords : Soil, organic matter, humic substance, biodegradation.

الملخص :

يعد تحسين التربة من خلال التحلل الحيوي للمواد العضوية عملية طبيعية أو خاضعة للرقابة حيث تقوم الكائنات الحية الدقيقة بتحويل بقايا النباتات أو بقايا المحاصيل إلى السماد العضوي في التربة. تطلق هذه العملية الغذائية الأساسية للنباتات وتحسن بنية التربة من خلال تشجيع تكوين الركام، وتزيد من قدرتها على الاحتفاظ بالماء والأكسجين. ومن خلال تعزيز النشاط البيولوجي المفيد، تساهم في خصوبة التربة وصحة النظام البيئي، وتعد المواد الهيميكية (SH) هي المركبات العضوية الناتجة عن التحول الفيزيائي والكيميائي والميكروبيولوجي لبقايا النباتات والحيوانات ، وفي هذا السياق قمنا بدراسة تأثير ديدان الأرض على تحول المادة العضوية في التربة في موقعين ببلدية بلدة عمر التابعة لولاية تفرت ، وتشير النتائج التي تم الحصول عليها أن تطور الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية لعينات التربة التي تحتوي على مواد عضوية وديدان الأرض أعطت نتائج جيدة : درجة الحموضة المتوازنة pH (7.2)، الموصلية (4.4 mS/cm) ، درجة الحرارة (38°C) ، الرطوبة (40٪) ، DCO (198 mg/l) ، DBO5 (205mg/l) مقارنة بالتربة التي لا تحتوي على ديدان الأرض.

الكلمات المفتاحية : التربة، المادة العضوية، المادة الدبالية ، التحلل الحيوي.

Liste des abréviations :

AF : Acide Fulvique

AH : Acide Humique

ADN : Acide désoxyribonucléique

ARN : Acide ribonucléique

AIA : Acide Indol Acétique ou AIA (en anglais, indole-3-acetic acid ou IAA) ($C_{10}H_9NO_2$).

Al³⁺ : Eléments toxiques (aluminium sous forme ionique).

CAH : Complexe Argilo Humique.

CEC : Capacité d'Echange de Cations.

DBO5 : Demande Biochimique en Oxygène.

DCO : Demande Chimique en Oxygène.

ETM : Éléments Traces Métalliques.

GEPPA : Groupement d'étude de pédologie pure et appliquée.

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.

IDT : Indice de Différenciation Texturale.

MO : Matière Organique.

MOS : Matière Organique dans le Sol.

MMT : Métaux et Métaux Traces.

MT : Métaux Traces.

OPVT : Observatoire Participatif des Verre de Terre.

Pélargonium x hortorum : Les pélargoniums sont des plantes de jardin très populaires que l'on utilise comme plantes à massif dans les régions tempérées.

SEM : microscopie Scanning Electron Microscope.

SH : Substances Humiques.

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Notation du sol selon la texture	5
Tableau I.2 : Notation du sol selon la profondeur	6
Tableau I.3 : Notation du sol selon l'indice de différenciation texturale	6
Tableau I.4 : Notation du sol selon la pierrosité	8
Tableau I.5 : Notation du sol selon l'hydromorphie.....	9
Tableau I.6 : Notation du sol selon le pH.....	11
Tableau I.7 : Notation du sol selon la teneur en éléments majeurs	13
Tableau I.8 : Notation du sol selon la MO	14
Tableau I.9 : L'évolution des matières organiques dans le sol.....	14
Tableau I.10 : Notation du sol selon le rapport C/N	14
Tableau I.11 : Notation du sol selon le nombre des vers dans une bêchée	15
Tableau II.1 : Localisation des MMT dans les sols.....	33
Tableau II.2 : Mobilité des ETM en fonction de pH et du potentiel redox	35
Tableau II.3 : Rôles des éléments minéraux.....	46
Tableau V.1 : Caractéristiques initiales des sols étudiés	65
Tableau V.2 : Caractéristiques des sols étudiés après 15 jours	66
Tableau V.3 : Caractéristiques des sols étudiés après un mois	66
Tableau V.4 : Caractéristiques des sols étudiés après deux mois	67
Tableau V.5 : Analyses des spectres UV des sols étudiés après deux mois.....	67
Tableau V.6 : Evolution des caractéristiques des lomricomposteurs	72

Liste des figures

Figure I.1: Structure d'un sol	3
Figure I.2. Le triangle textural de Henin	5
Figure I.3 : Classes d'indice de différenciation texturale	7
Figure I.4 : Grille d'estimation de la pierrosité du sol	7
Figure I.5 : Traces rouille (caractère rédoxique marqué)	8
Figure I.6 : Traces bleues (caractère réductique)	9
Figure I.7 : Influence du pH sur la disponibilité des éléments	11
Figure I.8 : Représentation de la CEC	12
Figure II.1 : Distribution de la matière organique des sols	17
Figure II.2 : Dynamique du carbone dans le sol	18
Figure II.3 - Mécanismes de formation des substances humiques du sol	20
Figure II.4 : Modèle d'un acide humique	23
Figure II.5 : Modèle monomère d'un acide humique	23
Figure II.6 : Microscopie SEM d'acide humique	23
Figure II.7 : Modèle de structure des composés humiques	23
Figure II.8 : Structure tridimensionnelle de l'acide humique	25
Figure II.9 : Origine des métaux lourds dans le sol	31
Figure III.1: Processus de compostage	39
Figure III.2 : Courbe théorique d'évolution de la température et du pH au cours du compostage	41
Figure III.3 : Biomasse animal	45
Figure III.4 : Les vers de terre qui vivent dans le compost	45
Figure III.5 : Cycle biologique ver de terre	47
Figure III.6 : Répartition écologique des vers de terre	47
Figure III.7 : Classification écologique des vers de terre	48
Figure IV.1 : Localisation géographique de la commune de blidate Amor	52
Figure IV.2 : localisation des zones d'étude au niveau de la commune de blidate Amor	52
Figure IV.3 : Les vers de terre (Lomrics terrestres et lomrics sup) utilisés dans les sols d'étude	53

Figure IV.4 : Installation des pots du 1 ^{er} dispositif (zone A).....	54
Figure IV.5 : Installation des pots du 2 ^{ème} dispositif (Zone B).....	55
Figure IV.6 : Cultive des plantes de tomates dans les pots des dispositifs (Zones A/B)	55
Figure IV.7: Détermination de la texture du par technique (test du boudin).....	57
Figure IV.8 : pH-mètre de mesure de l'acidité	59
Figure IV.9 : Thermomètre de mesure de la température.....	59
Figure IV.10 : Un four de chauffage et une balance pour la meure de l'humidité	60
Figure IV.11 : Un conductivimètre	60
Figure IV.12 : Spectroscopie UV- Visible	61
Figure IV.13 : Lombricompost à la maison	63
Figure IV.14: Lombricompost au jardin	64
Figure V.1 : Evolution des plantes de tomate dans sols étudiés après deux mois	68
Figure V.2 : Evolution du pH des sols étudiés	69
Figure V.3 : Evolution de la température des sols étudiés	70
Figure V.4 : Evolution de l'humidité des sols étudiés	71
Figure V.5 : Evolution de la conductivité des sols étudiés	71
Figure V.6 : Evolution des caractéristiques des lombricomposts	73

Sommaire

Remerciements	
Résumé	
Liste des abréviations	
Liste des tableaux	
Liste des figures	

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Première partie - Revue bibliographique

Chapitre I : Le sol agricole

I.1) Introduction.....	3
I.2) La composition du sol	3
I.3) Les caractéristiques physiques du sol	4
I.3.1) La texture	4
I.3.2) La profondeur	6
I.3.3) Indice de différenciation texturale	6
I.3.4) Pierrosité	7
I.3.5) Hydromorphie	8
I.3.6) Changement climatique	9
I.3.7) Structure du sol	10
I.3.8) Le pH du sol	10
I.4) Les propriétés chimiques du sol	11
I.4.1) La capacité d'échange cationique et le taux de saturation	12
I.4.2) la teneur en éléments majeurs	13
I.4.3) La teneur en oligo-éléments	13
I.4.4) La teneur en matière organique	13
I.4.5) Le rapport C/N	14
I.5) La fertilité biologique du sol	15
I.6) Conclusion	15

Chapitre II : La matière organique (Formation des substances humiques)

II.1) Introduction	16
II.2) Le sol et la matière organique	16
II.3) Composition de la matière organique du sol	17
II.4) Transformation de la matière organique du sol	17
II.5) Définition des substances humiques	19
II.6) Les sources de substances humiques	21
II.7) Structure des substances humiques	21
II.8) Propriétés des substances humiques	25
II.9) Rôle et effet des substances humiques dans le sol	26
II.10) Extraction des acides humiques	26
II.11) La matière organique et la fertilité des sols agricoles	27
II.12) Utilisation des substances humiques en agriculture	28
II.12.1) Germination et croissance des plantes	29
II.12.2) Croissance des racines et des parties aériennes	29
II.12.3) Développement des plantes	29
II.12.4) Métabolisme énergétique	30
II.12.5) Synthèse des protéines et acides nucléiques	30
II.12.6) Activité enzymatique	30
II.13) Métaux dans le sol et interaction avec la matière organique	30
II.13.1) Origine des métaux traces	31

II.13.2) Comportement des métaux dans le sol	33
II.13.3) Équilibres dynamiques dans les sols	34
II.14) Conclusion	37

Chapitre III : La biodégradation de la matière organique

III.1) Introduction	38
III.2) Compost	38
III.2.1) Les types du compost	38
III.2.1.1) Compost aérobie	38
III.2.1.2) Compost anaérobie	39
III.2.2) Compostage	39
III.2.3) Les mécanismes impliqués	40
III.2.4) Facteurs du succès du compostage	42
III.2.5) Objectifs du compostage	42
III.2.6) Effets physico-chimiques du compost sur les sols	42
III.2.7) Valorisation agronomique des composts par apport d'éléments fertilisants	43
III.2.8) Efficacité agronomique du compost	43
III.3) La matière organique et les organismes du sol	44
III.3.1) La biomasse microbienne	44
III.3.2) la biomasse végétale	44
III.3.3) la biomasse animale	44
III.4) Le lombricompostage	46
III.4.1) Les vers de terre	46
III.4.1.1) Biologie et classification	46
III.4.1.2) Répartition écologique	47
III.4.1.3) Les vers de terre incorporent les débris végétaux morts dans le sol	48
III.4.1.4) Les vers de terre incorporent les débris végétaux morts dans le sol plantes en éléments nutritifs.	48
III.5) La fertilité des sols et les vers de terre	49
III.6) Les biofertilisants	49
III.7) Effet de la fertilisation organique sur la production et la santé des plantes	50
III.8) Rôle de fertilisation biologique dans la production agricole	50
III.9) Conclusion	51

Deuxième partie – Partie pratique

Chapitre IV : Matériels et méthodes

IV.1) Site de l'étude	52
IV.1.1) Localisation	52
IV.1.2) Sol agricole d'étude	53
IV.2) Matériels	53
IV.2.1) Matériels (matière organique).....	53
IV.2.2) Matériels animal (vers de terre)	53
IV.2.4) Dispositifs expérimental	54
IV.2.3) Matériels végétales	55
IV.3) Etude expérimentale sur l'effet de vers de terre sur la transformation de la matière organique	56
IV.3.1) Analyses physico-chimiques des sols étudiés	56
IV.3.1.1) Détermination de la texture du sol	56
IV.3.1.2) Extraction d'une solution du sol	58
IV.3.1.3) Mesure du pH	59
IV.3.1.4) Mesure de la température	59
IV.3.1.5) Mesure de l'humidité	60
IV.3.1.6) Mesure de la conductivité	60
IV.3.1.7) Mesure du carbone total	61
IV.3.1.8) Mesure de l'azote total	61
IV.3.1.9) Analyse du spectromètre UV	61

IV.3.1.10) Mesures des paramètres DBO5 et DCO	62
IV.5) Caractéristiques physico-chimiques des Lombricompost	63
IV.4.1) Caractéristiques de lombricompost à la maison	63
IV.4.1) Caractéristiques de lombricompost au jardin	64

Chapitre V : Résultats et discussions

V.1) Évolution des caractéristiques physico-chimiques et biologiques des soles étudiés	65
V.1.1) Caractéristiques initiales des soles étudiés	65
V.1.2) Caractéristiques des soles étudiés après 15 jours	66
V.1.3) Caractéristiques des soles étudiés après un mois.....	66
V.1.4) Caractéristiques des soles étudiés après deux mois	67
V.1.5) Analyses des spectres UV des soles étudiés après deux mois	67
V.1.6) Effet des vers de terre sur la croissance des plantes de tomate	68
V.1.7) Interprétation des résultats d'analyses des sols étudiés	69
V.2) Evolution des caractéristiques des lombricomposteurs	72
Conclusion générale	73
Recommandations	73
Bibliographie	
Annexes	

Introduction générale

Introduction générale :

Le sol est un écosystème très complexe qui abrite un quart de vie terrestre identifiée. C'est un milieu très peu connu et encore peu étudié malgré son importance : il nous porte, nous nourrit, recycle les déchets, purifie notre eau et régule notre climat. [1]

Le sol est le siège de nombreuses biotransformations dues aux diverses enzymes produites principalement par les microorganismes. Certaines aboutissent à la dégradation des tissus végétaux et des composés organiques qui en sont issus. Le stade ultime (Minéralisation) est le passage des éléments chimiques sous forme inorganique comme dioxyde de carbone, l'ammoniac et les anions orthophosphates. D'autres conduisent à la synthèse de diverses biomolécules et substances humiques.

La Matière Organique du Sol (MOS) est principalement composée de bio-polymères végétaux récalcitrant et de leurs produits de dégradation, et se trouve stabilisée dans le sol par des mécanismes divers (sorption sur des surfaces minérales du sol et occlusion dans des pores du sol). Cependant, on peut considérer le sol et sa teneur en matière organique (MO) comme une ressource non-renouvelable car le taux de dégradation de la MOS est potentiellement rapide par rapport aux cinétiques impliquant les processus de formation et de régénération qui sont lents. L'utilisation durable du sol peut être possible grâce à des apports d'amendements organiques, qui peuvent être considérés pour leurs contributions quantitatives. [2]

Les substances humiques (SH) sont les constituants majeurs de la matière organique. Elles sont présentes dans tous les écosystèmes, sous forme de macromolécules carbonées complexes provenant de la dégradation et de la transformation de la matière organique. Elles présentent de nombreux effets sur l'environnement au niveau du sol, des plantes ou des microorganismes. Elles sont décrites comme des molécules stimulantes. Elles ont une influence favorable sur la structure du sol, sur la croissance et sur le développement des plantes.

La biodégradation et les transformations physico-chimiques que subit la MO dans les sols sont fait l'objet de nombreux travaux [2]. Ces transformations organiques, conduisant aux SH, varient quantitativement et qualitativement en fonction de nombreux facteurs soit internes, soit externes. Selon [3], l'humus résulte de la transformation de matière première végétale sous l'influence des conditions de milieu extérieurs, climatiques (humidité, température, aération), ou physico-chimiques, si on considère le milieu minéral auquel l'humus est incorporé.

L'orientation donnée à ce travail est de contribuer à la compréhension du sol agricole, la matière organique, la biodégradation de la matière organique, et l'étude de la biodégradation de la matière organique dans le sol agricole.

Ce manuscrit s'articule autour de trois parties :

- ✚ La première partie est une approche bibliographique.
- ✚ Dans la deuxième partie les matériels de départ, les dispositifs expérimentaux et les différentes méthodologies analytiques et expérimentales utilisées seront présentés.
- ✚ La troisième partie présente les résultats obtenus ainsi que les interprétations et discussions qu'ils peuvent susciter.

En fin, en guise de conclusion générale nous proposerons une synthèse des résultats acquis, et dégagerons les perspectives de poursuite de ce travail de recherche.

Chapitre I

Le sol agricole

I.1) Introduction :

Le sol est la couche la plus mince de la surface de la terre et sa fertilité est due à l'action de l'atmosphère, de l'eau et des micro-organismes qui y vivent. Cette couche superficielle est celle qui concentre tout l'intérêt agronomique, puisque sa richesse en matière organique permet à l'agriculteur de développer des cultures. Connaître son comportement favorisera la production de biomasse grâce à une fertilisation équilibrée.

La pédologie décrit les différents types de sols ainsi formés, en distinguant la couche arable et le sol sous-jacent. L'agriculture travaille la couche arable, plus riche en matières organiques. L'horizon sous-jacent, entre la couche arable et la roche mère, contribue aussi à la nutrition de la plante en éléments minéraux et en eau (Fig. I.1).

L'agronomie s'intéresse à ces deux horizons à travers le profil cultural [4].

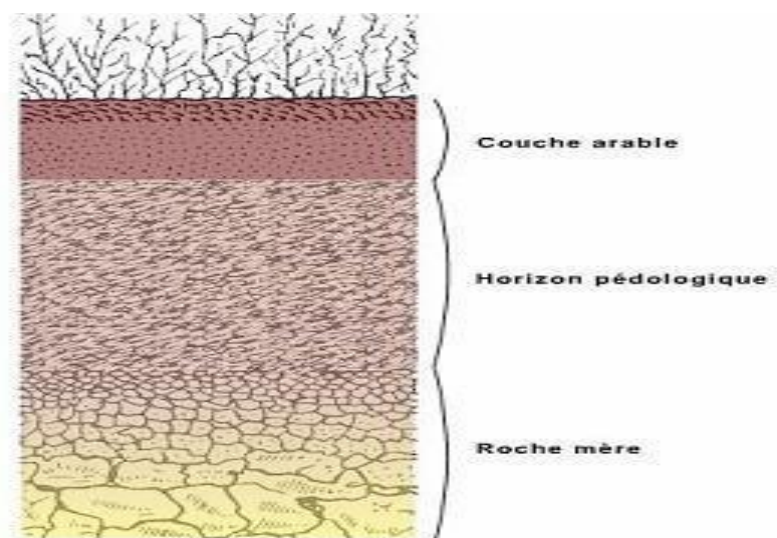


Figure I.1: Structure d'un sol. [5]

I.2) La composition du sol :

Le sol est composé d'une phase solide (minéraux et matières organiques), d'une phase liquide (eau) et d'une phase gazeuse (air entre les particules). L'interaction des trois phases confère au sol certaines caractéristiques physiques, chimiques et biologiques.

I.2.1) La phase solide :

Elle est composée de particules d'origine inorganique, agit comme un réservoir de macronutriments et de micronutriments tels que le potassium, le calcium, le magnésium et le fer. Dans une moindre mesure, il est également composé d'une partie d'origine organique, composée principalement d'azote, de phosphore et de soufre. L'origine organique du sol provient de la

décomposition par des micro-organismes de matières végétales et animales. Cette phase est étroitement liée au fait que le sol est fertile et adapté à l'agriculture.

I.2.2) La phase liquide du sol :

La phase liquide du sol est l'endroit où les macronutriments et les micronutriments essentiels à la nutrition des plantes se trouvent en solution.

I.2.3) La phase gazeuse :

La phase gazeuse correspond aux espaces entre les particules du sol, qui permettent l'échange d'azote, d'oxygène et de dioxyde de carbone.

Comment la composition du sol influence-t-elle le développement de la culture ?

La variation des trois phases expliquée ci-dessus influencera les caractéristiques physiques du type de sol adapté à l'agriculture. La texture, la structure, la température et la couleur du sol déterminent la qualité d'un sol. En bref, il est essentiel d'étudier et d'analyser le sol où poussera notre future culture afin d'obtenir des performances de production optimales.

I. 3) Les caractéristiques physiques du sol :

I. 3.1) La texture :

La texture des sols varie de sableuse à limono – argilo – sableuse selon le triangle textural de Henin (Fig.I.2). Globalement elle est sablo – limoneuse dans les zones légèrement en pente pour la plupart en milieu périurbain ou rural. Ces sols contiennent 70-85% de sable, 15-30% de limon, 10-15% d'argile. Les sols de topographie quasi – plate ou plate localisés en zones périurbaine et urbaine sont de texture sableuse (85-100% de sable, 0-15% de limon, 0- 10% d'argile). La texture limono – argilo – sableuse (50-70% de sable, 30-50% de limon, 15- 25% d'argile) caractérise les sols des zones voisines de cours d'eau pour la plupart localisées en milieux ruraux. Ce sont des sols alluvionnaires hydro-morphes, ferrugineux tropicaux ou ferralitiques hydro-morphes [5].

En fonction de leur texture les sols présentent des comportements différents qui ont des conséquences sur la gestion de l'eau, du travail du sol ou encore de la fertilité :

- ✚ **Les argiles** : sont généralement fertiles, stockent facilement l'eau et possèdent une bonne capacité d'auto structuration. Mais elles demandent une attention particulière pour le choix des conditions du travail du sol pour ne pas détériorer la structure (risque de lissage et de destruction des argiles) et sont donc difficiles à travailler.
- ✚ **Les limons** : sont naturellement riches et productifs mais ils sont très fragiles : peu résistants aux agressions climatiques et mécaniques, ils présentent un risque de battance, d'érosion et de compaction. Il faut veiller à ne pas faire de la terre trop fine lors du travail du sol.
- ✚ **Les sols sableux** : sont peu sensibles à la compaction et se réchauffent rapidement. Ils sont par contre peu fertiles et très usants pour le matériel agricole. Il est important d'apporter de la matière

organique. Ils sont aussi plus séchants car drainants.

Il est important de connaître la texture du sol puisqu'elle influe à la fois sur les pratiques agricoles et sur la fertilité du sol. Il s'agit d'une mesure classique de laboratoire.

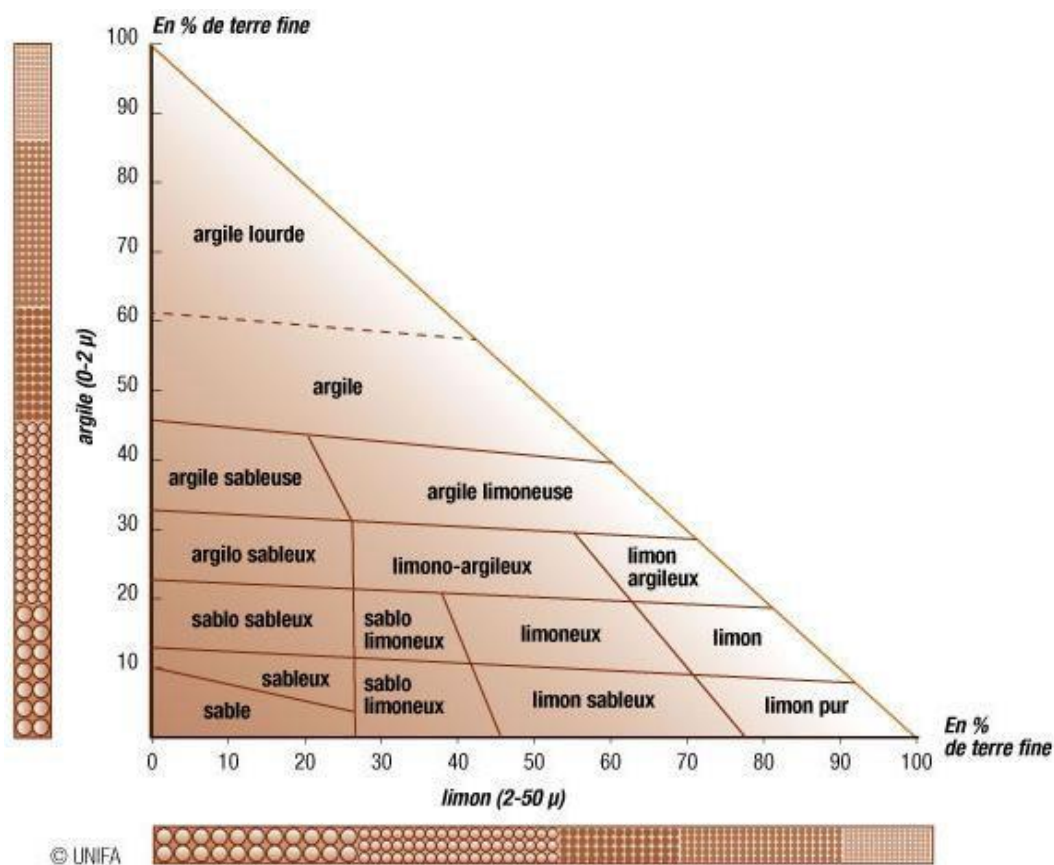


Figure I.2. Le triangle textural de Henin [6].

Afin d'apporter une meilleur représentative aux indicateurs, une échelle de notation varie selon l'indicateur, plus le chiffre est faible plus l'indicateur est positif, la note est la meilleure comme ci après :

Tableau I.1 : Notation du sol selon la texture [7].

	Note de 1	Note de 2	Note de 3
Texture	Limons Argilo Sableux Argilo Limoneux	Argilo sableux Sablo Limoneux	Argiles Limons Sables

L'impact de la pluviométrie sur les sols dépend de leur texture : Un sol argileux retiendra plus d'eau qu'un sol sableux, qui sera lui plus sensible à des épisodes de sécheresse. Un sol limoneux sera plus facilement battant et moins résistant aux agressions climatiques et aux précipitations importantes [7].

I. 3.2) la profondeur :

La profondeur du sol définit le volume de sol dans laquelle les racines peuvent se développer. Cet espace est également important pour le stockage de l'eau et la vie du sol. Plus le sol est profond, plus le développement racinaire est facilité. La réserve utile sera également plus importante.

C'est un indicateur clé de la qualité du sol puisqu'il impacte fortement le développement des cultures. Effectivement les racines des plantes cultivées, si elles ne sont pas limitées par la profondeur du sol, descendent profondément (environ 90cm pour les céréales d'hiver par exemple)

La mesure de la profondeur peut se faire avec un pénétromètre, ou par l'observation d'un profil. Plus un sol est profond plus sa capacité à stocker l'eau, et donc à résister aux épisodes de sécheresse sera importante.

Tableau I.2 : Notation du sol selon la profondeur [7].

	Note de 1	Note de 2	Note de 3
Profondeur	60 cm	30 à 60 cm	< 30 cm

I. 3. 3) Indice de différenciation texturale :

Il s'agit d'un indice servant à mettre en évidence les contrastes granulométriques entre les horizons du sol. Cet indice est basé sur le taux d'argile de chaque horizon. [8] Un sol avec un indice de différenciation texturale (IDT) nul présentera un potentiel supérieur à un sol avec un IDT élevé. Un IDT élevé pénalisera l'eau et l'enracinement. Effectivement le fonctionnement du sol doit être vertical pour circulation de la faune du sol et de l'eau ainsi que pour l'enracinement.

En plus de l'observation visuelle du profil, il est intéressant de réaliser le « test du boudin » sur les différents horizons pour évaluer leurs taux d'argile et rendre les mesures reproductibles.

On notera 3 classes d'indice de différenciation texturale figure I.3 : [7]

L'IDT impacte fortement le potentiel du sol, c'est pourquoi sa notation diffère de celles des deux premiers indicateurs.

Plus l'IDT est marqué plus le risque face aux précipitations importantes est élevé. Des précipitations fortes sur un temps court (ex : 60 mm ou plus cumulés) sont problématiques pour un sol avec un Indice de différenciation texturale élevé, qui ne sera pas en mesure de les absorber.

Tableau I.3 : Notation du sol selon l'indice de différenciation texturale [7].

	Note de 1	Note de 3	Note de 6
Indice de différenciation texturale	IDT nul	IDT moyen	IDT élevé

IDT nul		IDT moyen		IDT élevé	
Horizon x	Horizon y	Horizon x	Horizon y	Horizon x	Horizon y
					
					
					
Aucune différence de texture entre les Horizons : même résultat sur chaque horizon avec le test du boudin		Différence de texture entre les Horizons lors du test du Boudin modérée : ex : Réalisation d'un boudin sur un horizon, d'un anneau sur le deuxième. Ou impossible de réaliser un boudin sur un horizon ,possible sur le deuxième (mais pas un anneau)		Très forte différence de texture d'un horizon à l'autre. (ex: Texture sablonneuse sur un Horizon argileux ; Boudin impossible à réaliser dans les premier horizon et anneau possible ou presque avec le Second horizon)	

Figure I.3 : Classes d'indice de différenciation texturale [7]

I. 3.4) Pierrosité :

La pierrosité est le pourcentage d'éléments grossiers (>2mm) à la surface du sol. Un sol pierreux peut limiter le développement des cultures, rendre le travail du sol plus difficile, limiter la rétention d'eau ou encore user le matériel agricole. Les sols les plus avantageux sont ceux sur lesquels on ne trouve pas (ou peu de cailloux en surface).

L'estimation de la pierrosité de surface se fait visuellement, à l'aide de la grille ci-après :

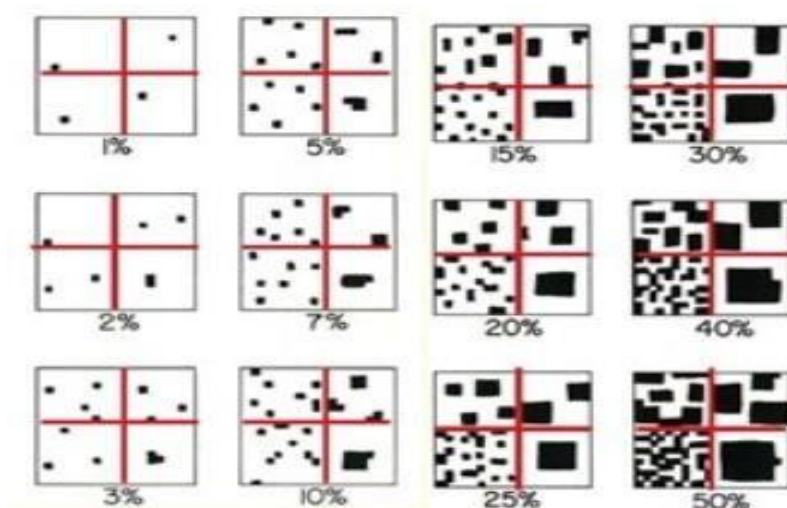


Figure I.4 : Grille d'estimation de la pierrosité du sol [7]

On classe ensuite les sols en 3 classes : pierrosité inférieure à 10%, comprise entre 10 et 20% ou supérieure à 20% .

Tableau I.4 : Notation du sol selon la pierrosité [7].

	Note de 1	Note de 2	Note de 3
Pierrosité	< 10 %	10 à 20 %	> 20 %

La pierrosité d'un sol améliore sa perméabilité et permet une meilleure pénétration de l'eau mais avec, en cas d'une forte présence superficielle de cailloux, une diminution de la surface utile d'humectation.

Le drainage est également augmenté ce qui peut être un atout dans les sols à risque de saturation en eau (base argileuse ou limoneuse) mais constitue une difficulté supplémentaire dans les sols grossiers à faible pouvoir de rétention d'eau. De même, cet effet sera souvent positif en saisons Humides (augmentation de la portance, drainage) mais négatif en périodes sèches (faible réserve hydrique, assèchement) (agro-reporter)

I. 3.5) Hydromorphie :

L'hydromorphie est la manifestation morphologique de l'engorgement (ancien ou actuel) sous la forme de taches, de concentrations, de colorations ou de décolorations, résultant de la dynamique des deux éléments colorés en milieu alternativement réducteur (pauvre en oxygène) puis réoxydé (présence d'oxygène) : le fer et le manganèse. [1]

La notation d'hydromorphie répond à la classification du GEPPA qui répartit les sols en 6 classes selon leur seuil d'hydromorphie. Ces classes sont déterminées par la profondeur d'observations des traces d'hydromorphie (traces rouilles ou bleues).



Figure I .5 : Traces rouille (caractère rédoxique marqué)
source : bassin versant du Meu .



Figure I.6: Traces bleues (caractère réductique)
source E.Martin

Un sol présentant ces caractéristiques d'hydromorphie entraîne l'accumulation d'eau dans la partie supérieure du sol lorsque cette zone est saturée, elle va ruisseler en surface. En cas de précipitations importantes le sol n'aura pas la capacité de drainage nécessaire pour évacuer cet excès d'eau, ce qui va restreindre le développement biologique des racines par asphyxie.

Tableau I.5 : Notation du sol selon l'hydromorphie [7].

	Note de 1	Note de 3	Note de 6
Hydromorphie	Classes I, II et III	Classes IV a ,b etc	Classes IV d à VI

I. 3.6) Changement climatique :

D'après le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), le changement climatique et le réchauffement de l'atmosphère vont contribuer à l'augmentation de la fréquence des événements de précipitations extrêmes. Voici les conclusions du rapport du GIEC de 2013 : [1]

- ✚ La fréquence ou l'intensité des épisodes de fortes précipitation sa probablement augmenté, au moins en Amérique du Nord et en Europe.
- ✚ Il est probable que les influences anthropiques affectent le cycle mondial de l'eau depuis 1960 : elles ont contribué aux augmentations du contenu atmosphérique en vapeur d'eau et à l'intensification des épisodes de fortes précipitations sur les régions continentales.
- ✚ Les épisodes de précipitations extrêmes deviendront très probablement plus intenses et fréquents sur les continents des moyennes latitudes et dans les régions tropicales humides d'ici la fin de ce

siècle, en lien avec l'augmentation de la température moyenne en surface. Ce phénomène s'explique par le réchauffement atmosphérique : « Une atmosphère plus chaude peut potentiellement transporter 7 % d'humidité en plus par degré de réchauffement, conformément à la relation de Clausius-Clapeyron. »

I. 3.7) Structure du sol :

La structure du sol est le résultat, à un moment donné, de l'équilibre entre les phénomènes de tassement (par le passage d'engins agricoles, conditions humides d'intervention), de fragmentation (par le climat, la faune [9] et/ ou le travail du sol), d'agrégation (par des compactions modérées ou par le climat et/ou la faune) et de déplacement du sol par le travail du sol.

La structure d'un sol labouré est extrêmement hétérogène. Elle est composée de l'assemblage de sol fin, de mottes compactées ou non (décimétriques), de résidus de cultures répartis le long de la bande de labour, de vides et de fissures issus de l'action de retournement, de déplacement et de fragmentation de la charrue sur la couche de sol labourée [2].

A l'inverse, la structure d'un sol non travaillé est plus homogène et présente souvent une structure plus massive composée de macro-pores d'origine biologique. Les fissures et les vides sont en général moins importants dans les sols non travaillés ou dans les systèmes de travail du sol réduit du type chisel. Par ailleurs, les résidus de cultures ne sont pas enfouis en profondeur et sont concentrés en surface ou dans les premiers centimètres de sol, améliorant la stabilité structurale du sol [10].

I.3.8) Le pH du sol :

Le plus souvent les cultures ont besoin d'un pH proche de la neutralité. Un sol trop acide (L'ion H^+ domine, laissant peu de place aux autres éléments nutritifs dans le CAH) a de nombreuses conséquences :

- ✚ Sur la fertilité chimique : blocage des engrais phosphatés, diminution de l'efficacité des engrais, taux de saturation insuffisant, solubilisation d'éléments toxiques (Al^{3+}), risque de carences en molybdène.
- ✚ Sur la fertilité biologique : réduction de la faune utile du sol, activité bactérienne limitée, mauvaise dégradation des résidus de récolte, développement de parasites.
- ✚ Sur la fertilité physique: diminution de la stabilité structurale, diminution de la porosité, terre plus difficile à travailler.

Un sol basique peut impacter la disponibilité de certains éléments, comme le bore, le manganèse, le zinc ou le cuivre. A l'inverse un sol acide est problématique pour le molybdène.

La figure ci- dessous illustre la disponibilité des éléments dans le sol en fonction du pH.

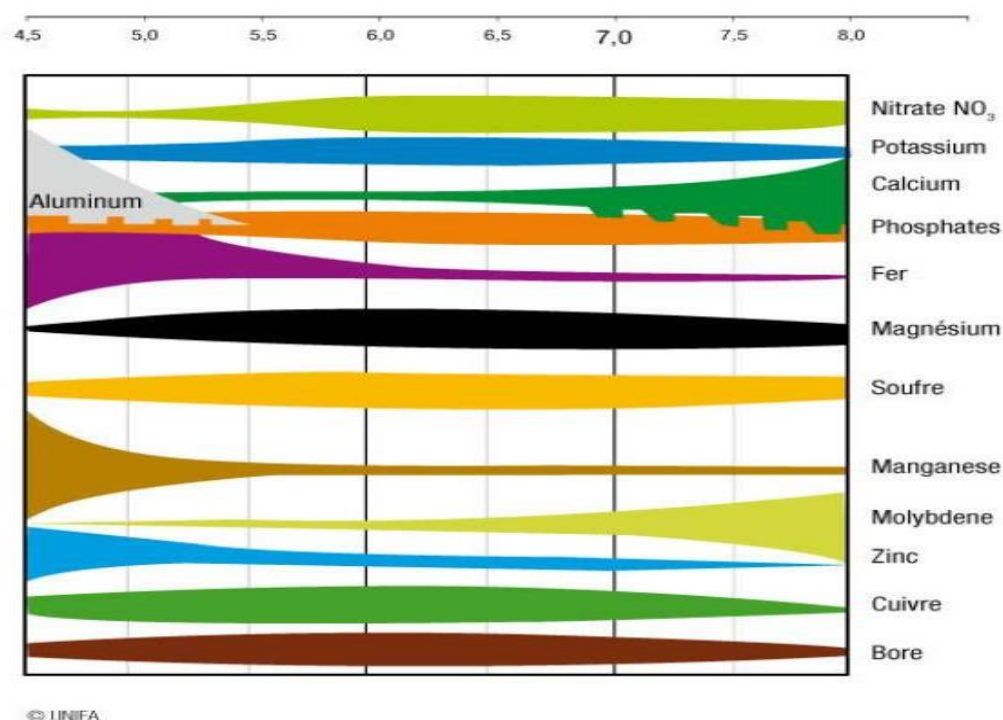


Figure I.7 : Influence du pH sur la disponibilité des éléments [7]

La mesure du pH peut se faire sur le terrain à l'aide d'un pH-mètre ou être réalisée par le laboratoire. (Les valeurs ci-dessous correspondent au pH eau) Les mesures sont à répéter plusieurs fois (utiliser la moyenne des valeurs obtenues).

Tableau I.6 : Notation du sol selon le pH eau [7].

Note de 1	Note de 2	Note de 3	Note de 4	Note de 5
De 6.5 à 7.2	De 6 à 6.5 et de 7.2 à 8	De 5.5 à 6	De 5.2 à 5.5 et > 8	pH < 5.2

I.4) Les propriétés chimiques du sol :

Ils sont un ensemble de caractéristiques, en fonction de phénomènes chimiques ou physico-chimiques, en relation étroite avec le climat et surtout les organismes vivants, qui se combinent pour définir l'un des aspects de la fertilité d'un sol, affectant la virtualité productive des plantes cultivées.

Le sol est un complexe chimique dans le système qui comprend également réaction redox d'autres termes, en fonction de certains facteurs environnementaux, le sol se comporte comme un agent oxydant ou agent réducteur contre certaines espèces chimiques. La biologie du sol représente en masse 0,25% de la masse du sol ; ceci est assez faible en part, mais représente tout de même environ 4,5 t/ha. Ainsi, il peut y avoir des milliards de protozoaires (animaux unicellulaires) et de

bactéries, des dizaines de millions de nématodes et des centaines de milliers d'acariens dans un mètre carré de couche arable. Certains sont des consommateurs primaires, d'autres des prédateurs, et enfin certains autres des décomposeurs.

I.4.1) La capacité d'échange cationique et le taux de saturation :

La capacité d'échange de cations (CEC) est la quantité de cations échangeables, exprimée en milliéquivalents 100 grammes (MEq / 100 g), qu'un matériau ayant des propriétés d'adsorption peuvent retenir l'échange d'ions. L'échange d'ions est l'un des mécanismes les plus importants par lequel le sol conserve et met à disposition des plantes et les microorganismes d'éléments tels que le calcium, le magnésium, le potassium, l'azote ammoniacal, de sorte que le CSC est un indice de fertilité potentiel chimique terre.

Plus la CEC est élevée plus le sol à la capacité de stocker ces éléments. Cette capacité d'échange cationique dépend du taux de matière organique ainsi que du taux d'argile : Un sol argileux aura une CEC plus élevée qu'un sol sableux.

Il est intéressant de regarder le taux de saturation de la CEC (S/CEC) : cette valeur représente le taux de remplissage du réservoir sol. Cette saturation est liée au pH : plus le pH est acide plus il y a d'ions H^+ fixés sur le CAH, à la place des autres éléments : ainsi, le taux de saturation sera faible. En sols basiques le taux de saturation sera élevé. Un pH proche de la neutralité est donc souhaitable pour faciliter les échanges de cations. La CEC, le taux de saturation et le pH seront notamment utiles pour déterminer les besoins en amendements basiques [7]

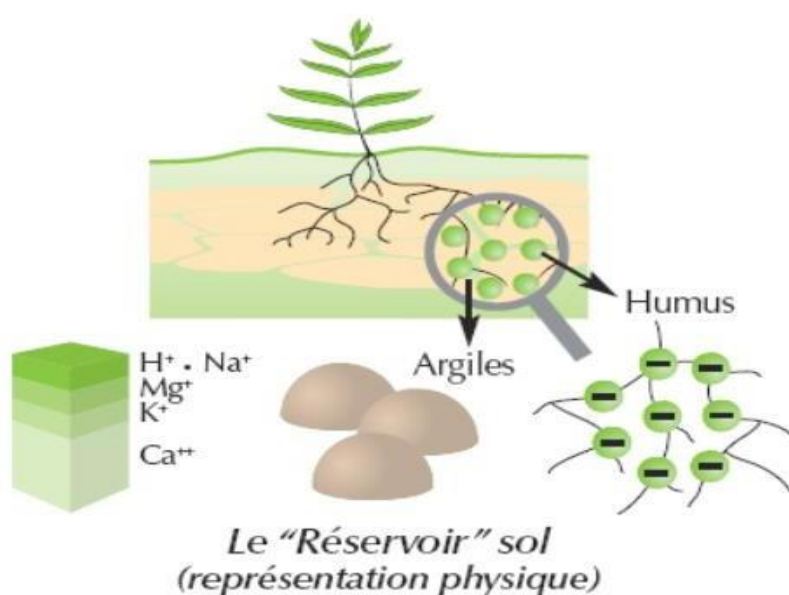


Figure I.8 : Représentation de la CEC (wiki Aurea)

I.4.2) La teneur en éléments majeurs :

Les éléments nutritifs, que ce soit les éléments majeurs (Phosphore, Potassium, Azote, Magnésium, Calcium) ou les Oligoéléments (Fer, Manganèse, Zinc, Cuivre, Bore, Molybdène...) sont nécessaires à la production végétale, au même titre que l'eau ou le climat. Si l'un de ces paramètres s'éloigne de l'optimum, il devient donc limitant, et tout le système productif est déstabilisé. Avec les maladies, les carences sont souvent synonymes d'un déséquilibre.

Lorsque les symptômes de carences sont visibles, l'état de sous-nutrition de la plante est déjà avancé. Il est préférable de les anticiper ; une analyse de sol permet de faire l'état des lieux des teneurs en éléments majeurs et d'adapter ses pratiques [7].

Les analyses de laboratoires sont interprétées sous forme graphique, on y trouve pour chaque élément une teneur faible, bonne ou trop élevée. Ces interprétations sont propres à chaque laboratoire et correspondent au type de sol. La méthode de notation de ce critère dépend donc de ces résultats :

Tableau I.7 : Notation du sol selon la teneur en éléments majeurs [7].

Note de 1	Note de 2	Note de 3	Note de 4	Note de 5
Présence de tous les éléments en quantité suffisante.	Déficit modéré de quelques éléments (Teneur « un peu faible » de 1 à 3 nutriments)	Clair déficit de quelques nutriments (2 maximum, teneur de faible à très faible)	Clair déficit de la plupart des éléments (teneur faible)	Déficit extrême, teneurs très faibles pour la plupart des nutriments (ou tous)

Source : The Muencheberg soil quality rating

I.4. 3) La teneur en oligo-éléments :

Chaque oligo-élément joue un rôle essentiel dans le développement des cultures. La quantité absorbée est très faible (quelques dizaines de grammes par hectare) mais ils sont indispensables à la bonne santé du végétal. Les plus souvent analysés et ceux sur lesquels nous nous concentrons sont le fer, le manganèse, le cuivre, le Zinc, le bore et le molybdène. Cobalt, nickel, iode et sélénium ont aussi leur rôle même si leurs concentrations sont infimes. A trop forte concentration ces éléments peuvent également être toxiques. Méthode identique à celle utilisée pour les éléments majeurs [11].

I.4.4) La teneur en matière organique :

La matière organique est au centre du fonctionnement du sol, avec de nombreux rôles :

- ✚ C'est le substrat de base des organismes du sol (micro et macrofaune) : ils se nourrissent en métabolisant la matière organique puis servent eux même de substrat à leurs prédateurs.
- ✚ C'est un réservoir d'éléments nutritifs indispensables aux plantes cultivées.
- ✚ Elle influe fortement sur la capacité du sol à retenir les éléments nutritifs.
- ✚ Elle contribue à la structuration du sol, en participant à la formation du complexe argilo-

humique et à la formation de macro porosité, permettant un bon fonctionnement racinaire et l'infiltration de l'eau.

✚ Elle contribue à augmenter la réserve utile en eau.

Les nombreuses fonctions de la matière organique et sa nécessité pour les plantes cultivées font de la teneur en MO un indicateur pertinent :

✚ **Si la matière organique < 15g/kg de terre , soit 1.5% :** le sol n'a plus de réserves de nutriments d'où une limitation de la biomasse du sol, impliquant une baisse de fertilité du sol et son incapacité à s'adapter aux conditions de culture (en cas de stress, la plante souffrira immédiatement).

✚ **Si la matière organique > 45g/kg, soit 4.5% :** une grosse partie de la matière organique n'évolue plus ou pas selon la notation ci après :

Tableau I.8 : Notation du sol selon la teneur en MO [7].

Note de 1	Note de 3	Note de 5
2 à 4 % de MO	Plus de 4% de MO Ou entre 1.5 et 2%	Moins de 1.5% de MO

I.4.5) Le rapport C/N :

Le rapport C/N est utilisé pour caractériser l'évolution des matières organiques dans le sol (Tableau I.9). Un rapport C/N faible est signe de décomposition trop rapide de la matière organique ; il sera alors conseillé de réaliser des apports de MO stable. Avec un rapport C/N trop élevé, l'activité biologique du sol est trop faible: il est utile de stimuler l'activité du sol (drainage pour réduire l'hydromorphie, apports d'engrais organiques à minéralisation rapide...) [7].

Tableau I.9 : L'évolution des matières organiques dans le sol MO [7].

C/N	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
	TRÈS FAIBLE							TRÈS ÉLEVÉE		← VIE BIOLOGIQUE RALENTIE
	Décomposition très rapide de la MO			Bonne décomposition de la MO				Décomposition lente de la MO		

Tableau I.10 : Notation du sol selon le rapport C/N [7].

Note de 1	Note de 3	Note de 5
C/N compris entre 8 et 11	C/N compris entre 7 et 8 ou Entre 11 et 13	C/N inférieur à 7 ou supérieur à 13

I.5) La fertilité biologique du sol :

La fertilité biologique du sol influe sur l'état physique du sol, la quantité de matière organique et la disponibilité des éléments nutritifs.

L'indicateur choisi consiste à compter les vers de terre des trois grandes familles : anéciques, épigés et endogés.

Cette population peut être affectée par la structure, la texture, le pH ou encore la quantité de matière organique du sol.

Il est important d'évaluer la fertilité biologique car elle est liée à l'ensemble des autres paramètres du sol. Si nous avons choisi de le faire avec le protocole de comptage des vers de terre de l'OPVT c'est pour les caractéristiques de ce test : économique, acquisition des données et interprétation facile.

Attention toutefois à ne pas utiliser cet indicateur seul, il est intéressant en complément des précédents, comme confirmation.

Le comptage des vers de terre peut se faire en même temps que le test bêche : Effectivement il s'agit de prélever 6 bêchées et de compter dans chacune d'elle les vers adultes. Ce test est à réaliser entre février et Avril, période d'activité maximale des vers de terre.

Par souci de simplification nous retiendrons les valeurs ci-dessous (moyenne du nombre de vers dans la bêchée) pour l'évaluation de la fertilité biologique : [7]

Tableau I.11 : Notation du sol selon le nombre des vers dans une bêchée [7].

Note de 1	Note de 3	Note de 5
Plus de 8 vers par bêchée	4 à 8 vers par bêchée	Moins de 4 vers par bêchée

I.5) Conclusion :

L'analyse de sol est une méthode utilisée pour évaluer la composition chimique, la structure et la fertilité du sol. Elle implique généralement des tests en laboratoire pour mesurer des paramètres tels que le pH, la teneur en éléments nutritifs essentiels comme l'azote, le phosphore et le potassium, ainsi que la présence de contaminants éventuels. Ces données aident les agriculteurs et les spécialistes de l'environnement à prendre des décisions éclairées sur la gestion des sols, telles que le choix des cultures, l'application d'engrais et la prévention de la pollution.

Chapitre II

La matière organique (Formation des substances humiques

II.1) Introduction :

La matière organique désigne une gamme de substance très différents et à des stades d'évolution très variée [12].

Elle représente le plus important réservoir de carbone (C) continental, composée en moyenne de 58% de carbone organique.

Cette M.O est un élément essentiel de la fertilité des sols, joue un rôle essentiel dans la réserve nutritive, la capacité hydrique, le pouvoir tampon et l'amélioration physique du sol.

La matière organique du sol comprend l'ensemble des résidus des organismes vivants, animaux et végétaux incorporés dans le sol, sans tenir compte de leur état de décomposition [13].

On désigne sous le terme de M.O un ensemble de substance organique de nature et de propriétés variées.

La M.O est définie comme la matière spécifique des êtres vivants végétaux et animaux [14]. Une partie de cette M.O montre l'activité de tout organisme présent à la surface ou à l'intérieur du sol. Une autre partie est produite par les organismes vivant : Déjection animales, exsudats racinaires et litière végétale et polysaccharides microbiens.

Le reste est constitué par les débris des végétaux morts, les cadavres d'animaux et les cellules microbiennes lysées.

II.2) Le sol et la matière organique :

La matière organique des sols est principalement constituée de macromolécules, complexes possédants de nombreuses fonctions pouvant modifier la biodisponibilité et le transport des particules tel que; les métaux, les éléments organiques. D'autres molécules plus petites et plus mobiles dérivées de décomposition des macromolécules sont aussi présentes dans les sols, et sont toutes aussi importantes de par leurs influences dans la mobilité et la biodisponibilité des éléments

Les composants organiques des sols sont le résultat directe ou indirecte de la biodégradation et peuvent se deviser en deux grands groupes : les substances non humiques et les substances humiques.

Les substances humiques sont les constituants majeurs de la matière organique [15]. Elles présentent de nombreux effets sur l'environnement au niveau du sol, des plantes ou des microorganismes. Elles sont décrites comme des molécules stimulantes. Elles ont une influence favorable sur la structure du sol.

II.3) Composition de la matière organique du sol :

Les constituants organiques sont des éléments essentiels des écosystèmes terrestres et aquatiques. Au niveau des sols, ils se composent de la biomasse constituée par les organismes vivants, la microflore et la microfaune et de la matière organique, ensemble des tissus, animaux, végétaux et microbiens morts et de leurs produits de décomposition résultant des transformations microbiennes et chimiques des débris organiques (figure II.1).

Cette dégradation de la biomasse produit d'abord des matériaux facilement dégradables, servant de substrats aux micro-organismes du sol. La décomposition plus lente des autres débris induit la formation de substances humiques. La durée de ce processus varie de quelques mois à quelques années et aboutit à la minéralisation complète des résidus organiques.

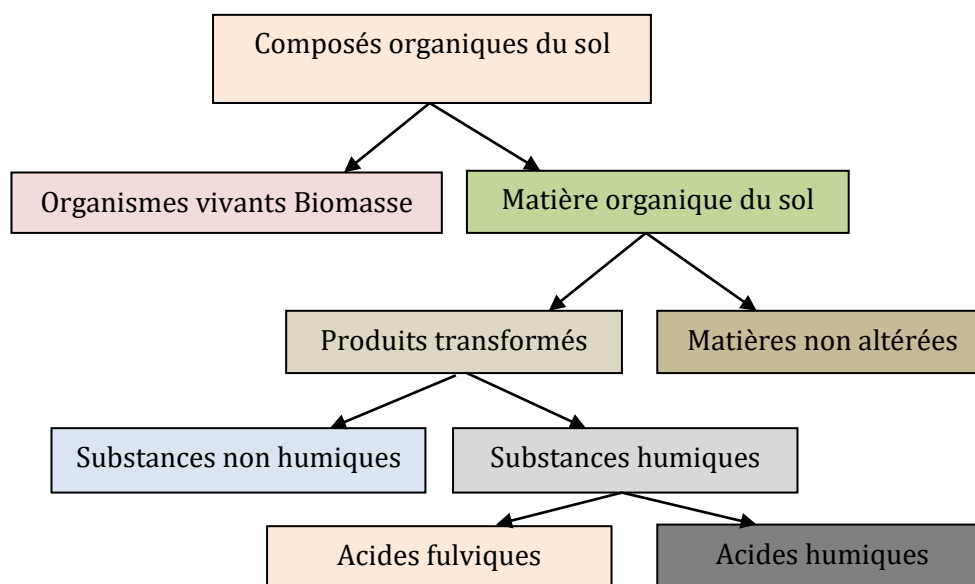


Figure II.1 : Distribution de la matière organique des sols [16]

La matière organique des sols est très hétérogène en raison de la nature des constituants qui la composent et de leur stade de décomposition. Ces constituants varient selon la diversité de la biomasse et la composition des sols qui en résulte. De plus, la dégradation des débris organiques est influencée par les conditions pédoclimatiques (pH, température, humidité et aération du sol) et la variabilité de la flore microbienne.

II.4) Transformation de la matière organique du sol :

Les sols renferment en moyenne 2 à 8 % de matière organique. La production de biomasse dans un écosystème se traduit à la mort des organismes par le retour au sol des matières organiques fraîches. Grâce au processus d'humification, la décomposition des débris organiques constitue un processus de base permettant de garder un niveau de matières organiques constantes et fonction du

type de sol.

Le processus d'humification fait partie intégrante des cycles de minéralisation du carbone, de l'azote ou du soufre assurant un remplacement continu de ces éléments passant de l'élément constitutif à l'élément nutritif. Il permet l'enrichissement du sol en éléments minéraux, en azote par l'intermédiaire des décompositions de protéines ou d'acides ribonucléiques. Ces diverses transformations apparaissent sur la figure II.2 qui illustre un modèle développé pour simuler la dynamique du carbone dans le sol. Il sous-entend plusieurs vitesses déminéralisation et montre le rôle essentiel des micro-organismes.

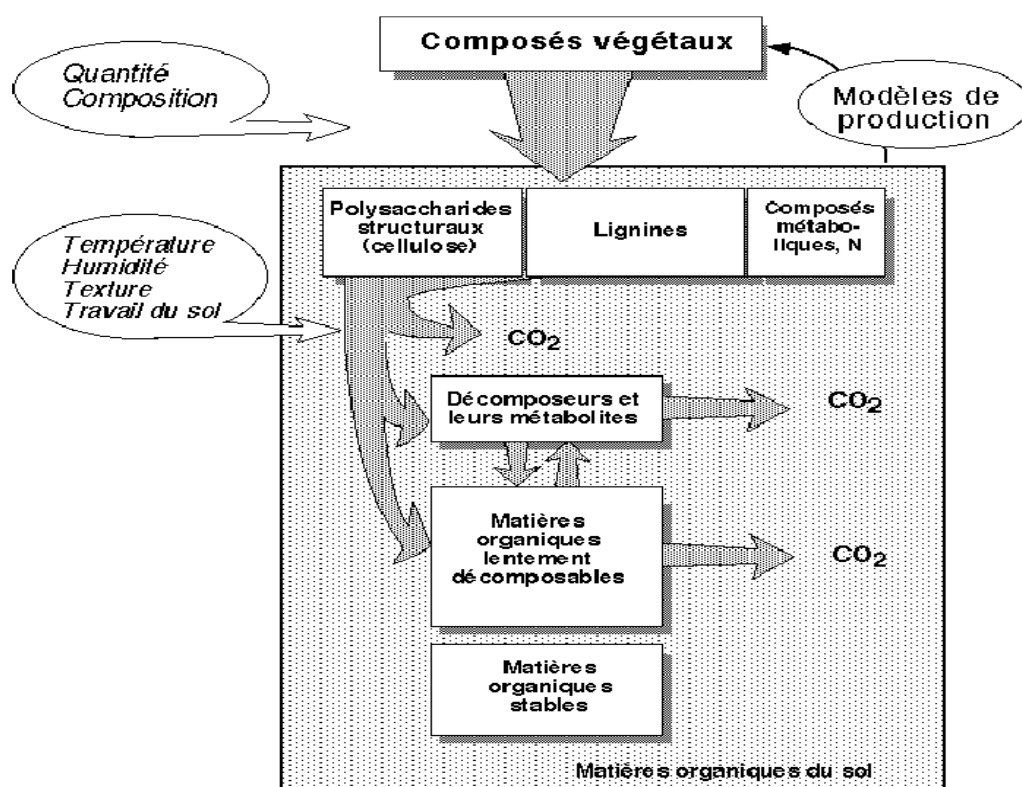


Figure II.2 : Dynamique du carbone dans le sol [17]

La mort cellulaire des différents organismes est suivie par des réactions de dégradations chimiques et biologiques des tissus et une forte activité de synthèse microbienne [15]. Les débris organiques sont consommés par différents organismes décomposeurs du sol (arthropodes, champignons, bactéries) qui permettent leur fragmentation, leur digestion et leur incorporation au sol. La faune du sol, notamment les vers de terre, joue un rôle essentiel dans la dégradation de la matière organique fraîche en réduisant la taille des résidus végétaux.

Au terme de leur décomposition, les constituants de la matière organique fraîche subissent les étapes de minéralisation caractérisées par des vitesses de dégradation différentes. Les fragments organiques sont soit minéralisés en ions et molécules simples (CO_2 , H_2O), assurant la restitution des

éléments minéraux, nécessaires à la croissance et au développement des plantes, soit transformés en molécules complexes par les processus d'humification.

Dans un premier temps, la matière facilement biodégradable (protéines et polysaccharides) est décomposée par les bactéries cellulolytiques et les champignons protéolytiques. La plupart du carbone des résidus organiques tombés au sol est rapidement oxydé en CO_2 . Les hydrates de carbone et les protéines sont complètement décomposés et assimilés par les microorganismes avant d'être minéralisés. Au terme de cette étape, 70% de la matière organique initiale a été minéralisée. Le reste du carbone non aromatique est incorporé à la matière organique du sol. Sa stabilisation résulte alors de l'incorporation de produits du métabolisme microbien et de la liaison des fragments peptidiques et polysaccharidiques aux substances humiques [18].

Les composés aromatiques tels que la lignine, sont plus résistants à la décomposition. Ainsi, seulement 30% des composés aromatiques sont oxydés et une très faible quantité est incorporée à la biomasse microbienne. Les résidus de cette étape sont transformés dans une moindre mesure (1 à 6% de leur masse) par la microflore du sol et se mélangent aux déchets organiques nouvellement apportés. Les produits de dégradation de la lignine constituent une des sources des composés aromatiques conduisant à la formation de substances humiques.

II.5) Définition des substances humiques :

La matière organique dans le sol est divisée en deux parties:

- ✚ Les substances non humiques : sont les composés dont les caractéristiques chimiques sont déterminées et connues tel que les carbohydrates, protéines, peptides, aminoacides. Elles ont un faible poids moléculaire.
- ✚ Les substances humiques (SH) : résistent aux dégradations biologiques, elles contiennent plusieurs fonctions chimiques et caractéristiques physiques liées à leurs natures organiques [19].

Les substances humiques sont présentes dans tous les écosystèmes, sous forme de macromolécules carbonées complexes. Ce sont des colloïdes polydisperses, dérivés de la dégradation biologique, physique et chimique des matières organiques. Elles se caractérisent par une structure complexe et amorphe [20]. Représentant 70-80% de la composition des sols en matière organique et de 50-80% dans la composition des eaux naturelles et sédiments [21] ; les substances humiques ont une grande capacité d'échange allant de 5 à 12 mol/g, cela est dû aux groupements fonctionnels carboxyliques, phénoliques et acides présents dans leurs structures [20].

Les substances humiques possèdent une structure compliquée et une grande surface avec beaucoup de groupements fonctionnels et des électrons libres ; de nature poly-électrolyte, elles peuvent interagir avec les métaux via l'adsorption, la complexation et des réactions

d'oxydoréduction [22], et peuvent interagir avec les molécules organiques tels les pesticides, par adsorption [21].

Considéré comme polymère avec des groupements fonctionnels tel que : carboxylique (COOH), carboxide (CO), methoxy (OCH₃), hydroxyle (OH) et phénoliques (Ar-OH) ; les substances humiques peuvent être dérivées de trois catégories : Acide fluvique, Acide humique et humine, avec des poids moléculaires et stabilité différentes.

- ✚ **Acide fluvique (AF)** : a un poids moléculaire modéré, provient des matières organiques, il n'a pas de composition spécifique et il est soluble à toutes les valeurs du pH.
- ✚ **Acide humique (AH)** : a le plus grand poids moléculaire, soluble en milieu alcalin et précipite en milieu acide (pH<2).
- ✚ **Humine** : est constitué d'une portion de matière organique ou de sédiments dans le sol, il est insoluble pour toutes les valeurs du pH [22].

La formation de la matière humique implique un processus d'humification des espèces organiques présentes dans le sol : une 1^{ère} dégradation produit d'abord des matériaux facilement dégradables servant de substrats aux micro-organismes du sol. Une décomposition plus lente des autres débris induit la formation de substances humiques ; La durée de ce processus varie de quelques mois à quelques années. Plusieurs réactions d'humification ont été proposées ; impliquant une origine végétale par la dégradation des tissus lignifiés (lignine) et une origine microbienne par la décomposition des autres résidus organiques.

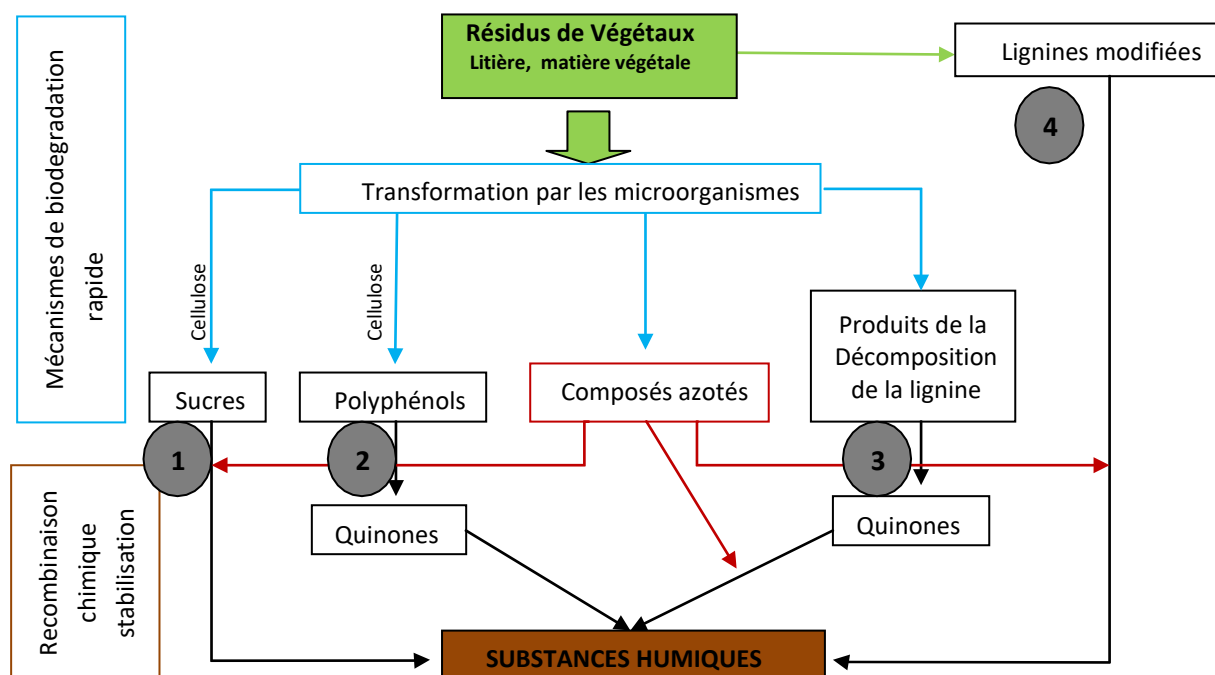


Figure II 3 - Mécanismes de formation des substances humiques du sol [23]

II.6) Les sources de substances humiques :

Il existe de nombreuses sources de substances humiques qui diffèrent par leur genèse et leur composition. Les différents types de SH conservent une nature de macromolécules carbonées à dominante aromatique, plus ou moins substituées et liées à des fonctions aminées, des chaînes glucidiques et aliphatiques. La distinction entre les différentes sources s'effectue selon leur processus de formation qui peut être soit naturel soit artificiel. Dans chaque cas, l'intervention de l'homme dans l'obtention des molécules humiques peut varier, de la simple extraction au contrôle du procédé.

II.6.1) Les substances humiques naturelles :

Les substances humiques naturelles sont issues des processus de formation naturels faisant intervenir des transformations chimiques et microbiologiques. Elles se retrouvent dans les sols, dans des formations géologiques spécifiques comme les tourbières, les dépôts de lignite [24] ou dans les produits de transformation de la matière organique par l'homme tel que les fumiers ou le compostage [26]. L'intervention de l'homme est généralement limitée à la seule extraction des matières humiques (sols, tourbes, léonardite) mais peut apparaître dans le contrôle du procédé de fabrication (compostage) :

Substances humiques de tourbes :

Selon les conditions environnementales, la vitesse de dégradation de la matière organique évolue. Dans un milieu saturé en eau en permanence, la matière organique tend à s'accumuler sous forme de tourbe. L'évolution de la matière organique dans les sols tourbeux est un processus très long qui se réalise essentiellement en condition anoxique et acide. Les propriétés physiques et chimiques, l'état de l'eau, la végétation et la faune microbienne d'un sol déterminent la qualité et la quantité de substances humiques de tourbes.

Substances humiques de léonardite :

Au cours du temps, l'accumulation de matière organique, recouverte par les sédiments, subit un compactage et une lente transformation, dans un milieu réducteur, en lignite puis en charbon. Suite aux altérations météorologiques, la modification des propriétés réductrices du milieu, induit l'oxydation et la transformation des dépôts de lignite en léonardite. La teneur et la pureté des substances humiques de léonardite varient en fonction de la localisation géographique des gisements (USA, république Tchèque, Espagne...) et de leur composition (argile, silice).

Substances humiques de fumiers :

La production de fumier résulte du mélange de déjections animales et de débris végétaux (pailles, rafles, fanes) issues des litières. Elle constitue l'une des plus anciennes sources de substances humiques faisant intervenir l'homme mais ne nécessite pas de contrôle de la production.

Substances humiques de compost :

Hormis les processus se produisant naturellement dans l'environnement, la synthèse de substances humiques peut être réalisée de manière contrôlée. Le traitement des déchets par compostage est une technique naturelle, basée sur le processus biologique de décomposition des déchets organiques (déchets verts, partie fermentescible des ordures ménagères...). Elle fait intervenir une abondante microflore aérobie (bactéries, champignons...) naturellement présente dans les déchets. Quatre paramètres sont contrôlés pour optimiser la production de compost : l'oxygénation, la température, le pH et l'humidité.

II.6.1) Les substances humiques artificielles :

Issus d'un procédé entièrement contrôlé par l'homme. Des transformations biochimiques effectuées sur des matières carbonées peuvent produire des matières humiques appelées substances humiques «like». Ces processus correspondent à des dégradations contrôlées de substrat organiques par voie microbienne. Ils sont réalisés en bioréacteur avec un mélange de souches définies et ne correspondant pas à la variabilité présente dans le milieu naturel.

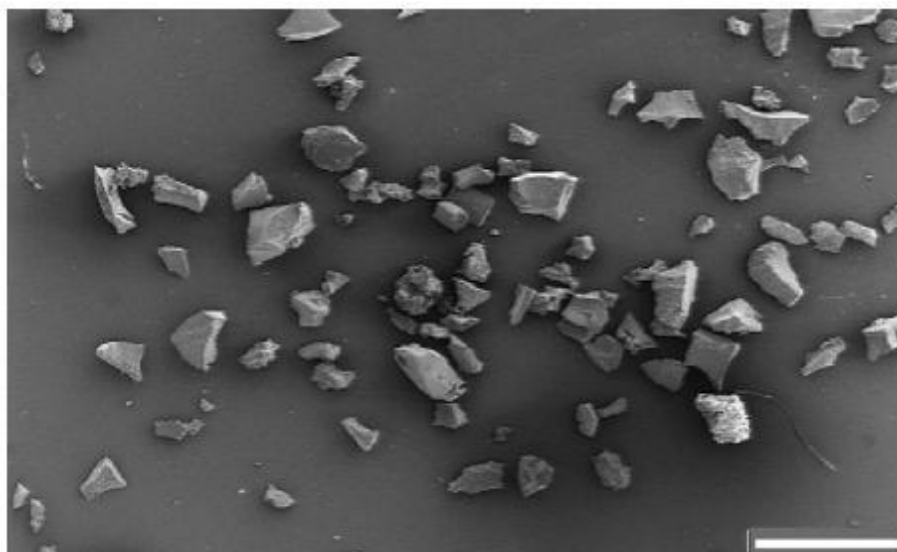
II.6) Structure des substances humiques :

Par leur aspect macromoléculaire, et la présence de groupements fonctionnels variés, les substances humiques sont considérées comme une mixture de différentes molécules amphiphiles, qui leur attribue une grande capacité à fixer les métaux, les contaminants organiques et minéraux sur leurs surfaces [3]. Elles sont composées en général de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote, à des pourcentages variés selon la nature du sol et le mode d'obtention.

Les substances humiques sont des structures complexes peu définies, compte tenu de la présence de nombreux groupements fonctionnels tel que : carboxylique (COOH), carboxide (CO), méthoxy (OCH₃), hydroxyle (OH) et phénoliques (Ar-OH) responsables de leur réactivité [22] et malgré de nombreuses études, il est difficile de les représenter par une formule moléculaire.

L'extraction d'une fraction pure et la détermination d'une structure s'avère compliquée. Toutefois, plusieurs modèles proposés, ne présentent en général que des séquences de structure humique.

Parmi ces modèles, le modèle de Stevenson (Figure II.4), qui est le plus cité et permet de donner une idée sur la complexité structurale de ce type de molécules ; il représente ainsi les acides humiques comme des macromolécules aromatiques complexes.



**Figure II.6 : Microscopie SEM d'acide humique
(bande blanche correspond à 1000μm) [3]**

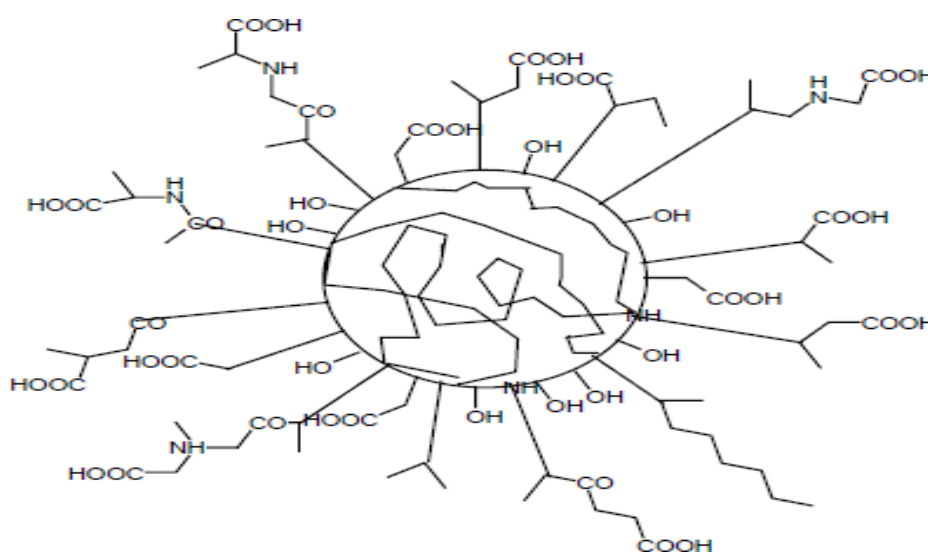


Figure II.7 : Modèle de structure des composés humiques [27]

Les substances humiques sont de structure comparable aux protéines et aux polymères (polystyrène sulfoné) est possèdent une forme globulaire [28] ; ainsi Senesi et ces collaborateurs , et par une étude microscopique propose une forme globulaire et une structure repliée de l'acide humique à $\text{pH} < 4$, qui s'allonge et se déroule pour des $\text{pH} > 6$ [10], aussi Cameron et al ; ont démontré que les substances humiques en solution se comportent comme des séries de charges, reliées entre elles par des liaison hydratées, et conclus par la suite que la distribution de la masse moléculaire de

l'acide humique est sphérique et gaussienne au centre. La représentation d'Andreux (Figure I.8) propose une structure globale des substances humiques avec un noyau central aromatique et sur lequel sont fixées des chaînes latérales aliphatiques ramifiées.

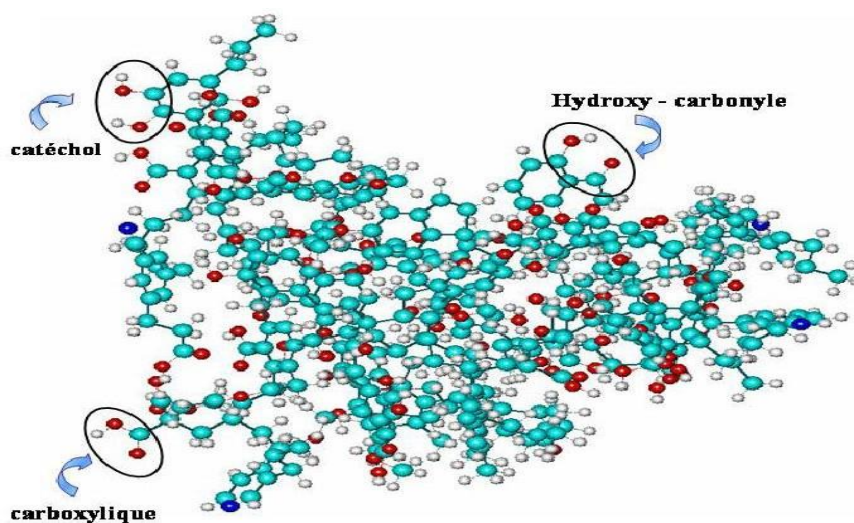


Figure I.8 : Structure tridimensionnelle de l'acide humique [27]

Au travers de ces différents modèles, deux types de structure peuvent être distingués. Le premier type est directement lié aux processus de formation de SH qui définissent la composition et la taille des divers fragments et introduisent une notion de structure primaire des molécules humiques. Le second type de structure peut être assimilé à une structure secondaire (modèle de Schnitzer et Piccolo). Elle dérive des propriétés chimiques des molécules primaires et de leur capacité à établir des liaisons intra et inter moléculaire et la formation de structure polymérisée ou de complexe supramoléculaire. Globalement, sans obtenir une représentation caractéristique unique, l'étude de la structure des SH informe sur les composants structuraux et les groupements fonctionnels qui déterminent les propriétés des SH.

II.8) Propriétés des substances humiques :

La nature acide des groupes fonctionnels confère aux SH un caractère poly-électrolytique de type anionique dont résultent leurs propriétés complexantes vis-à-vis des ions métalliques. Le pH et la concentration des molécules influencent la structure des substances humiques [15] et indirectement leur pouvoir complexant. Grâce aux liaisons hydrogène, et de Van der Waals, les molécules s'articulent et prennent des structures hélicoïdales. En solution concentrée, les substances humiques adoptent une structure condensée qui limite le nombre de groupements acides libres pour la complexation. Cette conformation se ramifie lorsque la concentration diminue. Le pH des solutions influe également sur le pouvoir complexant des acides humiques. A pH acide, les substances humiques présentent une structure repliée ayant la propriété de se dérouler en cas

d'alcalinisation du milieu [15].

II.9) Rôle et effet des substances humiques dans le sol :

La variabilité des fonctions, et des caractéristiques physico-chimiques présentes dans l'acide humique expliquent leurs l'impacte sur le sol.

L'acide humique existes ou différentes formes : molécules dissoutes dans l'eau; adsorbant de molécules à la surface des minéraux ou sou forme de colloïdes et d'agrégats solides de particules [22-30]. Au sein de ces agrégats, la présence de microporosités permet de maintenir une structure aérée où l'eau et l'air peuvent circuler. La couleur variable du jaune au brun, est directement liée à sa concentration dans le milieu. Une couleur sombre favorise l'absorption de l'énergie solaire et le réchauffement des sols.

Combinés avec la matière inorganique (argile), les substances humiques jouent un rôle prédominant dans la stabilité, et la fertilité du sol [30] et améliorent sa composition ; leurs importance est due à leurs capacités à capter et mobiliser les métaux et les espèces organiques présentes dans le sol, préservant ainsi l'écosystème et le processus environnemental [20]. Toute fois elles interagissent avec les métaux lourds et les pesticides, ce qui influe sur la disponibilité de ces derniers dans l'environnement et sur la mobilité géochimique des nutriments, et des polluants [21].

L'acide humique exerce un grand effet sur la distribution et le transport des contaminants dans le sol (métaux lourds, pesticides) [29]. Ainsi la structure du sol est stabilisée. La présence de substances humiques améliore l'activité biologique des sols en fournissant aux microorganismes un substrat énergétique et carboné. L'activité de ces organismes a un effet favorable sur les propriétés physiques chimiques et biologiques du sol.

II.10) Extraction des acides humiques :

L'extraction des substances humiques est réalisée à l'aide d'une solution alcaline (NaOH 0,1 mol.L⁻¹, $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 0,1 mol.L⁻¹) afin de permettre l'extraction de la fraction la plus intimement liée aux argiles. Elle aboutit à la formation d'une phase insoluble (l'humine) et d'une phase soluble. L'acidification de cette phase soluble forme deux fractions, un précipité brun floconneux (acides humiques) et un surnagent soluble (acides fulviques).

Ensuite les substances humiques extraites sont purifiées par dialyse. Cette technique permet de séparer les molécules selon leur poids moléculaire grâce à l'utilisation de membranes semi-perméables dont les pores permettent aux particules de petite taille (ions, solvants) de diffuser à travers cette membrane. Les molécules de taille plus importante sont conservées à l'intérieur de la membrane d'ester cellulose (Spectra/Por CE®) de porosité 1000 Da, alors que les composés de poids moléculaire inférieur au seuil de coupure de la membrane utilisée sont éliminés.

Les analyses nécessitent des échantillons en phase solide. Une étape de lyophilisation permet d'éliminer l'eau des échantillons par congélation et sublimation.

Les extraits obtenus sont ensuite soumis aux méthodes d'analyses : analyse élémentaire et spectroscopie infrarouge. Le carbone organique et l'azote total des sols étudiés et des différentes fractions humiques sont déterminés respectivement par la méthode de Walkley-Blacket la méthode de Kjeldhal.

II.11) La matière organique et la fertilité des sols agricoles :

Les nombreuses propriétés physico-chimiques des substances humiques, expliquent leurs impacts sur le sol et les plantes :

Les substances humiques influent sur la fertilité des sols agricoles en améliorant sa structure, en augmentant l'activité biologique, la disponibilité des nutriments et en complexant les métaux toxiques].

Par leur caractère macromoléculaire et leurs propriétés colloïdales, les substances humiques assurent la cohésion des particules élémentaires du sol [31]. La structure du sol est ainsi stabilisée par un grand nombre de liaisons électrostatiques et de liaisons faibles établies entre les molécules organiques et les argiles. Les substances humiques lient les particules du sol sous forme d'agrégats qui améliorent la stabilité structurale du sol.

Au sein de ces agrégats, la présence de micro-porosités permet de maintenir une structure aérée où l'eau et l'air peuvent circuler. Outre l'aération du sol, la surface d'échange gazeux entre le sol et l'atmosphère et sa capacité de rétention d'eau sont augmentées. L'eau pénètre plus facilement dans le sol et limite les risques d'érosion et de compactage. La couleur des sols, variable du jaune au brun, est directement liée à la concentration de SH dans le milieu. Une couleur sombre favorise l'absorption de l'énergie solaire et le réchauffement des sols. La présence de substances humiques améliore l'activité biologique des sols en fournissant aux microorganismes hétérotrophes un substrat énergétique et carboné. La variabilité des composés organiques entretient la diversité de la population microbienne. L'activité de ces organismes a un effet favorable sur les propriétés physiques du sol.

La matière organique forme avec les argiles un complexe colloïdal appelé complexe argilo-humique (CAH). Ce complexe est chargé électronégativement en raison de la présence de fonctions carboxyles (RCOO^-) et hydroxyles acides (RO^-). Les liaisons entre les substances humiques et les cations solubles des sols ont réalisées au niveau du CAH par échange cationique et protonique sur les fonctions $-\text{COOH}$ et $-\text{OH}$. Ces complexes peuvent aussi interagir avec des ions, des oxydes, des hydroxydes métalliques et des minéraux pour former des complexes organométalliques.

Les groupements fonctionnels COOH , C=O sont impliqués dans la dégradation des minéraux

du sol. Leur liaison aux métaux permet leur passage en solution et leur transport, sous formes solubles, dans les eaux et les sols [15]. Ces propriétés expliquent l'importance des substances humiques dans l'établissement du pH du sol et leur confèrent un pouvoir tampon qui permet d'en limiter les variations. Grâce à leurs propriétés chélatrices, les complexes augmentent la capacité d'échange cationique des sols, limitent le lessivage de certains éléments et permettent également la détoxification en complexant les métaux lourds. La matière organique influe sur les réserves minérales des sols et améliore la biodisponibilité des éléments pour les végétaux en limitant leur précipitation. La nutrition minérale des plantes est donc facilitée.

Les substances humiques possèdent un rôle essentiel dans les écosystèmes. Elles limitent les variations environnementales du sol (pollutions, exportations d'éléments, fluctuations de pH,...) et contribuent à la croissance des plantes par leurs effets sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol.

II.12) Utilisation des substances humiques en agriculture :

De nombreux facteurs rendent l'étude des effets des substances humiques sur les plantes difficile et l'analyse des données bibliographiques montre des résultats très différents; La nature et l'intensité des réponses peuvent varier en fonction des substances humiques, des plantes et des conditions expérimentales.

Les substances humiques du sol, de tourbe, de compost, ou de roche sédimentaire (lignite, léonardite) présentent des effets sur les végétaux mais génèrent des réponses différentes. L'utilisation des différentes fractions de la matière organique, acides humiques ou fulviques, influe sur la spécificité des réponses. Par leur pénétration dans la plante, les particules de faible poids moléculaire (acides fulviques) présentent un mode d'action différent des acides humiques et modifient de manière plus intense le métabolisme cellulaire [32]. Ces variabilités d'actions ont directement liées à la composition des molécules humiques. La caractérisation des molécules humiques renseigne sur leur poids moléculaire, la présence de groupement fonctionnel, et permet d'établir des relations entre leur structure et leur activité biologique. La qualité de l'extraction des fractions humiques apparaît également comme un facteur de variabilité car elle influe sur les caractéristiques chimiques des composés, et par conséquent sur leur activité.

L'utilisation des substances humiques montre des effets différents selon les conditions expérimentales et le mode d'application (sol, substrat solide, solution nutritive ou application foliaire). L'intensité de la réponse dépend le plus souvent de la dose testée et de nombreuses études débutent par la détermination de la dose optimale [33] L'impact des fractions humiques augmente avec la concentration mais de trop fortes doses présentent un effet inhibiteur. La complexité et l'évolution du matériel humique en fonction des conditions expérimentales peuvent être une source

de variabilité.

II.12.1) Germination et croissance des plantes :

Les fractions humiques présentent des effets importants sur la rhizogénèse. Les réponses se traduisent par un accroissement du nombre et de la longueur des racines pour de faibles concentrations (50 à 100 mg de carbone par litre) d'acides humiques et fulviques (de sol ou de préparation commerciale. Le poids frais des racines peut aussi être augmenté pour des doses allant de 2500 à 5000 mg.L⁻¹ d'acides humiques [33]

Les traitements humiques augmentent également les poids frais [33] et secs des jeunes pousses issues des graines traitées. L'étude de la germination de graines de tomates prétraitées avec des préparations d'acides humiques (charbon oxydé) indique une augmentation des masses fraîches et sèches des plantules, proportionnelle à la concentration des acides humiques, attribue ce phénomène à une meilleure efficacité de l'eau et à une plus forte elongation cellulaire.

II.12.2) Croissance des racines et des parties aériennes :

Quel que soit leur mode d'application les substances humiques améliorent la croissance des végétaux, en induisant une augmentation quantitative de la longueur, de la surface, du volume ou de la masse des organes des plantes [13].

De nombreuses études montrent que l'ajout de SH aux cultures hydroponiques favorise la croissance des parties aériennes [13-32]. Les principaux effets s'observent sur la production de biomasse de feuilles, de fleurs, de tiges et de fruits.

La concentration des substances humiques joue un rôle important sur la réponse des végétaux. Il existe une concentration optimale d'application qui varie d'une plante à l'autre [33]. Comme la germination, la croissance des plantes est inhibée par de fortes concentrations.

II.12.3) Développement des plantes :

Les SH peuvent induire des différenciations cellulaires simplifiant de nouvelles propriétés morphologiques et fonctionnelles. Ces modifications qualitatives se traduisent par l'apparition de nouveaux organes (feuilles ou fleurs), ainsi, des ajouts de compost sur le Pélargonium x hortorum cultivé en substrats solides montrent un accroissement significatif du nombre de bouquets floraux par plante, et du nombre de fleurs par bouquet floral pour des teneurs allant jusqu'à 20% de compost en volume [34]. De la même façon, [15] constatent la production accrue de fleurs par plante en présence de 100 à 300 ppm d'acides fulviques dans le milieu de culture. Parallèlement, le nombre de feuilles par plante évolue de manière similaire au témoin, dans les deux expériences.

Les tests réalisés avec les SH présentent également des résultats positifs sur le nombre de feuilles et de fleurs du pélargonium [35] et sur la floraison du bégonia. Ces travaux montrent une influence favorable sur le développement qui se traduit par une mise à fleur plus précoce.

La croissance des plantes est largement influencée par leur nutrition minérale, l'eau et l'air fournis aux racines. Les effets des SH sur la croissance des végétaux sont généralement liés à l'absorption élevée d'éléments minéraux .

La présence de substances humiques dans le sol influe sur la fertilité et les réserves minérales en favorisant la libération et la dissolution des macroéléments contenus dans les composants minéraux du sol. [13]

II.12.4) Métabolisme énergétique :

L'effet direct des substances humiques sur la croissance intervient au niveau des processus métaboliques énergétiques comme la respiration, la photosynthèse ou la synthèse protéique. L'action des substances humiques sur ces processus modifie la production de métabolites énergétiques (ATP) et affecte la croissance des plantes.

L'utilisation des substances humiques provoque également l'augmentation de la teneur en chlorophylle [36]. Il en résulte une assimilation photosynthétique supérieure favorisant la production d'ATP, d'acides aminés, de sucre et protéines, donc la croissance des plantes.

II.12.5) Synthèse de protéines et d'acides nucléiques :

Les substances humiques modifient la synthèse des acides nucléiques, ADN et ARN, et influencent particulièrement la production d'ARN messager, essentielle dans de nombreux processus biochimiques. Les changements dans la synthèse d'ARN reflètent les modifications de la croissance de la plante. Étant fortement liée à la transcription et la traduction, la synthèse protéique, en particulier la synthèse enzymatique, subit également l'influence des substances humiques. L'action des fractions humiques est ciblée sur la synthèse de certaines protéines de structure et d'enzymes telles que les invertases, les catalases et les peroxydases [32-36].

II.12.6) Activités enzymatiques :

L'effet direct des substances humiques sur la croissance des plantes implique l'interaction de plusieurs processus biochimiques de stimulation et d'inhibition. La variabilité des effets dépend de la nature et de la concentration des acides humiques. Il existe une relation entre la structure des substances humiques, leur composition et leur activité biologique [37]. Les nombreuses fonctions carboxyles et hydroxyles, généralement présentes dans la structure des substances humiques, sont souvent citées pour expliquer l'activité biochimique potentielle des substances humiques.

II.13) Métaux dans le sol et interaction avec la matière organique :

Pour les sols, les éléments traces métalliques (ETM) ou métaux traces (MT) sont des éléments dont la teneur dans la croûte terrestre est inférieure à 0,1 %, les autres sont des éléments majeurs. Ainsi, 12 éléments majeurs (Oxygène (O), Silicium (Si), Aluminium (Al), Fer (Fe), Calcium (Ca), Sodium (Na), Potassium (K), Magnésium (Mg), Titane (Ti), hydrogène (H),

Phosphore (P) et Manganèse (Mn)) constituent ensemble plus de 99% de la masse de la croûte terrestre. Les autres sont des éléments traces dont la plupart ont une concentration inférieure à 0,01 %, ceux-ci peuvent être des métaux (cadmium (Cd), Cuivre (Cu), Chrome(Cr), Nickel (Ni), Plomb (Pb)), des métalloïdes ou des sémi-métaux (Bore (B), Sélénium (Se), Arsenic(As) ou des non-métaux (Azote (N), Fluor (F), Chlore (Cl) ou Brome (Br)).

On compte également parmi eux des éléments comportant des isotopes radio actifs d'origine naturelle (Uranium (U), Thorium (Th), Radium(Ra), Actinium(Ac)).

L'expression « métaux lourds » est souvent employée pour désigner les éléments traces [38]. Pour certains les métaux lourds sont des éléments dont la densité est supérieure à 5 ou 6 g.cm⁻³.

D'un point de vue biologique, on distingue deux types de métaux ou MMT, en fonction de leurs effets physiologiques et toxiques : métaux essentiels et métaux toxiques:

- ✚ Les métaux essentiels sont des éléments indispensables à l'état de trace ou non, pour de nombreux processus cellulaires et qui se trouvent en proportion très faible dans les tissus biologiques. Certains peuvent devenir toxiques lorsque la concentration dépasse un certain seuil. C'est le cas du cuivre (Cu), du nickel (Ni), ou du zinc (Zn).
- ✚ Les métaux toxiques ont un caractère polluant avec des effets toxiques pour les organismes vivants même à faible concentration (xénobiotiques). Ils n'ont aucun effet bénéfique connu pour la cellule. C'est le cas du plomb (Pb), du mercure (Hg), ou du cadmium (Cd).

II.13.1) Origine des métaux traces :

Certains métaux comme le plomb, le cadmium, le cuivre et le mercure, non biodégradés, peuvent persister pendant de longues périodes dans les sols [39]. Leur présence dans les sols peut être naturelle ou anthropogénique (Figure II.9).

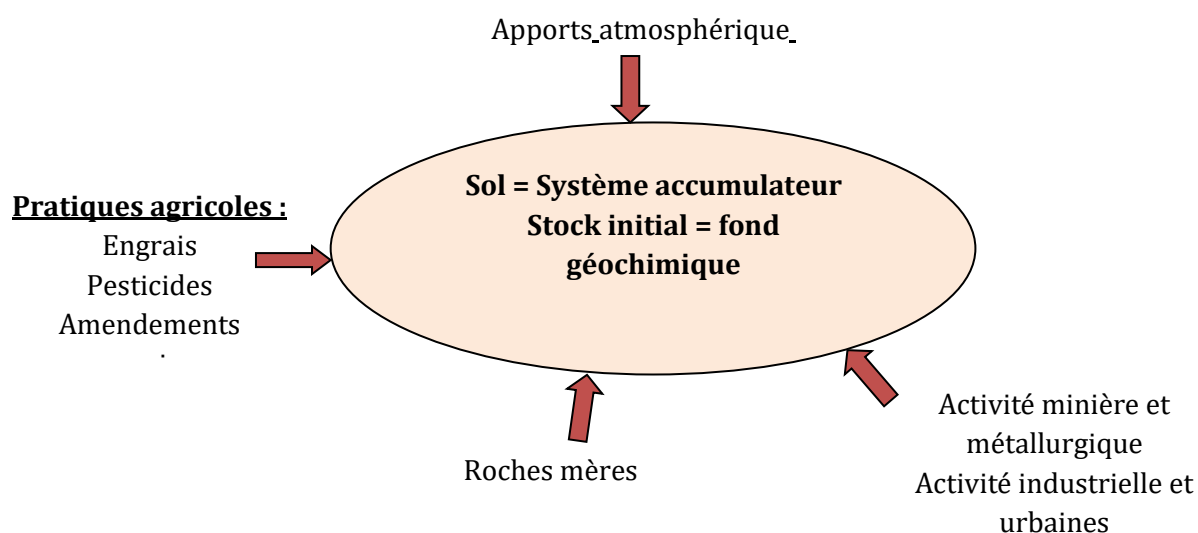


Figure II.9 : Origine des métaux lourds dans le sol [15].

II.13.1.1) Origine naturelle :

Les métaux traces sont présents naturellement dans les roches, ils sont libérés lors de l'altération de celles-ci pour constituer le fond géochimique. Les sols ont une concentration naturelle en métaux provenant de l'altération de la roche mère, en effet, l'effritement de celle-ci et l'érosion conduisent à la formation des sols. Cette formation s'effectue sur une échelle de temps de l'ordre de plusieurs milliers d'années et est la source principale de contamination naturelle du sol en métaux. Dans certains cas les sols ainsi formés peuvent donc être fortement concentrés en métaux, au point que cette contamination naturelle soit problématique sur le plan écologique. D'autres sources de contamination naturelle des sols par les métaux sont identifiables, mais leur contribution est relativement faible comparée à l'apport d'origine géologique [40].

- Le cycle biogéochimique entre les sols et les plantes. Celles-ci absorbent des métaux dans le sol ou bien par voie atmosphérique, puis les redéposent à la surface (feuilles mortes, décomposition des végétaux...).
- Processus d'accumulation, dans un horizon du sol, des métaux provenant d'un autre horizon (illuviation).
- Apport par lessivage du sol et érosion en surface.
- Apports lointains d'origine atmosphérique : volcans (émissions d'As, Hg, Ni, Zn), feux de forêt (émission de Zn), embruns marins (émissions de Hg, Na), poussières et aérosols transportés par les vents.

II.13.1.2) Origine anthropique :

La pollution des sols due à l'activité humaine intervient sur une échelle de temps beaucoup plus courte, de l'ordre de la décennie, voire moins. On distingue deux types de contamination :

- Les contaminations diffuses, mettant en jeu un faible nombre de polluants aux concentrations peu variables provenant de sources non stationnaires ou de grande étendue, ou bien d'un grand nombre de sources. Dans ce cas, la pollution se fait par voie atmosphérique sous forme de poussière et d'aérosols issus de l'activité industrielle, des chauffages domestiques, des automobiles, etc... Ces poussières et aérosols se déposent sur les sols, sur les végétaux et sur les eaux de surface.
- Les contaminations ponctuelles, qui peuvent faire intervenir un grand nombre de polluants fortement concentrés, sur des zones localisées. C'est typiquement le cas d'une usine ou d'une mine : on parle de « site pollué ». Mais il peut s'agir également d'apports agricoles : des engrais, boues de station d'épuration, traitements phytosanitaires, lisiers de porcs, compost, ...et. Ces apports peuvent être importants, certains éléments normalement sous forme de traces dans le sol

peuvent s'y retrouver à des teneurs supérieures à 0,1%.

Au niveau des petites régions, on peut observer un passage progressif d'une pollution ponctuelle des sols à une pollution diffuse. Ainsi, les émissions atmosphériques d'une fonderie de plomb par exemple représentent une source de contamination ponctuelle des sols proches du lieu d'émission, et contribuent à une contamination diffuse à mesure que l'on s'en éloigne.

II.13.2) Comportement des métaux dans le sol :

L'incorporation dans un sol d'une pollution métallique pendant une longue période entraîne la création de nouveaux équilibres, dans lesquels les métaux sont en interaction avec l'ensemble des constituants du sol. Parmi les constituants les plus réactifs du sol vis-à-vis des MMT, la MOS est connue pour ses propriétés adsorbantes et complexantes. Ces propriétés sont dues à ses nombreux groupements fonctionnels tels les groupements carboxyliques ou phénoliques. La MOS sous forme solide ou associée aux phases solides participe à l'immobilisation ou au stockage des MMT par la propriété d'adsorption, tandis que la MOS présente sous forme soluble, par les propriétés de complexation, favorise au contraire la mobilité des métaux en augmentant leur concentration totale en solution. Il convient de connaître de quelle façon les métaux s'incorporent au sol, pour mieux gérer les éventuels dangers que leur présence peut entraîner. Les risques sont principalement liés à la mobilité des MMT qui peuvent ainsi contaminer les aquifères, suite à des transferts dans les sols (Figure II.9). Mais la chaîne alimentaire peut aussi être contaminée lorsque les métaux sont biodisponibles. Les différentes formes sous lesquelles se trouvent les métaux sont sous la dépendance de nombreuses caractéristiques du sol, mesurables de façon globale, tels que le pH, le potentiel d'oxydoréduction, la teneur en matière organique ou encore la capacité d'échange cationique (CEC). Toute variation de ces paramètres est susceptible de faire évoluer la mobilité ou la biodisponibilité d'un métal dans un sens ou dans l'autre.

Tableau II.1: Localisation des MMT dans les sols [41]

Localisation	Mobilité		
	Immobilité	Peu mobile	Très mobile
Solution	-	-	Dissous
Minéraux argileux		Adsorbé (complexes à Sphère interne)	Adsorbés (complexes à Sphère externe)
Oxydes et hydroxydes De Fe, Al, Mn	Métaux à l'intérieur des réseaux cristallins	Adsorbés (complexes à sphère interne)	Adsorbés (complexes à sphère externe)
Carbonates	Métaux à l'intérieur des réseaux cristallins	Métaux à la surface des réseaux cristallins	
Substances Humiques	Adsorbés (complexes à sphère interne) Adsorbés (complexes à sphère externe)		

II.13.3) Équilibres dynamiques dans les sols :

Comme décrit précédemment, la phase solide est constituée de nombreuses espèces capables de fixer les ions présents dans la phase liquide. La biodisponibilité et mobilité des éléments traces métalliques dépend de leur spéciation et de leur répartition entre la phase solide et la solution du sol. Elle va donc dépendre de plusieurs processus (adsorption/désorption, précipitation/dissolution, échange ionique, complexation...) et des propriétés chimiques du sol et de la solution du sol (pH, potentiel d'oxydoréduction, température/humidité, apport de matière organique...) :

Precipitation/dissolution:

La précipitation ou la dissolution jouent un rôle très important dans la chimie du sol, particulièrement dans la régulation des éléments majeurs comme le calcium, les carbonates et les silicates, mais également dans la rétention des métaux traces. Dans le milieu naturel, les métaux précipitent principalement sous la forme d'hydroxydes et de carbonates. La précipitation est généralement favorisée par des pH élevés, car la concentration en solution des ions d'hydroxydes ou des carbonates augmente avec le pH. Elle est souvent associée au processus d'oxydoréduction, par exemple, dans les conditions réductrices, le fer apparaît en solution sous forme de Fe (II). Lorsque les conditions redeviennent oxydantes, le Fe (II) est oxydé en Fe (III), puis précipité sous la forme d'oxyde de Fe (III). Cela peut donc avoir comme conséquence la libération, puis éventuellement une précipitation sous une nouvelle forme des ETM liés au fer.

Adsorption :

L'adsorption est définie comme la fixation de la matière à l'interface solide-liquide et elle est la base de la plupart des processus aux interfaces. Les adsorptions physiques et chimiques sont les deux mécanismes d'adsorption couramment identifiés :

- **Adsorption physique** : ici, la fixation des molécules ou des ions sur la surface absorbante polarisée se fait essentiellement par les forces de Vander Waals. On parle alors d'adsorption non spécifique. L'adsorption physique est réversible et ne produit aucune modification de la structure moléculaire.
- **Adsorption chimique** : elle constitue le résultat de l'établissement d'une liaison chimique entre les atomes donneurs d'électrons de la surface et les solutés accepteurs d'électrons. L'énergie de liaison est beaucoup plus forte que dans le cas de l'adsorption physique et le processus est beaucoup moins réversible (parfois irréversible) [31]. Pour la complexation de la surface est le principal mécanisme de l'adsorption chimique des ions métalliques. Elle se fait principalement par les oxydes hydratés (oxydes de fer, de manganèse, d'aluminium...) et par la matière organique qui possède un grand nombre de groupes fonctionnels (carboxyliques, phénoliques,

hydroxylique...) avec une forte affinité pour les métaux.

- **Apport de matière organique :**

L'apport de matière organique permet d'immobiliser les MMT du sol qui ont pour elle une grande affinité, mais la minéralisation ultérieure peut les remettre en solution, il peut donc s'agir d'une immobilisation temporaire. Le rôle de la matière organique dans le processus de mobilisation-immobilisation des polluants métallique dans les sols est assez complexe. La plupart des composés organiques ou minéraux du sol (matière organique, argile, oxyhydroxydes de fer) possèdent des charges positives ou négatives de surface qui peuvent jouer un rôle dans l'échange ou l'adsorption des ions. Globalement, la matière organique des sols tend à immobiliser les polluants cationiques, toutefois, lorsqu'elle passe en solution, la matière organique augmente la solubilité de ces mêmes polluants et peut favoriser leur mobilisation et leur biodisponibilité.

- **Le potentiel d'oxydo réduction :**

Le degré d'aération du sol est déterminé par les pratiques culturales (irrigation, tassement par passage répété d'engin, apport de MO biodégradable...) et par les événements climatiques (précipitations massives entraînant des conditions hydrophobes). L'ensemble de ces facteurs peut favoriser l'anoxie, modifiant ainsi la mobilité des métaux, comme le manganèse et le fer dont les formes réduites sont plus mobiles dans le sol que les formes oxydées. Outre l'influence directe du potentiel redox du milieu sur l'état d'oxydation des MMT et donc leur mobilité, ce facteur intervient également sur les composants du sol qui fixent les métaux. Ainsi, en conditions d'aérations satisfaisantes du sol, les composés ferriques et manganiques sont très peu solubles et immobilisent donc les métaux qui leur sont associés. A l'inverse, en conditions d'aération limitantes résultant par exemple du compactage ou de la battance du sol, les composés du fer et du manganèse sont réduits et solubilisés, les éléments traces qui leur étaient associés peuvent alors être libérés. Le résumé du degré de mobilité relative des MMT en fonction du pH et du potentiel redox est présenté tableau II.2.

Tableau II.2: Mobilité des ETM en fonction de pH et du potentiel redox [42].

Mobilité relative	pH		Potentiel redox	
	Neutre-alcalin	Acide	Oxydant	Réducteur
Très haute	Se, Mo	B	B	-
Haute	As	Zn,Cd,Hg, Co, Ni,(Mn)	Mo,Se	-
Moyenne	Mn	Cu,Al,Pb,Cr	Cu,Co,Hg,Ni, Zn,Cd	Mn
Basse	Pb,Fe, Zn,Cd, Tl	Fe(III),Tl	Pb,Tl	Fe,Zn,Co, Ni,Tl
Très basse	Al, Cr, Hg, Cu, Ni, Co	Mo, Se, As	Al,Cr,Fe,Mn	Al,Cr,Hg,Cu, Se,B, Mo,Cd,Pb

- **Le pH du sol :**

La variation du pH est le facteur dont l'action sur la mobilité des métaux est la plus déterminante. De façon très générale, lorsque les éléments sont chimiquement stables sous forme de cation par exemple (Cd, Ni, Pb, Cr (III)) leur solubilité augmente quand le pH diminue (acidification). La spéciation aqueuse du métal change avec le pH et cela influence la fixation sur la phase solide. Par exemple, l'hydrolyse des ions métalliques à pH élevé tend à augmenter la sorption, parce que les espèces hydrolysées ont des énergies de solvation plus petites pour la surface que pour les ions libres. L'augmentation du pH contribue également à la diminution du potentiel de surface, en diminuant également la concurrence des protons par rapport aux ions métalliques et elle favorise ainsi leur fixation. Par contre l'abaissement de pH fournit au milieu des protons dont la fixation est fortement compétitive sur les sites d'échange et de sorption. Le pH des sols superficiels varie entre 4 et 8 notamment en fonction de la roche mère. La présence des carbonates (roches mères de types calcaire), assure un tampon neutre à légèrement basique, en revanche, la présence de la roche mère silicatées et de sulfates ou d'hydroxyde de fer est plus propice à l'acidification des sols. La variation du pH est largement pondérée par les constituants organiques ou minéraux du sol. Un changement de pH change également les interactions entre les composants du sol et affecte en suite la distribution en métal parmi les phases de sol.

- **Échange ionique :**

L'échange ionique est la substitution d'une espèce ionique d'un composé solide par une autre espèce ionique issue d'une solution aqueuse en contact avec le solide. Les principaux représentants des échangeurs d'ions dans les sols sont la matière organique et les argiles. La charge électrique sur une surface peut être fixe ou variable, selon son origine, elle dépend ou non du pH. Dans le cas où la surface minérale ou organique est chargée négativement les cations de la solution se fixe sur ces sites et ils peuvent être échangés par la suite avec des cations qui ont une affinité pour le solide encore plus important : on parle d'échange cationique. La capacité d'échange cationique (CEC), correspond donc à la quantité de charges positives portées par les cations susceptibles d'être fixés, de façon réversible sur les sites chargés négativement de certains constituants du sol. Plus la CEC est élevée, plus les cations métalliques pourront être adsorbés.

- **Température et humidité du sol :**

Elles favorisent l'activité biologique du sol, et donc la production de substances acides ou complexantes issues de la biodégradation de matière organique. L'élévation de température agit directement sur la dissolution de composés fixant un élément trace métallique, facilitant ainsi son absorption par la flore. L'humidité agit également directement dans les processus de précipitation et

de solubilisation. Par ailleurs, un excès d'hygrométrie peut conduire à un défaut d'aération du sol.

II.14) Conclusion :

La matière organique joue un rôle crucial dans les écosystèmes terrestres et aquatiques, ainsi que dans l'agriculture.

Elle améliore également la structure du sol, favorisant ainsi la rétention d'eau, la circulation de l'air et le développement des racines.

Elle fournit des éléments nutritifs essentiels aux plantes, tels que l'azote, le phosphore, le potassium et d'autres micronutriments.

Elle agit dans le sol comme un réservoir de carbone, capturant le dioxyde de carbone atmosphérique et contribuant à la régulation du climat. Une augmentation de la matière organique dans les sols peut aider à atténuer le changement climatique en séquestrant le carbone.

Elle fournit de la nourriture et un habitat pour de nombreux organismes du sol, tels que les vers de terre, les bactéries et les champignons, contribuant ainsi à la biodiversité des écosystèmes terrestres.

Elle participe au cycle des éléments nutritifs dans les écosystèmes, en fournissant des nutriments aux plantes et en servant de source d'énergie pour les organismes décomposeurs.

En agriculture, la gestion de la matière organique est essentielle pour maintenir la santé des sols, augmenter la productivité des cultures et favoriser la durabilité à long terme des systèmes de culture. Elle peut être améliorée par des pratiques telles que l'ajout de compost, la rotation des cultures, le labour minimal et la culture de couverture.

Chapitre III

La biodégradation de la matière organique

III.1) Introduction :

La biodégradation de la matière organique est un processus naturel par lequel les micro-organismes décomposent les composés organiques présents dans le sol en éléments plus simples, tels que les substances humiques, le dioxyde de carbone, l'eau, les minéraux, ce processus influence sur la structure du sol en plusieurs façons [43] :

- ✚ Amélioration de la structure du sol : la décomposition de la matière organique favorise la formation d'agrégats du sol, ce qui améliore la structure du sol, favorise la rétention d'eau et des nutriments, et augmente la porosité du sol.
- ✚ Augmentation de la capacité de rétention d'eau : la matière organique décomposée ajoute de la matière organique stable au sol, ce qui augmente sa capacité à retenir l'eau, réduisant ainsi le risque de sécheresse pour les plantes.
- ✚ Enrichissement du sol en éléments nutritifs : la biodégradation libère des nutriments essentiels comme l'azote, le phosphore et le potassium, rendant ces éléments disponibles pour les plantes.
- ✚ Stimuler l'activité microbiologique : la biodégradation fournit de la nourriture et de l'énergie pour les micro-organismes présents dans le sol, favorisant ainsi une activité biologique bénéfique pour la santé du sol.

III.2) Le compost :

Le compost est un mélange de débris organiques en décomposition et de matières minérales, destiné à nourrir et à alléger le sol qu'il enrichit en humus. Pour SMEESTERS, le compost est une matière brunâtre qui ressemble à du terreau. Il provient de la décomposition contrôlée des matières organiques par des millions d'organismes vivants ; depuis les bactéries microscopiques jusqu'aux vers de terre [44].

Un bon compost provient d'un équilibre entre des matériaux riches en azote et pauvres en carbone (déchets organiques, fumiers), riche en carbone et pauvre en azote (matière végétale sèche, bois broyé) et intermédiaires entre les deux (matière végétale verte) [45].

III.2.1) Les types du compost :

III.2.1.1) Compost aérobie :

- ✚ Il ne dégage pas d'odeur désagréable.
- ✚ La maturation est beaucoup plus rapide (il peut être prêt en six mois environ).
- ✚ Les graines des mauvaises herbes et les germes pathogènes sont détruits lors de l'élévation de température résultant de la fermentation oxydative. Cependant, son seul inconvénient est qu'il nécessite une intervention humaine plus importante que le compost anaérobie [45].

III.2.1.2) Compost anaérobie :

C'est le compost résultant d'un entassement de débris végétaux qui se décomposent sur place, les inconvénients d'un tel compost sont : Odeurs désagréables du au pourrissement, évolution plus lente que celle d'un compost aérobie (il lui faut environ un an pour être prêt) et les risques de problèmes phytosanitaires car sa température reste basse et les organismes pathogènes ne sont pas détruits

III.2.2) Compostage :

Le compostage est un processus aérobie de dégradation de composés organiques par l'action successive des micro-organismes (bactéries, levures, et champignons) Figure III.1, dont la concentration peut atteindre des millions, voir des milliards par gramme de compost.

Une phase dite oxydative, au cours de laquelle l'oxydation biologique des composés facilement biodégradables se fait principalement par des bactéries. Cette forte activité microbienne entraîne une augmentation de la température jusqu'à 60-75°C, c'est pour cela que cette phase est appelée aussi phase thermophile.

Une phase dite de maturation caractérisée par un ralentissement de l'activité microbiologique et la prédominance des phénomènes d'humification. Les micro- organismes les plus actifs sont les champignons et les actinomycètes qui dégradent les substances les plus polymérisées. Au cours de cette phase, on assiste à une stabilisation croissante de la matière organique qui se traduit par une diminution de sa biodégradabilité résiduelle.

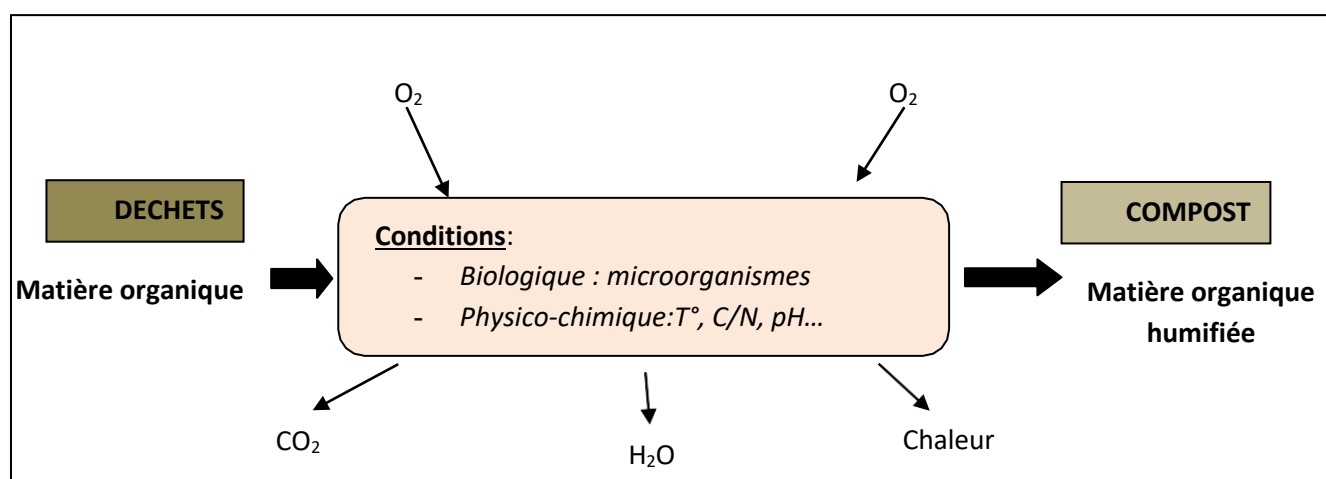


Figure III.1: Processus de compostage [47].

Le compostage correspond à l'action de faire fermenter en présence d'air des matières organiques : il s'agirait donc de ce point de vue d'une simple réaction chimique, qui globalement s'écrit :



III.2.3) Les mécanismes impliqués :

Il existe deux types de compostage, en présence et en absence d'oxygène. La nature du processus de décomposition y est directement liée. Lors de carence en oxygène, les microorganismes anaérobies dominent et élaborent des composés intermédiaires tels que du méthane, du sulfure d'hydrogène et quelques autres substances spécifiques des fermentations anaérobies. En l'absence d'oxygène, ces composés ne sont pas métabolisés et s'accumulent.

Un grand nombre de ces composés présentent de forts pouvoirs olfactifs et certains d'entre eux peuvent entraîner une phytotoxicité lors de l'épandage des composts comme amendements organiques. De plus, le compostage anaérobie est un processus s'effectuant à basse température; ainsi, les graines d'adventices et les pathogènes ne sont pas affectés et détruits par l'élévation de chaleur caractérisant un processus aérobie. Enfin, ce processus anaérobie nécessite davantage de temps que le compostage en présence d'oxygène. Ces inconvénients contrebalancent fortement les avantages de ce procédé et notre étude ne portera donc que sur le compostage aérobie, bien que plusieurs travaux aient montré la présence possible de zones anaérobies dans un compost dit « aéré » [47].

De telles zones peuvent être expliquées par l'intense activité microbienne consommatrice d'oxygène et génératrice de gaz carbonique, combinée à un manque d'aération du compost. Dans la plupart des écosystèmes, la libération de chaleur d'origine biologique est très diffuse et disparaît trop rapidement pour engendrer une élévation de température significative. Cependant, la décomposition de matières organiques reste un cas à part pouvant produire une intense chaleur. En effet, le processus de compostage peut être très simplement schématisé par la production de chaleur au cours de l'action de micro organismes en présence d'oxygène. La matière organique peut alors subir deux types de processus : une minéralisation complète jusqu'au CO₂ ou une humification et une production de substances humiques [48].

Plusieurs phases théoriques se succèdent au cours du compostage (Figure III .2). La première est appelée phase mésophile du fait des températures atteintes inférieures à 45°C. Des micro-organismes dont la température de croissance optimale est comprise entre 20 et 45°C se multiplient alors rapidement, notamment grâce à la présence de matière organique facilement biodégradable (sucres simples et acides aminés libres). Leurs métabolismes très actifs engendrent une production

intense de chaleur et élèvent ainsi la température du compost à un point tel que leurs propres activités sont inhibées. A ce moment, débute la phase thermophile où quelques champignons ainsi que de nombreuses bactéries thermophiles (température de croissance optimale comprise entre 50 et 70°C) poursuivent le processus, en augmentant encore la température du milieu jusqu'à 65 -70°C voire plus. Durant cette phase très active, une importante part de la matière organique est perdue par minéralisation du carbone organique et dégagement de CO₂, et un assèchement du compost lié à l'évaporation de l'eau est souvent observé. Cependant, la hausse de température est cruciale pour la qualité du compost, car la chaleur détruit les pathogènes et les graines d'adventices. Ces deux premières phases peuvent être assimilées à une première phase dite de dégradation. Cette phase dégradative (phase mésophile et thermophile) est suivie par une période de ralentissement de l'activité, pendant laquelle la température diminue graduellement. Des micro-organismes mésophiles colonisent à nouveau le compost. S'en suit alors une phase de maturation constructive où apparaissent lentement des éléments précurseurs de l'humus. La dégradation lente des composés résistants entraîne une coloration brun foncé à noir du compost et rend celui-ci plus fin et homogène. Sa texture ressemble alors à celle d'un sol. Le compost est alors mature et le processus est achevé.

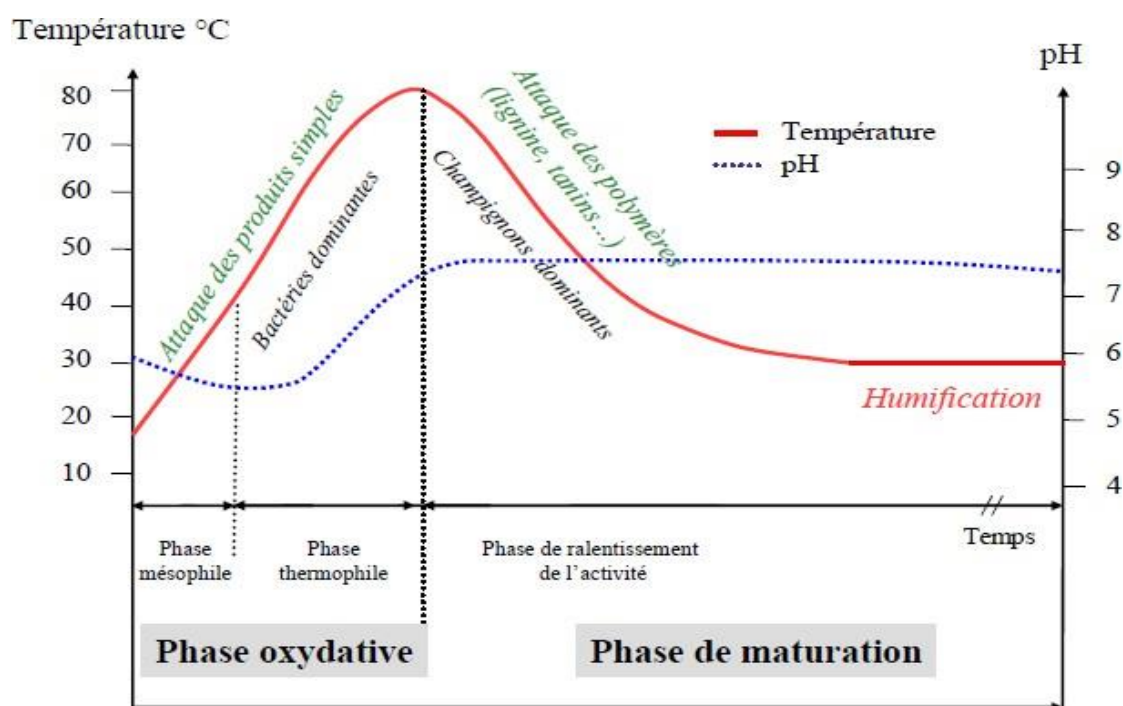


Figure III.2: Courbe théorique d'évolution de la température et du pH au cours du compostage [49]

III.2.4) Facteurs du réussite du compostage :

Pour le compostage, les principaux paramètres d'importance pratique sont :

a) Aération :

Dans toute fermentation aérobie, les organismes ont besoin d'oxygène pour oxyder les matières organiques. Ce besoin est maximal au départ et diminue progressivement au cours du temps

b) Humidité :

Nécessaire à la vie des micro-organismes, le produit de départ ne doit être ni trop humide, ni trop sec (apparition de feutrage gris ou blanchâtres caractéristiques des composts trop secs). Au cours du compostage, sous l'effet de la chaleur et de la ventilation, les tas perdent de l'eau par évaporation et diminuent de volume.

c) Température :

Dès le début du compostage, la température s'élève rapidement. En effet, les dégradations aérobies dégagent de la chaleur.

III.2.5) Objectifs du compostage :

La mise en décharge étant interdite pour de nombreux bio-déchets (sauf les déchets ultimes), leur incinération coûteuse et peu populaire, le compostage devient de plus en plus une solution pratique, simple. Elle présente de nombreux avantages, le principal étant la valorisation des déchets pour la production d'un amendement organique stable. En effet, le champ d'application du compostage s'est élargi avec l'évolution des techniques de compostage et la problématique de gestion collective des déchets ménagers. Cette filière concerne tous types de déchets organiques tels que les déchets verts, les bio-déchets ménagers, les boues de stations d'épuration collectives ou industrielles, les déchets agroalimentaires, les effluents d'élevage...

III.2.6) Effets physico-chimiques du compost sur les sols :

De nombreuses études ont montré le rôle bénéfique du compost sur les qualités physiques et chimiques des sols amendés. Par exemple, une amélioration des propriétés physiques, une augmentation de la conductivité hydrique et une diminution de la densité des sols ont été observées [51]. De même, l'incorporation de compost au sol s'avère efficace pour lutter contre la dégradation de la surface du sol [8].

Les amendements en matière organique stable augmentent le pouvoir tampon et la capacité d'échange des sols, deux paramètres qui conditionnent la nutrition minérale des plantes [50]. De plus, l'incorporation de composts permet de réduire l'acidité du sol, et de diminuer ainsi les risques d'exportation des métaux vers la plante.

III.2.7) Valorisation agronomique des composts par apport d'éléments fertilisants :

Un constat général est la chute du taux de matière organique et donc l'appauvrissement des sols cultivés par excès d'utilisation d'engrais minéraux solubles [8]. Le premier intérêt des amendements organiques est donc une diminution de la part de ces engrais lixiviables et leur remplacement par des déchets organiques valorisés. Les applications de compost dans les sols améliorent durablement et efficacement la fertilité du. De même, les amendements de composts favorisent le processus de reforestation en améliorant la nutrition et la croissance des plantes, et surtout en augmentant leur potentiel de survie en période de sécheresse.

La valorisation agronomique des composts est aussi souvent comprise comme étant l'apport d'éléments fertilisants. Les substances organiques sont caractérisées par trois éléments principaux: Carbone, Hydrogène et Oxygène représentant en masse plus de 90 % du résidu sec des végétaux. Cependant, de nombreux autres éléments font partie des éléments nutritifs majeurs pour les plantes. Ceux-ci sont classés en deux groupes: les macroéléments tels que l'azote, le phosphore, le potassium, le soufre, le calcium et le magnésium présents à des proportions de quelques pour mille à quelques pour cent de la matière sèche et les éléments nutritifs secondaires ou oligo-éléments (proportion inférieure à 0,1 % de la matière sèche).

III.2.8) Efficacité agronomique du compost :

Les amendements ont pour but d'équilibrer le bilan humique des pertes et apports en humus si le taux de MO du sol est jugé insatisfaisant, ou de le rendre excédentaire s'il est jugé insatisfaisant et que l'agriculture souhaite procéder à un redressement.

Les amendements organiques possèdent par définition moins de 3 % d'azote : ils participent à l'entretien ou à l'amélioration des propriétés physico-chimiques et biologiques des sols. « les amendements calcaires » dont le rôle est de régulariser l'état ionique de la solution du sol et du complexe argilo-humique, créant ainsi un milieu favorable à l'activité biologique et à la nutrition des plantes.

Les amendements magnésiens s'y rattachent, calcium et magnésium ayant des rôles voisins, et se trouvant liés dans certains amendements« les amendements humifères » qui servent de support et d'aliment aux micro-organismes, et sont la source de l'humus, colloïde organique du sol. Des travaux récents ont confirmés que le compost est un produit à fort pouvoir amendant.

III.3) La matière organique et les organismes du sol :

Les organismes du sol sont contribués considérablement à la fertilité et à la structure du sol; virtuellement la totalité de la terre végétale est passée par l'intestin de microorganismes ou de macroorganismes.

- ✚ Les microorganismes sont notamment les champignons, les bactéries, les actinomycètes et les algues. Ces animaux microscopiques et microbes jouent un rôle important dans les processus du sol.
- ✚ Les macroorganismes sont notamment les protozoaires, les nématodes, les vers de terre, les arthropodes (insectes, araignées) et les rongeurs.

III. 3.1) La biomasse microbienne :

Appelée aussi microorganismes ou microflore, représente quelques tonnes par hectare. Elle est formée de bactéries et d'actinomycètes (groupe des eubactéries ramifiées, proches des champignons). On trouve également des algues et des cyanophycées (algues photosynthétiques) dont certaines peuvent fixer l'azote de l'air. Toutes ces espèces sont présentes dans les sols.

III.3.2) la biomasse végétale :

Le système racinaire des plantes est un constituant important des organismes vivant dans le sol. Il comprend plusieurs parties, caractérisées par le diamètre et le niveau de ramification. La longueur et la forme des racines dépendent de facteurs génétiques des plantes et des contraintes du milieu. Ce sont les racines les plus petites, ou radicelles, qui permettent la nutrition des plantes. Elles absorbent l'eau et les éléments minéraux, elles sécrètent des substances organiques plus ou moins complexes.

III.3.3) la biomasse animale :

Egalement nommée faune du sol, la biomasse animale peut être divisée en quatre catégories selon la taille des organismes : micro-, méso-, macro- et mégafaune. Les effets de la faune du sol sont mécaniques : macro-brassage, micro- brassage, formation de galeries, fragmentation de la matière organique fraîche, mélange intime entre la matière organique et les minéraux du sol, formation d'agrégats. Ces activités sont indispensables au développement des qualités agronomiques d'un sol.

L'importance de l'intervention des microorganismes dans le cas de carbone (C), d'azote (N), de soufre(S), elle est capitale, puisque l'absence, voire l'inactivité des microorganismes, entraînerait un arrêt de l'approvisionnement naturel des sols en azote et un blocage du turnover de C, N, S se traduisant par l'accumulation de ces éléments sous forme organique inutilisable par les végétaux.

Les bactéries jouent un rôle dans toutes les transformations de la matière organique, dont la minéralisation. Elles synthétisent des polysaccharides très résistants à la dégradation qui forment une part importante de la matière organique humifiée (l'humus).

Dans le cas des autres éléments, tels que le phosphore (P), l'intervention microbienne est beaucoup plus discrète, les transformations microbiennes peuvent contribuer à l'enrichir ou à l'appauvrir.

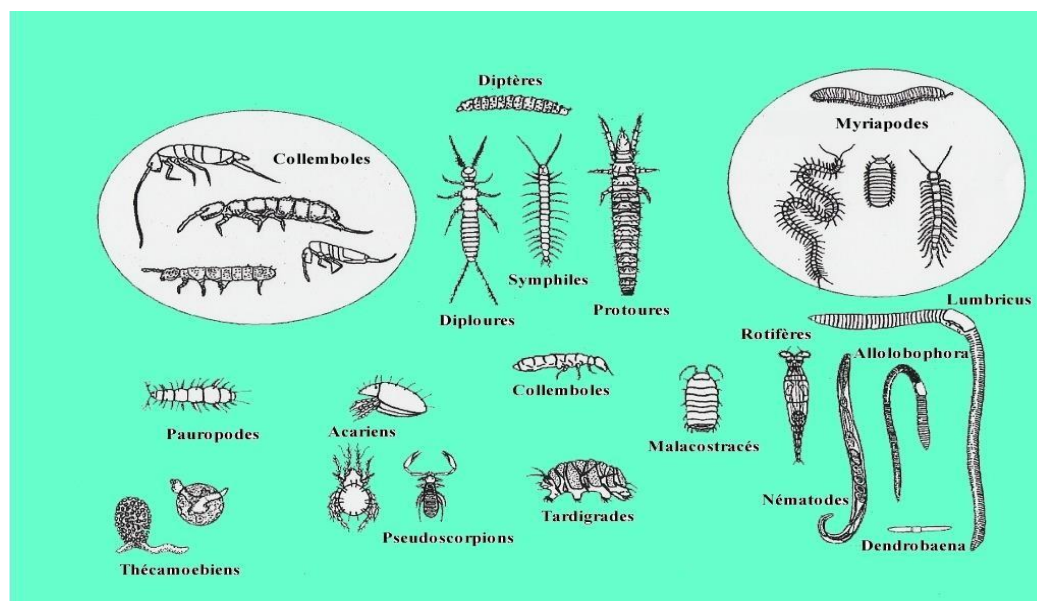


Figure III.3 : Biomasse animal

III.4) Le lombricompostage :

Le lombricompostage est un procédé qui consiste à utiliser différentes espèces de vers épigés pour décomposer des déchets organiques et produire un engrais et amendement organique riche en éléments nutritifs destiné aux petites exploitations agricoles. Les propriétés bénéfiques du lombricompost sont essentiellement dues à la teneur élevée en éléments nutritifs des déjections de vers de terre.



Figure III.4 : Les vers de terre qui vivent dans le compost (p. ex. Eisenia sp.)

III.4.1) Les vers de terre :

Les vers de terre représentent une composante majeure de la macrofaune du sol dans la plupart des écosystèmes terrestres. En 1994, plus de 3600 espèces de vers de terre, réparties en 15 familles, avaient été recensées dans le monde, aux quelles s'ajoutent plus de 60 nouvelles espèces chaque année. Ils jouent un rôle important dans leur environnement grâce à différents mécanismes physico-chimiques et biologiques, permettant d'améliorer la fertilité et de préserver la structure du sol. Ainsi, en affectant les propriétés physiques et chimiques du sol, ils modifient le biotope des communautés microbiennes.

III.4.1.1) Biologie et classification

Tous les vers de terre sont hermaphrodites. Un échange de spermatozoïdes a lieu lors d'un accouplement, qui se produit généralement à la surface du sol, lorsque les conditions sont favorables. Quelques jours plus tard, le clitellum (partie renflée formant une bague sur le corps d'un ver de terre adulte) glisse le long de la partie antérieure du ver et le cocon, encore appelé œuf ou zygote, contenant des gamètes mâles et femelles, est émis dans le sol sous forme d'une capsule fermée aux deux extrémités.

Les cocons sont résistants aux conditions défavorables comme la sécheresse ou une modification de la température [50]. Le dessèchement du sol provoque la déshydratation du cocon, ce qui peut retarder le développement embryonnaire.

Le ver juvénile va progressivement acquérir des caractères sexuels secondaires externes liés à l'accouplement comme le puberculum tuberculeux ou les pores sexuels; il sera alors au stade sub-adulte. Un clitellum, organe lié au processus de ponte, va ensuite se former et permettre au ver de devenir sexuellement mature pour pouvoir se reproduire à son tour ; le ver est alors adulte. Le temps de maturation varie beaucoup entre espèces et dépend des conditions de milieu (température, humidité, nourriture).

Les vers de terre ont une durée de vie dépendante de l'espèce, de leur biotope et des conditions dans lesquelles ils vivent. La durée des quatre étapes fondamentales du cycle de vie des lombriciens (cocon, juvénile, subadulte et adulte) : figure III.5, ainsi que la fécondité et la survie des vers dépendent fortement de l'espèce considérée mais aussi des conditions du milieu.

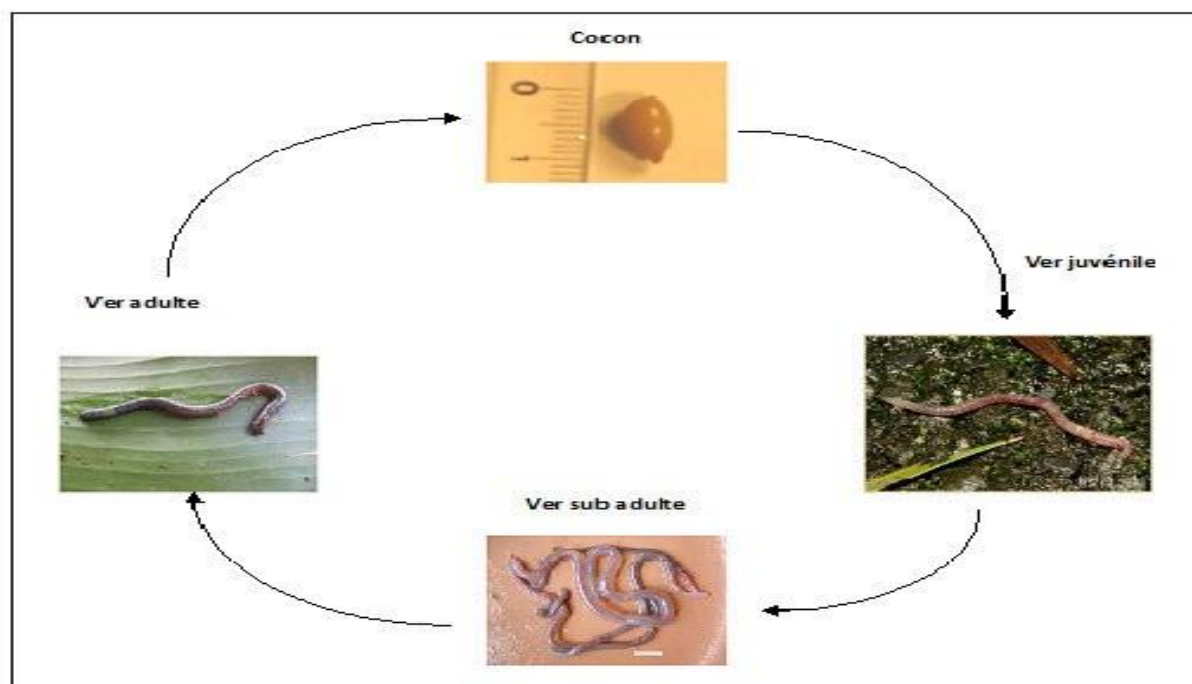


Figure III.5 : Cycle biologique ver de terre [50]

III.4.1.2) Répartition écologique :

En 1971 Bouché a distingué 3 classes écologiques distinctes de vers de terre, suivant des paramètres morphologiques et comportementaux, physiologiques, reflétant leur mode de vie et activité dans le sol : les épigés, les anéciques et les endogés, représenté par la figure III.6 et 7.

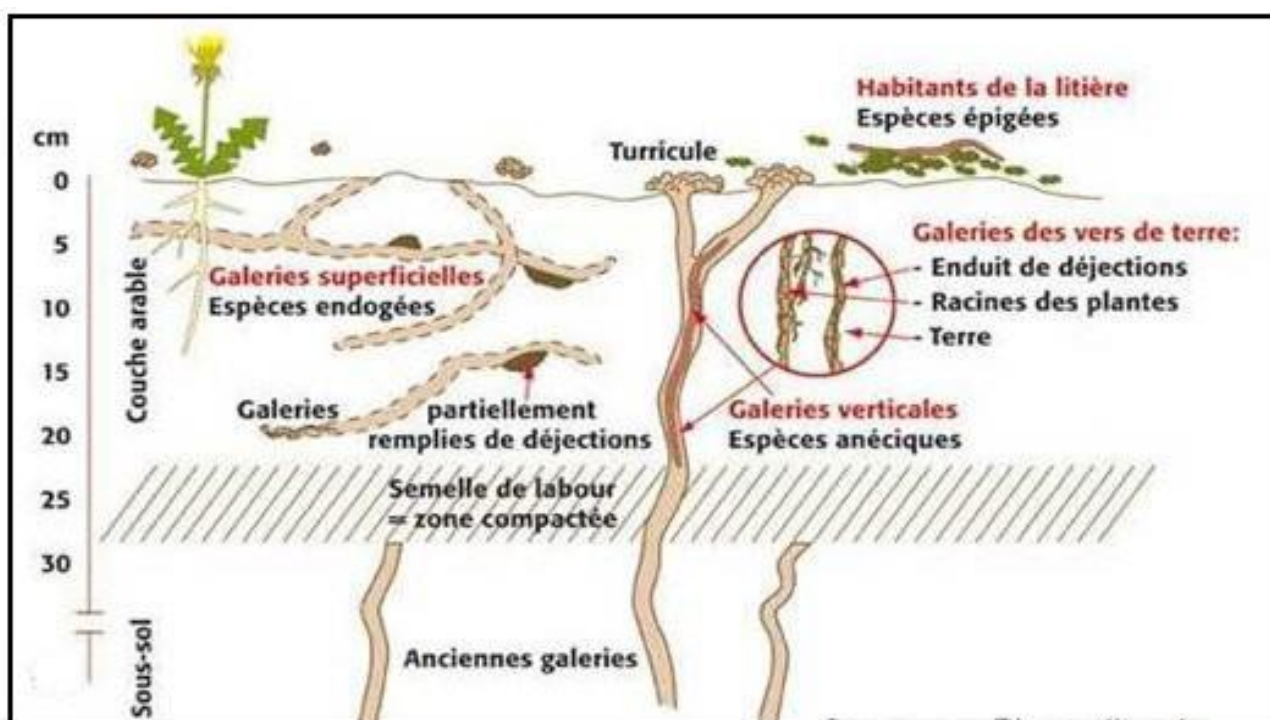


Figure III.6 : Répartition écologique des vers de terre (Source:www.bioactualites.ch)

Epigés	Anéciques	Endogés
		
Source : Arena-auximore	Source : Atlas DC	Source: Atlas DC
Petite taille (1 à 5 cm) Couleur foncée, rougeâtre Vivent en surface Se nourrissent de la matière organique de surface	Grande taille (10 à 100 cm) Couleur foncée, tête rouge ou noire Vivent dans des galeries verticales, connectées à la surface du sol Enfouissent la matière organique prélevée en surface	Taille moyenne (3 à 20 cm) Faiblement coloré Vivent en profondeur Se nourrissent sous la surface du sol

Figure III.7 : Classification écologique des vers de terre

III.4.1.3) Les vers de terre incorporent les débris végétaux morts dans le sol :

Les vers de terre incorporent dans le sol les matières organiques telles que les résidus de culture, les engrais organiques, le fumier ou le mulch. Ils mélangent les résidus végétaux par broyage physique et digestion chimique. Ils accélèrent ainsi la décomposition de la biomasse morte et stimulent le cycle des éléments nutritifs dans le système sol-plantes. Lorsque les vers de terre tirent de la matière végétale dans leurs galeries, ils déplacent de précieux éléments nutritifs dans le sol, en particulier dans les couches profondes (bioturbation).

Dans les surfaces herbagères, les vers de terre incorporent dans le sol jusqu'à 6 tonnes de matière organique par hectare et par an. Dans les forêts, ils digèrent jusqu'à 9 tonnes de feuilles mortes par hectare.

III.4.1.4) Les vers de terre décomposent les débris végétaux morts et approvisionnent les plantes en éléments nutritifs :

En fonction de la densité de population, les vers de terre produisent entre 40 et 100 tonnes de déjections par hectare et par an. Les turricules déposés à la surface ou au sein du sol forment des agrégats ou grumeaux stables. Les déjections des vers de terre sont un mélange intime de particules végétales et minérales, et les éléments nutritifs y sont présents en plus forte concentration et sous une forme facilement assimilable par les plantes. Les turricules contiennent en moyenne 5 fois plus

d'azote, 7 fois plus de phosphore et 11 fois plus de potassium que la terre environnante. L'azote contenu dans les turricules est facilement disponible pour les plantes.

III.5) La fertilité des sols et les vers de terre :

Les vers de terre influencent de nombreux services écosystémiques liés à la fertilité du sol et à la production végétale. Voilà pourquoi la promotion des vers de terre et d'autres animaux importants du sol contribue à une utilisation plus efficace des processus écologiques. L'amélioration des propriétés abiotiques et biotiques du sol par les vers de terre présente de nombreux avantages pour les agricultrices et agriculteurs tels qu'une disponibilité accrue des éléments nutritifs, une meilleure rétention de l'eau, une érosion réduite et une productivité accrue des cultures.

Les vers de terre jouent un rôle clé dans l'amélioration des propriétés du sol. Les avantages qui découlent de leur activité sont nombreux. Toutefois, pour être en mesure d'assurer leurs fonctions, ils doivent bénéficier de certaines conditions comme une quantité suffisante de matières organiques, l'absence de pesticides problématiques et une faible perturbation du sol.

III.6) Les biofertilisants :

L'effet des micronutriments sur la réduction de la gravité des maladies est attribué à leur implication dans la physiologie et la biochimie de la plante. En effet, de nombreux micronutriments sont impliqués dans de nombreux processus essentiels qui peuvent affecter la réponse des plantes aux agents pathogènes [12]. L'effet de micronutriments sur le développement des maladies est procédé par des changements structuraux ou physiologiques au niveau de la plante, d'une toxicité directe envers le pathogène ou indirect par l'augmentation des activités antagonistes microbiennes.

Un approvisionnement adéquat en Mn est important dans la plupart des mécanismes de défense actifs des plantes. Les glycoprotéines (lectine) associées à la résistance de la patate douce à *Ceratocystis fimbriata* et *Phytophthora infestans* nécessitent du Mn pour leur activité.

Les concentrations vasculaires de l'acide chlorogénique inhibiteur de la pectine méthylestérase du *Verticillium vasculaire* restent beaucoup plus élevées chez les cultivars de pomme de terre résistants que sensibles [12].

Le chlorure de calcium a montré une action modérée sur l'inhibition des trois stades du cycle des isolats d'*Alternaria alternata*. Ce produit a inhibé légèrement la germination des conidies des isolats de *Fusarium oxysporum* mais s'est montré très inefficace sur la croissance radiale et la production de conidies.

Le calcium est un élément indispensable aux processus de croissance et de survie des plantes en conditions de stress. Son rôle dans la transduction des signaux endocellulaires permet aux plantes de moduler leurs réponses vis-à-vis de divers stimuli biotique et abiotique. Le calcium joue également un rôle important dans le maintien de l'intégrité et de la sélectivité membranaire. Par

conséquent, son introduction dans le milieu de culture permet un meilleur contrôle des propriétés membranaires et assure un rôle protecteur lorsque les conditions du milieu sont défavorables [13]. En cas de déficience en Ca, des composés tels que les sucres et les acides aminés peuvent s'infiltrer dans les zones entre les cellules (l'apoplaste) où ces composés deviennent disponibles pour l'utilisation des phytopathogènes. Deuxièmement, le Ca est important dans le développement de la paroi cellulaire; les plantes déficientes en Ca sont plus sensibles aux attaques de pathogènes, en particulier par les champignons.

Le zinc joue également un rôle important dans le maintien de l'intégrité de la membrane cellulaire des racines et les processus de transport des ions dans les membranes cellulaires des racines du blé. Les plantes suffisantes en zinc sont avérées plus tolérantes à l'infection des racines par le *Fusarium*. Dans la plupart des cas, l'application de Zn a réduit la gravité de la maladie. Cela résulte probablement de la fongitoxicité du Zn et son rôle dans la stabilisation des membranes des cellules radiculaires [4].

III.7) Effet de la fertilisation organique sur la production et la santé des plantes :

Les engrais biologiques ont été développés pour remplacer les engrais chimiques largement utilisés dans l'agriculture. Une bonne pratique agricole implique l'apport de substances organiques tels que les résidus de la récolte ou les différents types de composts, afin d'améliorer la fertilité du sol. Ce type d'engrais est constitué d'un mélange des déchets d'origine animale ou végétale qui renferme de N, P et K, mais avec des proportions parfois moins importantes en comparaison avec les engrais minéraux [51].

En effet, la fertilisation organique du sol affecte la croissance et le rendement des cultures, soit directement en fournissant des nutriments ou indirectement en modifiant les propriétés physiques du sol en améliorant ainsi l'environnement racinaire. Une étude réalisée sur cinq cultures a montré que l'application de la matière organique améliore l'absorption des nutriments et la croissance des racines. Elle améliore aussi la structure des sols, augmente la capacité de rétention en eau, stimule l'activité microbienne et augmente le rendement.

III.8) Rôle de fertilisation biologique dans la production agricole :

Les fertilisants biologiques diffèrent des engrais chimiques et organiques dans le sens où ils ne fournissent pas directement tous les nutriments aux cultures, mais fournissent des bactéries et des champignons qui peuvent aider les plantes à une assimilation pertinente des éléments nutritifs. Les micro-organismes du sol jouent un rôle déterminant dans la régulation de la dynamique et la décomposition de la matière organique, ainsi que la disponibilité des éléments nutritifs des plantes tels que le N, le P et le S. Il est bien établi que les inoculants microbiens constituent un élément important dans la gestion intégrée des nutriments qui conduit à une agriculture durable. Ils

peuvent être utilisés comme intrant économique pour la productivité des cultures.

Les bio-fertilisants ont le potentiel d'améliorer la santé et la productivité des plantes cultivées et réduire les besoins en engrais chimiques synthétiques. L'application de ces microorganismes sur les graines, les tubercules ou dans le sol permet la colonisation de la zone racinaire ou l'intérieur de la plante en favorisant la croissance et améliorant l'approvisionnement ou l'accessibilité des principaux nutriments à la plante. Ces microorganismes sont associés à l'extension de système racinaire, comme ils assurent un meilleur pouvoir germinatif des graines. Ces produits, favorisent non seulement la croissance et le développement des plantes, mais réduisent également le coût de production car ils ont la tendance à diminuer les doses d'engrais chimiques utilisées.

III.8) Conclusion :

La biodégradation de la matière organique dans le sol agricole est un processus essentiel qui contribue à maintenir la fertilité du sol et à favoriser la santé des écosystèmes agricoles.

Elle favorise la formation d'agrégats dans le sol, ce qui améliore sa structure en favorisant la formation de pores, la rétention d'eau et la circulation de l'air. Une meilleure structure du sol facilite également la pénétration des racines et leur croissance.

Elle décompose les composés organiques présents dans le sol en éléments nutritifs tels que l'azote, le phosphore, le potassium et d'autres micronutriments. Ces éléments sont ensuite disponibles pour les plantes, favorisant ainsi leur croissance et leur développement.

Elle fournit de la nourriture et de l'énergie pour les microorganismes du sol, favorisant ainsi une activité biologique bénéfique. Cette activité microbiologique contribue à la décomposition continue de la matière organique et au recyclage des éléments nutritifs dans le sol.

Chapitre IV

Matériels et méthodes

Cette étude dans le cadre de comprendre les interactions entre le sol agricole, la matière organique et les vers de terre, elle vise l'effet de biodégradation de la matière organique sur le sol, pour cela nous avons réalisé les études suivantes :

IV.1) Site de l'étude :

IV.1.1) Localisation :

L'expérimentation se déroule à la commune de blidet Amor, est une petite ville du sud algérien située à 25 km au sud de la wilaya de Touggourt de notre pays l'Algérie, s'étend d'une superficie de 250 km², ce site a pour coordonnées géographiques 32° 57' 05'' Nord, 05° 58' 50'' Sud .

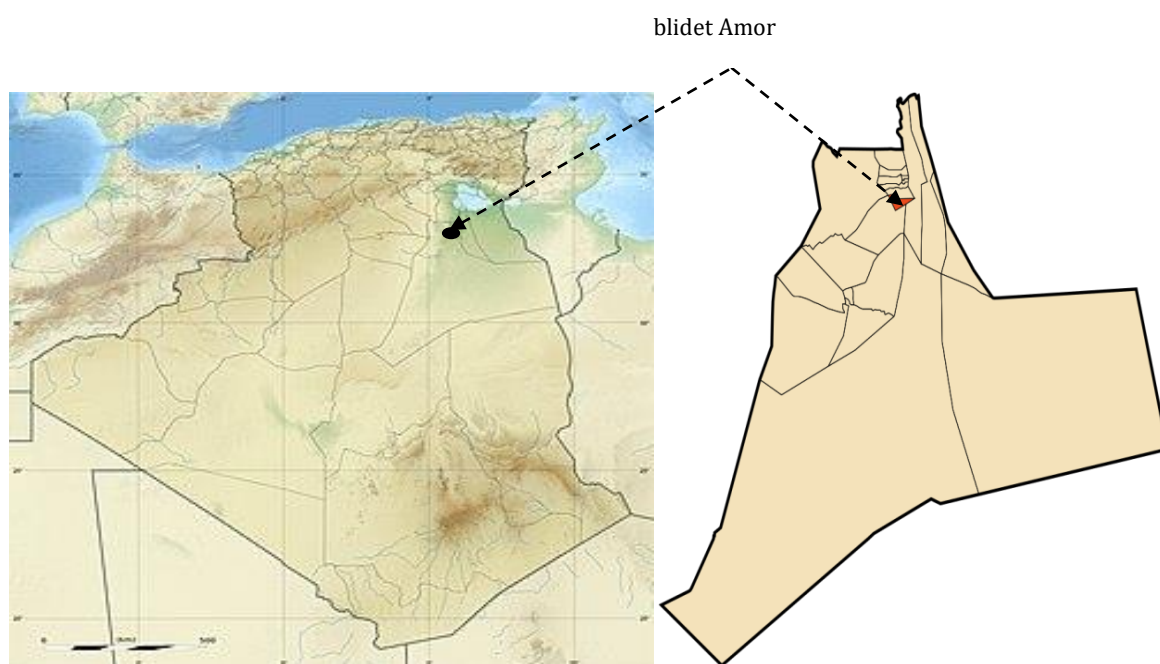


Figure IV.1 : Localisation géographique de la commune de blidet Amor
Géolocalisation sur la carte : [Algérie](#) source Google Earth.

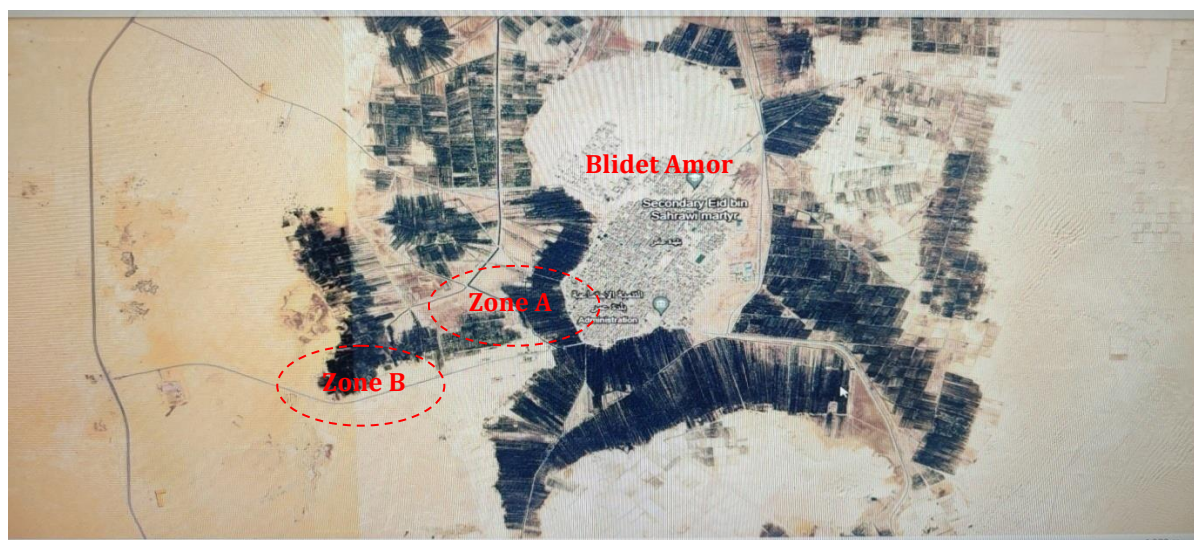


Figure IV.2 : Localisation des zones d'étude au niveau de la commune de blidet Amor

Les sols agricoles exploités dans cette commune représentent 20% de la superficie totale de la commune, ils sont repartis ; 60% sol (Sable limoneuse), 38% sol (Sableux) et 02% sol (Argileux).

En outre, dans cette région plus de 75% du sol n'est pas exploité suite à la difficulté des ressources d'eau, mais actuellement avec la stratégie de l'état et de l'autorité locale un programme d'investissement et d'exploitation était lancé à court et long terme pour développer cette structure.

A cet effet, il est nécessaire d'abord de faire les analyses et identifier les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des sols destinés à l'agriculture dans cette région afin d'obtenir de grandes récoltes en produits agricoles.

Notons que cette commune est caractérisée par la production des dattes de palmier, des abricots, des grenades, des pastèques, des pommes de terre, des tomates, des carottesetc.

IV.1.2) Sol agricole d'étude :

Pour l'échantillonnage des sols agricoles de ladite commune sont prélevés de les plus représentatifs possibles ont été spatialement choisis d'une manière plus ou moins identique et homogène sur le plan microclimatique et topographique.

IV.2) Matériels :

IV.2.1) Matériels (matière organique) :

La matière organique étudiée est composée par le fumier et les résidus végétaux issus de l'entretien des palmiers et des herbes de cette commune de la région de Touggourt.

IV.2.2) Matériels animal (vers de terre) :

Les vers de terre endogés existants dans les zones d'étude, ils ont d'une longueur de 3 à 20 cm avec un diamètre égale 1,5 mm, ils sont classés comme lombrics terrestres (Figure V.3).

En plus les vers de terre utilisés sont accompagnés par le microorganisme du sol tel que les bactéries et les champignons.



Figure IV.3 : Les vers de terre endogés utilisés dans les sols d'étude

IV.2.3) Dispositifs expérimentaux :

L'étude est réalisée durant la même période de la campagne agricole allant du Février au Mai 2024, se base sur deux dispositifs d'essai, chaque dispositif est composé de quatre pots ci après :

- 1) **1^{er} dispositif (zone A) :** Prélèvement des échantillons du sol de la zone appelée LEBDOUA située à l'Ouest de village, près de 50 à 100 m par rapport l'urbanisme.
- Pot N°1 : 4 volumes de sol (8 kg) + un volume de la de matière organique (2 kg).
 - Pot N°2 : 8 kg de sol, 2 kg de matière organique et 12 vers de terre
 - Pot N°3 : 8 kg de sol, 2 kg de matière organique, 12 vers de terre et 04 plantes de tomate.
 - Pot N°4 : 8 kg de sol, 2 kg de matière organique et 04 plantes de tomate.



Figure IV.4 : Installation des pots du 1^{er} dispositif (zone A)

- 2) **2^{ème} dispositif (zone B) :** Prélèvement des échantillons du sol de la zone appelée LEBRARI située dans le Sud Ouest de village est éloigné presque de 3 Km par rapport ce dernier.
- Pot N°5 : 8 kg de sol et 2 kg de matière organique.
 - Pot N°6 : 8 kg de sol , 2 kg de matière organique avec 12 vers de terre.
 - Pot N°7 : 8 kg de sol, 2 kg de matière organique, 12 vers de terre et 04 plantes de tomate.
 - Pot N°8 : 8 kg de sol, 2 kg de matière organique et 04 plantes de tomate.



Figure IV.5 : Installation des pots du 2^{ème} dispositif (Zone B)

IV.2.4) Matériel végétale :

Dans cette étude on a semé les plantes de tomate suite leurs caractéristiques agricole suivantes : elles sont cultivées dans le monde entier et peuvent être cultivées en pleins champ ou en serre, la plante de tomate est une plante annuelle qui germe à partir de graines, produits des fleurs et des fruits pendant la saison de croissance, puis meurt à la fin de la saison.

Ci dessous la cultive des plantes de tomates à la fin de mois de février 2024 :



Figure IV.6 : Cultive des plantes de tomate dans les deux dispositifs (Zones A/B)

IV.3) Etude expérimentale sur l'effet des vers de terre sur la transformation de la matière organique :

IV.3.1) Analyses physico-chimiques du sol :

Toutes les analyses physico-chimiques sont réalisées sur les échantillons dans le but de mettre en évidence certaines caractéristiques physico-chimiques.

IV.3.1.1) Détermination de la texture du sol :

Le test du boudin permet d'évaluer approximativement la texture, en cas d'absence d'analyse.

Apprécier la texture du sol :

Prenez un échantillon de sol humide ou humecté et appréciez le texture au toucher et à l'œil :

-  **Sable :** les grains sont observable à l'œil nu, la sensation aux doigts est rugueuse et grossière, légèrement humecte et peut être moulé mais reste fragile et s'effondre avec une légère pression.
-  **Limon :** les limons laissent une impression douce et soyeuse et colorent généralement les doigts.
-  **Argile :** l'argile est extrêmement dure et résistante et devient plastique et collante aux doigts une fois mouillée.

Technique de la bouteille :

- 1) Prélevez un échantillon de sol sec ou faites le sécher, après avoir brisé les mottes et agrégats, tamisez pour séparer la terre fine des débris organique et des graviers.
- 2) Passer l'échantillon de sol dans une bouteille remplie d'eau à moitié, bouchez et secouez vigoureusement pour détruire les agrégats, on peut ajouter du sel de table pour augmenter l'effet dispersant de l'eau.
- 3) Après une minute, les sable se déposés et vous pouvez faire une marque au feutre au niveau de démarcation ; au bout d'une heure il en est de même pour les limons ; il faut en cours attendre 24 heures pour les argiles, en calculant les hauteurs respectives des trois repère et en appliquant une règle de trois, vous obtiendrez le pourcentage de chaque élément
- 4) Tracer les droites de chaque élément obtenu dans le triangle textural, pour déterminer la texture du sol selon l'interaction.

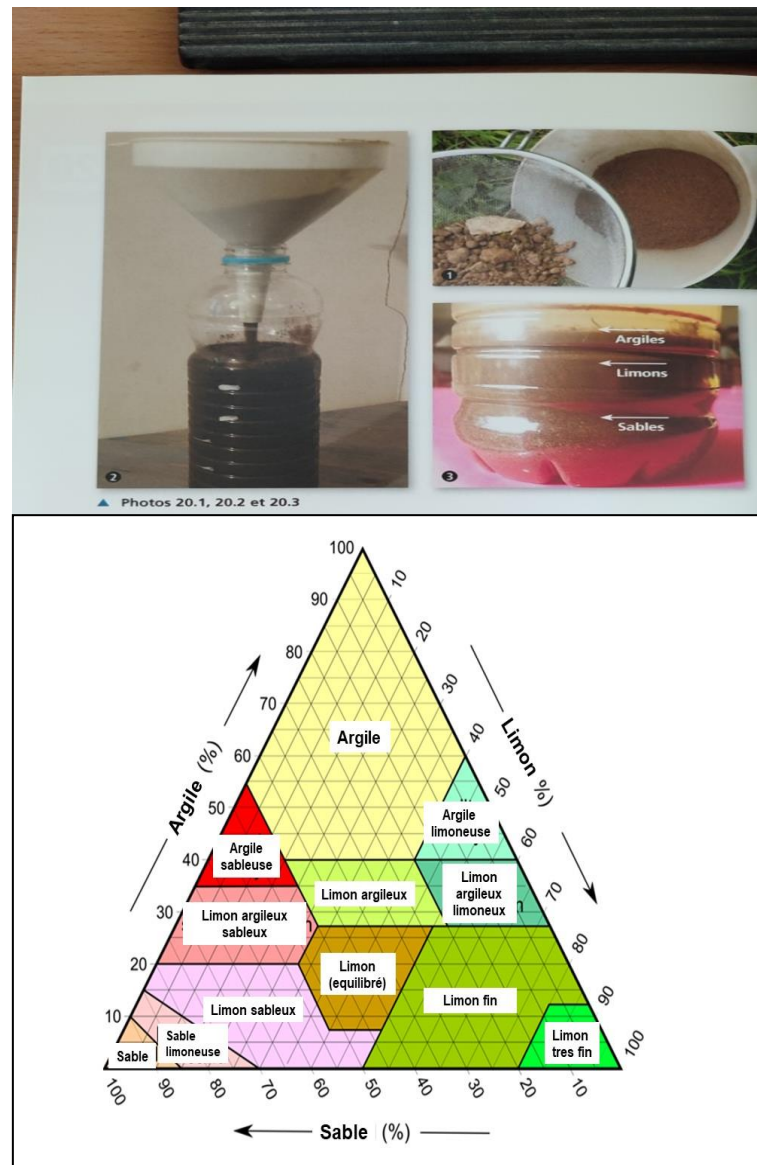


Figure IV.7 : Détermination de la texture du sol par la méthode du boudin.

IV.3.1.2) Extraction d'une solution du sol :

L'opération d'extraction d'une solution de sol consiste à utiliser plusieurs étapes pour déterminer les caractéristiques physiques -chimiques du sol à savoir : [52]

- Tamiser votre sol pour séparer les débris végétaux /cailloux pour augmenter la surface de contact des particules et de permettre la libération d'un plus grand nombre de minéraux.
- Il vous faudra au minimum 200g d'échantillon de sol tamisé.
- Peser à l'aide d'une balance dans premier temps environ 50g de sol
- Préparer un bécher de 250ml d'eau déminéralisée.
- L'eau doit déminéraliser impérativement car sinon vous fausserez votre mesure en ajoutant les minéraux présents dans l'eau du robinet dans votre échantillon.
- Lancer l'agitation à l'aide d'un agitateur magnétique.
- Verser les 50g de sol et laisser l'agitation pendant 1 h
- La dilution sera donc à 1/5^{ème}.
- Peser un second temps environ 150g de sol.
- Préparer un récipient de 250ml d'eau déminéralisée.
- Verser les 150g de sols et mélanger à 4 min à l'aide d'un batteur de cuisine.
- La dilution sera donc à 1/1.
- La solution étant très peu chargée en eau, l'agitation reste possible mais pas compliquée.
- Munissez vous d'un filtre fin, un entonnoir et d'un récipient.
- Utiliser des filtres faits pour cet usage précis, d'une porosité d'environ 5 à 10 microns.
- Le filtrat doit être pur et incolore ou presque.
- Il n'est pas nécessaire de verser la totalité du récipient, remplir le filtre suffit amplement.
- La filtration peut durer plusieurs heures.
- Vous devriez récupérer un liquide incolore ou presque.

IV.3.1.3) Mesure du pH :

C'est la concentration en ions H^+ libres existant dans la solution du sol (acidité actuelle) selon la norme AFNOR., 1998. La mesure du pH s'est faite par un pH-mètre à électrode dans une solution sol.



Figure IV.8 : pH-mètre de mesure de l'acidité

IV.3.1.4) Mesure de la température :

La température est une grandeur physique mesurée à l'aide d'un thermomètre à introduire dans l'échantillon du sol.



Figure IV.9 : Thermomètre de mesure de la température

IV. 3.1.5) Mesure de l'humidité :

Méthode gravimétrique : cette méthode consiste à sécher un échantillon de sol (passer dans un four à 105 °C) et connaître ensuite par pesée finale (ramenée à la pesée initiale) le poids d'eau contenu par l'échantillon.



Figure IV.10 : Un four de chauffage et une balance pour la mesure de l'humidité

IV. 3.1.6) Mesure de la conductivité :

La conductivité électrique d'une solution du sol est un indice des teneurs en sels solubles dans ce sol, elle exprime approximativement la concentration des solutés ionisables présents dans l'échantillon c'est-à-dire son degré de salinité. Elle a été déterminé par la méthode ISO-11265(Iso, 1994).

Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un conductimètre en plongeant l'électrode dans le surnageant. Les résultats sont exprimés en (dS/m⁻¹) et appréciés en classes de salinité.



Figure IV.11 : Un conductivimètre

IV. 3.1.9) Analyse de la spectroscopie d'absorption UV (dosage de l'acide humique) :

Pour déterminer la concentration de l'acide humique on utilise la spectroscopie d'absorption UV-Visible (Figure IV.11) :

Cette technique se repose sur l'interaction matière/rayonnement pour identifier un groupe caractéristique ou une espèce chimique, déterminer une concentration d'espèce en solution et réaliser un suivi cinétique, on suivra les étapes suivantes pour l'utiliser :

- Démarrer et régler l'appareil sur les ongles d'onde d'absorbance (10 nm–400 nm).
- Utiliser l'eau distillée dans la cuve de référence pour faire l'étalonnage et contrôler le passage de la lumière, sur l'appareil s'affiche l'intensité I_0 .
- Déposer la cuve de solvant et poser la cuve d'échantillon à mesurer.
- Prendre le résultat d'intensité pour mesurer la Transmittance : $T = I/I_0$
 I : intensité transmise par la cuve de mesure contenant l'échantillon.
 I_0 intensité transmise par la cuve de référence le blanc (solvant).
- Calculer l'Absorbance : $A = \log (1/T) = \log(I_0/I)$



Figure IV.12 : Spectroscopie UV- Visible

IV.4) Mesure des paramètres DBO et DCO :

La DBO (demande biochimique en oxygène) et la DCO (demande chimique en oxygène) sont toutes deux des mesures « indirectes » de la quantité de matière organique, c'est-à-dire de carbone, qui doit être dégradée pour purifier l'eau. Comme il est difficile de mesurer directement le carbone, les deux valeurs sont calculées comme suit (elles sont toutes deux exprimées en mg/l).

✚ **La valeur de la DBO** : est la quantité d'oxygène dissous dans l'eau qui est consommée par les bactéries aérobies dégradant une certaine quantité de matière organique dans un échantillon d'eau. La DBO est mesurée au bout de cinq jours (=DBO₅), à 20 °C (température favorable à l'activité des micro-organismes consommateurs de dioxygène, O₂) et à l'obscurité (afin d'éviter toute photosynthèse parasite). Deux échantillons sont nécessaires : le premier sert à la mesure de la concentration initiale en O₂, le second à la mesure de la concentration résiduelle en O₂ au bout de cinq jours. La DBO₅ est la différence entre ces deux concentrations. Les mesures seront effectuées sur un même volume et le second échantillon sera conservé cinq jours à l'obscurité et à 20 °C.

Afin de mesurer la totalité de la demande, l'O₂ ne doit pas devenir un facteur limitant de l'activité microbienne. En effet, une eau abandonnée à elle-même dans un flacon fermé consommera rapidement le dioxygène dissous : il faut donc s'assurer au préalable que ce dioxygène suffira largement à la consommation des micro-organismes. On utilise pour cela la méthode des dilutions, ou l'échantillon à doser est dilué dans une quantité d'eau telle qu'à l'issue de la mesure le taux d'O₂ résiduel reste supérieur à 50 % du taux initial. Une quantité réduite du mélange micro-organismes + substrat est ainsi mise en présence du dioxygène d'un important volume d'eau dépourvu de demande propre (l'eau pure ne consomme effectivement pas d'oxygène).

✚ **La valeur de la DCO** : indique la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder chimiquement toutes les substances organiques de l'échantillon d'eau de référence. En fait, il convient de préciser que les bactéries aérobies ne sont pas en mesure de dégrader toutes les matières organiques : la DCO considère plutôt tout ce qui peut être oxydé (et est donc toujours plus élevée, en tant que valeur, que la DBO).

La détermination de la DCO se fait principalement par oxydation avec le dichromate de potassium (K₂Cr₂O₇), un oxydant fort, dans une solution d'acide sulfurique portée à ébullition à reflux pendant 2 heures, en présence d'ions argent (Ag⁺) en tant que catalyseurs et d'ions mercure (Hg²⁺), afin de complexer les ions chlorures, présents dans l'échantillon. Les chlorures causent une interférence positive : en effet, ils réagissent avec les ions argent provoquant une précipitation de

chlorure d'argent et inhibent l'activité catalytique de l'argent. D'une manière simplifiée, on peut décrire la réaction comme suit :



A partir de la quantité de dichromate utilisé, la quantité équivalente en oxygène est calculée, qui aurait réalisé en théorie la même oxydation.

La mesure de la DCO peut s'effectuer soit par titrimétrie, soit par photométrie.

IV.5) Lombricompost :

La technique consiste à utiliser des pots, bacs ou des fosses au niveau du sol avec le rajout des vers de terre et on respecter les conditions appropriées pour le bon déroulement de cette opération à savoir :

- La température entre 30 à 60°C.
- L'humidité adéquate pour vivre et activer les vers de terre avec les bactéries et les champignons.
- Le rapport carbone/Azote équilibré (déchets verts et déchets bruns).

IV.5.1) Lombricompost à la maison :

L'opération consiste à collecter les déchets organiques tels que les épluchures de fruits et légumes, le café, les feuilles mortes, ensuite installer un compost (bacs en bois ou en plastique) et poser ces déchets, ainsi mélanger les déchets verts et déchets bruns régulièrement pour favoriser la décomposition plus gardez le compost humide avec le rajout des vers de terre comme illustré ci-après : la durée de récolte est estimée après 07 semaines.



Figure IV.13: Lombricompost à la maison

IV.5.1) Lombricompost au jardin :

L'opération consiste à réaliser un compost (une fosse d'une profondeur de 30cm à 60 cm au niveau du sol ou d'installer des pots, ensuite introduire la matière organique comme le fumier et les déchets végétaux issus de l'entretien des palmiers, les herbes, les épluchures de fruits, les légumes et le café, ainsi mélanger les déchets verts et bruns régulièrement pour favoriser la décomposition plus gardez le compost humide avec le rajout des vers de terre comme montrée ci dessous :



Figure IV.14: Lombricompost au jardin

Chapitre V

Résultats et discussions

V.1) Caractéristiques physico-chimiques et biologiques des sols étudiés :

Dans cette étude on a statué sur les analyses physico-chimiques et biologiques des sols étudiés initiaux, après 15 jours, après un mois et après deux mois comme sont illustrés ci dessous :

V.1.1) Caractéristiques initiales des sols étudiés (fin de mois de février 2024) :

Zone A : L'échantillon du sol prélevé est tamisé pour éliminer les débris et la matière organique, puis est introduit dans une bouteille de 1 litre avec une quantité d'eau plus est agité pendant 2 minutes, ce mélange est laissé pendant 24 heures pour décanter, le résultat est jugé à l'aide d'une règle millimétrique, qui montre 1 cm de limon et 5.5 cm du sable, expriment en pourcentage (15.4% de limon et 84.6 du sable), et par la suite on a tracé ces droites sur le triangle textural pour déterminer le caractère de ce sol à étudier, il résulte que ce dernier est un sol sable-limoneux.

Zone B : Même technique est appliqué pour l'échantillon de sol prélevé de cette zone, qui conclut que son caractère est un sol sableux (100% sable).

Les résultats d'analyses obtenus sont montrés dans le tableau et la figure ci après :

Tableau V.1 : Caractéristiques initiales des sols étudiés

Caractéristiques physicochimiques des sols	1 ^{er} dispositif (Zone A)				2 ^{ème} dispositif (Zone B)			
	Pot N°1	Pot N°2	Pot N°3	Pot N°4	Pot N°5	Pot N°6	Pot N°7	Pot N°8
Texture	Sable- limoneux				Sableux			
pH	7.25	7.29	7.27	7.34	7.23	7.22	7.26	7.23
L'humidité (%)	21.2	23.4	22.1	22	20.4	21.5	20	21.2
Température (°C)	22.4	22.8	22.6	22.5	21.3	22.5	21.8	22
Conductivité (mS/cm)	4.43	4.42	4.45	4.41	4.37	4.32	4.31	4.33
DCO (mg/l)	/	/	235	234	/	/	/	/
DBO5 (mg/l)	/	/	214	213	/	/	/	/

En général, les sols sableux et les sols sable-limoneux sont caractérisés par une teneur faible ou presque nulle en matière organique comme était indiqué dans le chapitre I (Moins de 1.5% de MO soit 15g/kg de terre).

Donc il est nécessaire de faire des améliorations sur leurs propriétés physico-chimiques et biologiques pour satisfaire au besoin d'agriculture.

En outre, selon les résultats des analyses obtenus on observe que les pH mesurés sont basiques supérieurs à 7 dans ces sols étudiés, les températures mesurées entre 22°C et 23°C sont basses, ainsi que les taux d'humidités mesurés entre 20% et 23% sont basses, par contre les conductivités mesurées entre 4.32 et 4.47 mS/cm sont tolérables, les valeurs de la DCO et de la DBO5 sont entre 235 mg/l et

214mg/l respectivement dans deux échantillons présentatifs (Sol+MO avec ou sans vers de terre), ces paramètres peuvent évaluer avec un arrosage périodique, un apport en matière organique et l'incorporation des vers de terre comme était cité avant.

V.1.2) Caractéristiques des sols étudiés après 15 jours:

Les résultats d'analyses obtenus après 15 jours sont montrés dans le tableau et la figure ci-dessous :

Tableau V.2 : Caractéristiques des sols étudiés après 15 jours

Caractéristiques physicochimiques des sols	1 ^{er} dispositif (Zone A)				2 ^{ème} dispositif (Zone B)			
	Pot N°1	Pot N°2	Pot N°3	Pot N°4	Pot N°5	Pot N°6	Pot N°7	Pot N°8
Texture	Sable- limoneux				Sableux			
pH	7.26	7.49	7.47	7.25	7.23	7.45	7.46	7.22
L'humidité (%)	34	37	36.4	36	34	37	36.4	36
Température (°C)	22.1	27.9	27.7	23.2	22.1	27.9	27.7	23.2
Conductivité (mS/cm)	4.44	4.49	4.50	4.48	4.38	4.42	4.43	4.35

On observe au niveau des pots N°2/3/6 et 7 qui contiennent Sol+MO+VERS une montée de pH de 7.22 à 7.49 , une montée de l'humidité de 22% à 37% avec une montée de la température de 22°C à 27°C, ce que traduit la présence des réactions chimiques dues à l'activité des vers de terre, qui transforment la matière organique en nutriments, par contre dans les pots opposés N°1/4/5 et 8 qui contiennent Sol-MO aucun changement enregistré suite l'indisponibilité des vers de terre , malgré la montée de l'humidité suite les travaux d'arrosage .

V.1.3) Caractéristiques des sols étudiés après un mois :

Les résultats obtenus après les analyses sont montrés dans le tableau et le figure ci-dessous :

Tableau V.3 : Caractéristiques des sols étudiés après un mois

Caractéristiques physicochimiques des sols	1 ^{er} dispositif (Zone A)				2 ^{ème} dispositif (Zone B)			
	Pot N°1	Pot N°2	Pot N°3	Pot N°4	Pot N°5	Pot N°6	Pot N°7	Pot N°8
Texture	Sable- limoneux				Sable			
pH	7.24	7.71	7.77	7.21	7.26	7.75	7.76	7.25
L'humidité (%)	32	36.2	36	33.1	33.7	36.3	35.5	34.2
Température (°C)	25.2	36.2	35.7	25.7	25.2	36.4	38.5	26.3
Conductivité (mS/cm)	4.42	4.59	4.56	4.43	4.38	4.49	4.48	4.34

Comme était remarqué durant la 1^{ère} quinzaine, on observe au niveau des pots N°2/3/6 et 7 une activité des vers de terre dans lesquels provoquent une augmentation de pH de 7.45 à 7.77, une montée

de la température de 27°C à 38°C, une montée de la conductivité de 4.42 à 4.59 mS/cm et une stabilité de l'humidité de 35% à 36%, par contre dans les pots opposés N°1/4/5 et 8 on remarque une stabilité des paramètres de pH et de l'humidité, ainsi une élévation de la température de 22°C à 25°C suite l'indisponibilité des vers de terre, et ceci malgré la disponibilité de la matière organique.

V.1.4) Caractéristiques des sols étudiés après deux mois :

Les résultats d'analyses obtenus après deux mois sont montrés dans le tableau et le figure ci-dessous :

Tableau V.4 : Caractéristiques des sols étudiés après deux mois

Caractéristiques physicochimiques des sols	1 ^{er} dispositif (Zone A)				2 ^{ème} dispositif (Zone B)			
	Pot N°1	Pot N°2	Pot N°3	Pot N°4	Pot N°5	Pot N°6	Pot N°7	Pot N°8
Texture	Sable- limoneux				Sableux			
pH	7.24	7.28	7.27	7.29	7.36	7.26	7.25	7.22
L'humidité (%)	34.5	38.1	37.5	33.5	34	36.7	36.5	34.7
Température (°C)	30.8	40.2	39.4	31.7	30.2	39.9	38.5	30.3
Conductivité (mS/cm)	4.42	4.47	4.45	4.44	4.39	4.41	4.40	4.35
DCO (mg/l)	/	/	198	237	/	/	/	/
DBO5 (mg/l)	/	/	205	213	/	/	/	/

Au niveau des pots N°2/3/6 et 7 on observe une diminution de pH de 7.77 à 7.25, une diminution de la conductivité de 4.59 à 4.41 mS/cm, et une légère montée de la température de 3°C, plus une diminution de la DBO5 et DCO entre 214 à 205 mg/l et 235 à 198 mg/l respectivement dans le pot N°3 qui composé par SOL+MO+VERS, ce qui traduit l'acidification des déchets végétaux et du fumier, ainsi on remarque dans les pots opposés N°1/4/5 et 8 une stabilité des paramètres par rapport aux paramètres initiaux, donc pas de changement enregistré suite l'absence de l'activité des êtres vivants (pas des réactions chimiques).

V.1.5) Analyses des spectres UV des sols étudiés après deux mois :

Les analyses des spectres UV des solutions des sols étudiés dans les 4 pots qui composent par SOL-MO-VERS sont présentées sur le tableau V.5. Les spectres obtenus présentent de grandes similitudes en ce qui concerne les positions des pics principaux [53].

Les pics entre 300–100 nm sont caractéristiques des substances humiques. Ils sont attribués principalement à l'absorbance des groupements O-H des différentes fonctions et des groupements N-H. La bande d'absorption à 190 nm est considérée comme caractéristique d'une bande à des doubles liaisons C=N, C=O acide ou cétonique C=C dans les systèmes aromatiques conjugués avec les groupements carboxyliques ou carbonyles, la bande d'absorption 197 correspond à des

groupements OH appartenant à des fonctions telles que l'alcool, phénol. En outre la présence des pics vers 214 nm indique la présence de groupement C-H aliphatiques constituant des $-\text{CH}_2-$ et $-\text{CH}_3$, la bande d'absorption à 224 nm est attribuée au groupement carboxylique COO ou C-O-C. On note aussi la présence des pics vers 244 nm qui semblent être caractéristiques d'hydrogène acides, c'est-à-dire proches de C-O.

Tableau V.5 : Analyses des spectres UV des sols étudiés après deux mois

Groupements fonctionnels (Acide humique)	Bandes d'absorption λ (nm) détectées Solutions des sols des pots N°2, 3, 6 et 7
C=N, C=O, C=C	190
N-H, O-H	197
=C-H	214
COO ou C-O-C	224
C-O	244

V.1.6) Effets des vers de terre sur la croissance des plantes de tomate :

On a semé et suivi le développement des plantes de tomates de même hauteur de 15 cm dans les pots N°3,4,7 et 8, ci après les figures qui montrent l'évolution de ces dernières :

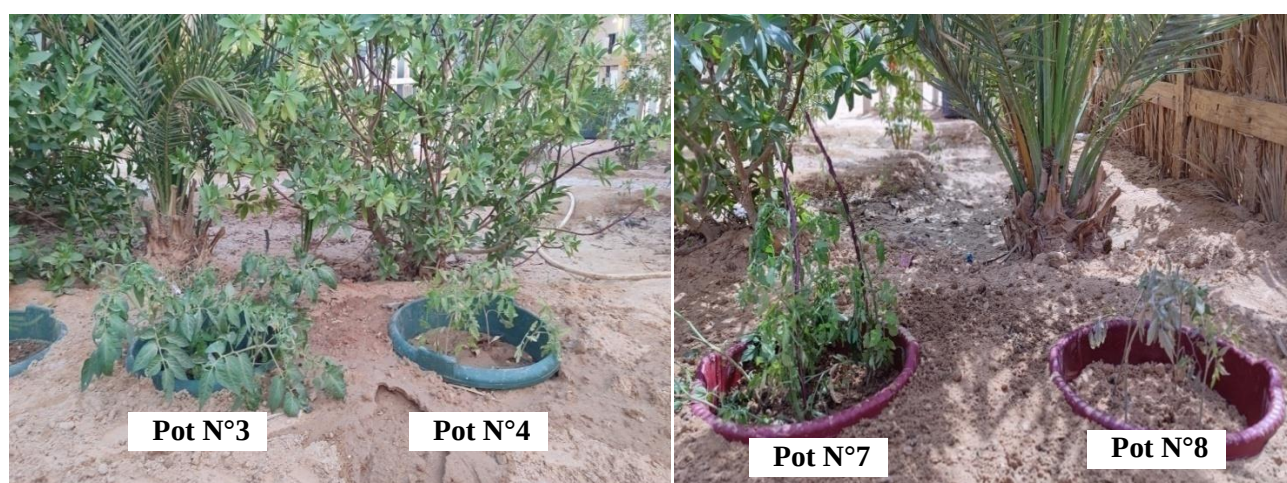


Figure V.1 : Evolution des plantes de tomate dans les sols étudiés après deux mois

Comme illustré dans la figure V.1, on remarque un croisement rapide des plantes de tomate de 15 cm à 40 cm après deux mois de culture dans les pots N°3 et 7 qui sont composés des vers de terre et de la matière organiques, ce qui montre un signe positif de la fertilité du sol et de la santé des plantes suite la disponibilité des nutriments causés par l'activité des vers de terre, par contre un croisement

très lente des plantes de tomate de 15 cm à 25 cm dans les pots opposés N°4 et 8 qui ne composent pas des vers de terre malgré la disponibilité de la matière organiques, ce qui montre un signe négatif suite le manque des nutriments , donc on peut conclure que les vers de terre est un effet directe sur la fertilité du sol et le croissance de ces plantes.

V.1.7) Interprétation des résultats d'analyses des sols étudiés :

1) Le pH :

Les résultats montrent qu'il y a une augmentation de pH avec le temps 7.22 à 7.77 (Figure V.2) dans les sols qui comportent des vers de terre et de la matière organique durant le premier mois, et une diminution à 7.27 à la fin de l'essai, par contre une stabilité de pH enregistrée dans les autres témoins.

La présence des vers de terre dans les sols favorise l'augmentation du pH par rapport aux témoins sans vers de terre cela peut être dû à l'évolution de la décomposition organique, permet aux éléments minéraux fragiles de subir une dégradation plus ou moins poussée où certains cations peuvent être ainsi libérés. L'augmentation du pH est liée aux effets des cations métalliques apportées (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , etc.) qui remplacent les ions H^+ sur le complexe argilo-humique [7].

la diminution du pH enregistrée à la fin de l'essai semble être liée à l'effet d'acidification des déchets de fumier et de végétaux. Les vers de terre ont un effet acidifiant sur le compost. L'acidification est due à l'oxydation de N, P et S organiques en anions simples (NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-}) et à l'oxydation de carbone organique en carbonates (CO_3^{2-}).

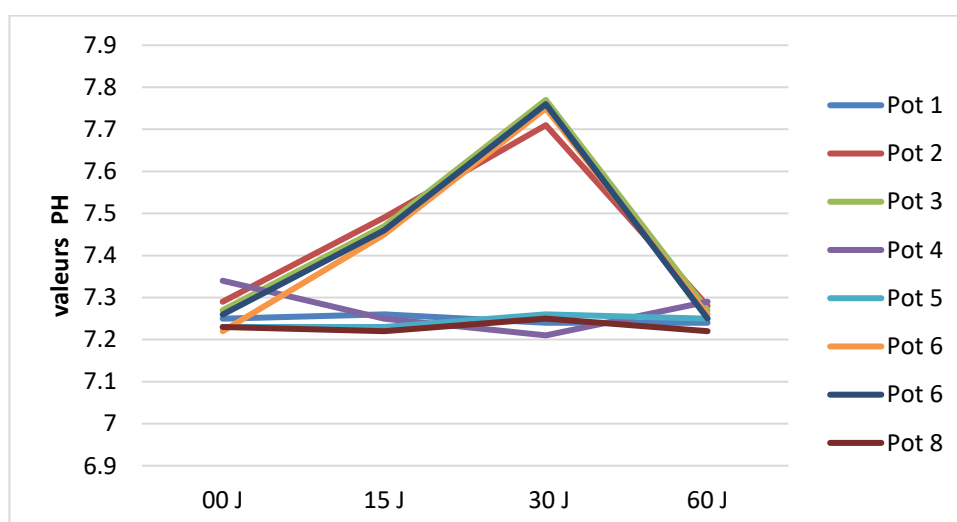


Figure V.2 : Evolution du pH des sols étudiés

2) La température :

L'augmentation de la température de 22°C à 40°C (Figure V.3) dans les sols qui comportent des vers de terre et de la matière organique explique l'activité macrobienne[17], la biodisponibilité des nutriments et la croissance des plantes par contre dans les autres pots l'augmentation de la température est très faible, tandis que la variation de la température dépend aussi plusieurs facteurs, notamment de la météo, de la saison, de la profondeur du sol et de la couverture végétale. Donc on surveille souvent la température du sol pour déterminer le moment optimal pour semer, irriguer ou appliquer des engrais, afin d'optimiser les conditions de croissance des cultures.

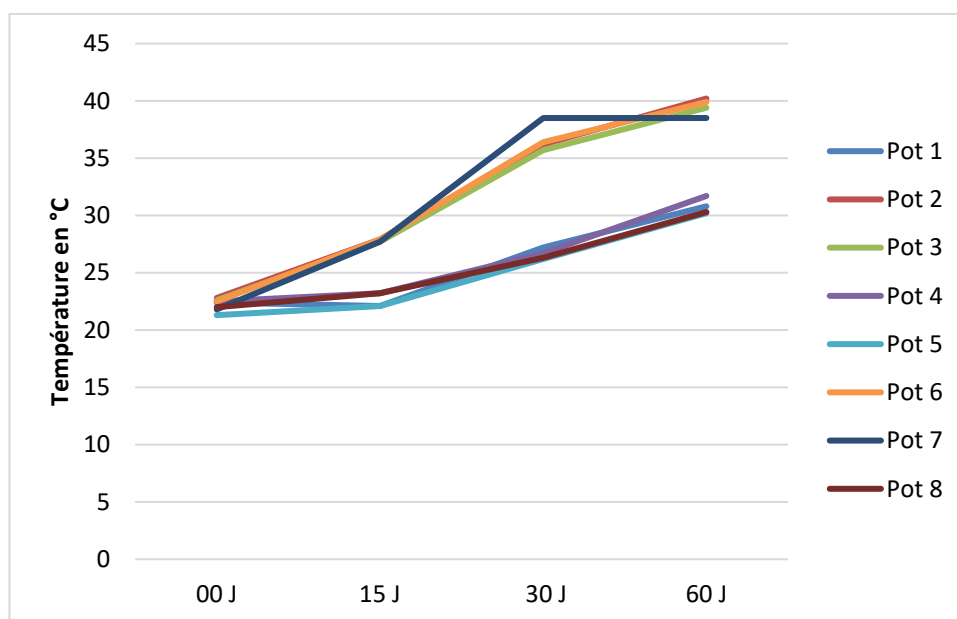


Figure V.3 : Evolution de la température dans les sols étudiés

3) L'humidité :

La variation de l'humidité de 22% à 38% (Figure V.4) dans les sols qui contiennent des vers de terre est optimale pour l'activité de ces derniers, la fertilisation et la croissance des plantes, par contre un sol trop humide ou sec peut entraîner la pourriture des racines et un stress hydraulique pour les plantes. Donc on surveille l'humidité du sol pour prendre des décisions éclairées sur l'irrigation et de maintenir des conditions optimales pour la fertilité du sol et la croissance des cultures.

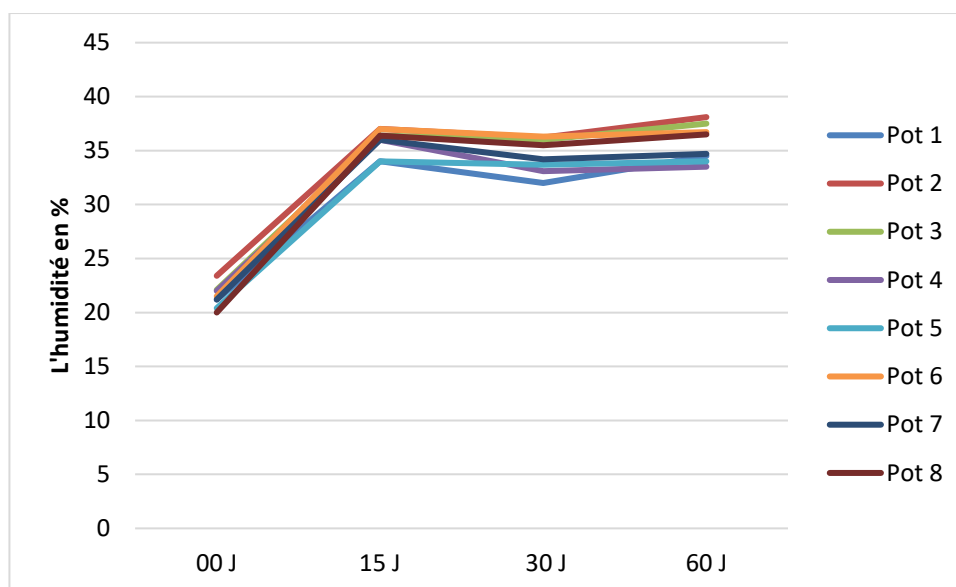


Figure V.4: Evolution de l'humidité des sols étudiés

3) La conductivité :

La salinité a augmenté au cours de l'essai dans les sols qui comportent des vers de terre et de la matière organique (Figure V.5). Elle est passée de 4.42 à 4.59 mS/cm. Cette augmentation est le résultat de l'accumulation ionique issue de la minéralisation des matières organiques [7]. Par ailleurs, l'essai montre que l'augmentation du degré de la salinité liée à l'effet des vers sur la création des complexes adsorbants et la fixation des ions de minéralisation sur ces derniers. Les excréments (turricules) des vers de terre sont riches en nitrates, et en formes disponibles de P, K, Ca et Mg qui favorise la salinisation. L'ammonium est le principal facteur de salinisation. Les vers de terre, leurs déjections, permettent de concentrer les éléments minéraux, mais surtout ils les rendent plus assimilables pour les plantes.

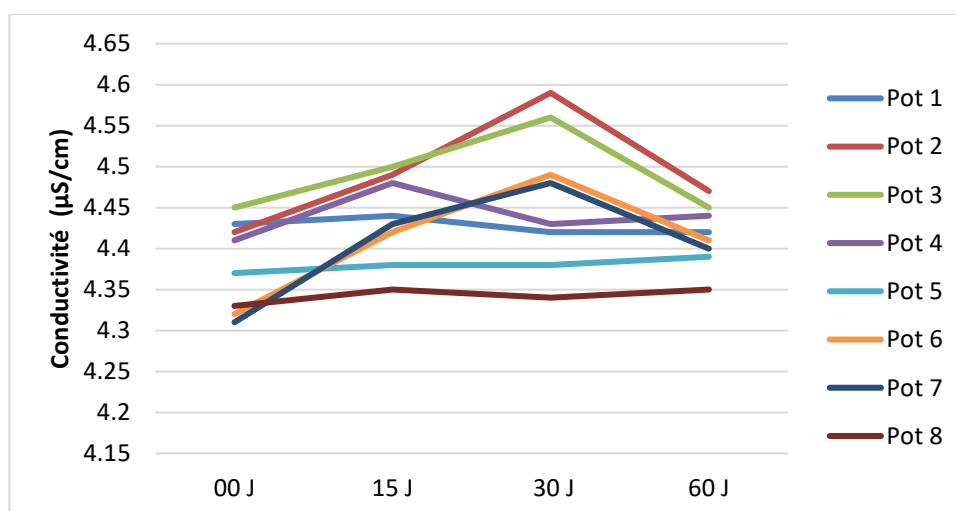


Figure V.5 : Evolution de la conductivité des sols étudiés

Une conductivité optimale joue un rôle très important pour l'activité microbienne, la fertilité du sol et la croissance des cultures, mais une conductivité élevée peut indiquer une forte concentration de sels dans le sol, ce qui peut être préjudiciable aux plantes. Donc on surveille la conductivité du sol pour ajuster l'irrigation, la fertilisation et maintenir des conditions optimales de croissance des cultures.

4) La DCO :

D'après les résultats obtenus on remarque une diminution de la DCO dans les sols qui contiennent des vers de terre et la matière organique de 235 à 198 mg/l, ce que traduit une demande de l'oxygène liée à l'activité des vers de terre qui transforme la MO fraîche en substance humique.

La présence des vers de terre dans les sols favorise la demande en oxygène par rapport aux témoins sans vers de terre cela peut être dû à l'évolution de la décomposition organique, permet aux éléments minéraux fragiles de subir une dégradation plus ou moins poussée où certains cations peuvent être ainsi libérés.

5) La DBO5 :

La variation de la DBO5 montre qu'au niveau des sols qui contiennent des vers de terre et de la matière organique une diminution positive indique l'oxydation biochimique de la matière organique à l'aide des vers de terre, ces valeurs entre 214 mg/l et 205 mg/l. par contre les autres témoins sont stables suite l'indisponibilité des organismes vivants.

V.2) Evolution des caractéristiques des lombricompost:

Ci après les résultats obtenus au niveau des lombricomposts installés dans la maison et dans le jardin :

Tableau V.6 : Evolution des caractéristiques des lombricomposts

Durée	Lombricompost à la maison		Lombricompost au jardin	
	Initial	Après 7 semaines	Initial	Après 7 semaines
pH	7.33	7.93	7.35	7.87
L'humidité (%)	33	39.1	33.2	38.7
Température (°C)	26.2	36.9	25.5	36.3
Conductivité (µS/cm)	5.12	5.56	5.18	5.43
DCO (mg/l)	237	199	240	189
DBO5 (mg/l)	221	213	222	214

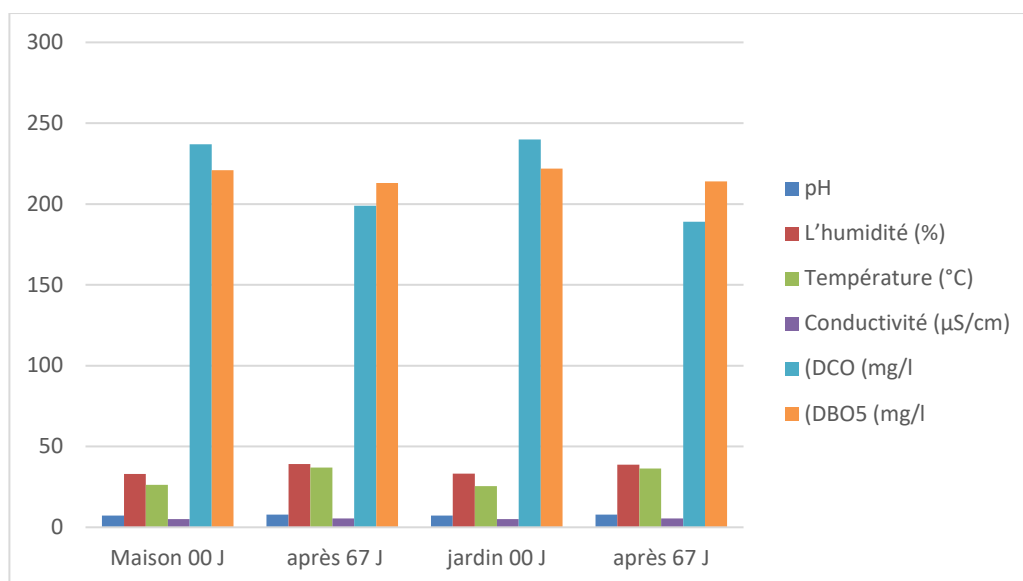


Figure V.6 : Evolutions des caractéristiques des lombricomposts

Les valeurs de la température sont favorables à l'activité microbienne (33 à 39 °C). Le pH augmente de l'amont vers l'aval, il varie de 7,3 à 7,9 et présente ainsi un caractère basique, En ce qui concerne la conductivité électrique (CE) les valeurs enregistrées sont augmentés de 5.1 à 5.5 et tolérables pour les deux essais. Les valeurs de la demande biologique en oxygène (DBO5) et la demande chimique en oxygène (DCO) montrent une diminution de l'amont vers l'aval, ces valeurs oscillent entre 221 mg/l et 213 mg/l pour la DBO5 et de 240 mg/l à 198 mg/l pour la DCO.

Les propriétés physico-chimiques et biologique des lombricomposts dans les deux essais sont évolués rapidement et d'une façon très importante, et spécialement dans le lombricompost à la maison sont plus efficaces avec des nutriments élevé, donc un apport organique très bon.

A cet effet il est utile d'utiliser ces apports comme des engrais naturels pour l'agriculture et éviter les engrais chimiques, ainsi on note que leurs couts sont très faibles et réalisables à condition de suivre les étapes annoncées avant, en plus on peut produire une grande quantité selon les besoins du marche agricole.

**Conclusion générale
Et
Recommandations**

Conclusion générale :

La biodégradation de la matière organique contribue également à l'amélioration de la structure du sol, en favorisant la formation d'agrégats et en augmentant la capacité de rétention d'eau et d'oxygène du sol. De plus la décomposition de la matière organique peut aider à réguler le pH, la conductivité, l'humidité, la température du sol et à favoriser une activité biologique bénéfique, comme la présence de bactéries et de champignons qui contribuent à la santé générale du sol [7].

L'amélioration du sol par la biodégradation de la matière organique est largement utilisée dans l'agriculture biologique et durable, ainsi que dans les pratiques de gestion environnementale pour restaurer la fertilité des sols dégradés et pour promouvoir la santé des écosystèmes [48].

Certes, ces avantages sont indéniables et de toute première importance pour l'agriculture mais ils ne sont pas les seuls. Les effets des SH sur le sol, telles que la libération d'éléments nutritifs dans la solution du sol, l'augmentent la fertilité générale donc facilitent l'installation et le développement des plantes.

En outre les SH ont des actions directes qui affectent le métabolisme de la plante suite à leur absorption. Ces actions varient selon les macromolécules biologiques des acides humiques et des acides fulviques mais la présence simultanée dans les sols de l'ensemble des molécules humiques issus des divers processus d'humification permet aux plantes de puiser et de bénéficier sans distinction des avantages de l'ensemble des humus. Les sols présentant des taux d'humus importants suite au changement de la gestion organique vont donner aux plantes les pleines capacités pour exprimer leur ADN : taille, volume des organes, diamètre des tiges et ramifications, floraison, teneur en matières sèches.[51]

En fin, on conclure que l'amélioration des propriétés physique, chimique et biologique des sols agricoles en question est nécessaire pour obtenir des bonnes récoltes et ceci à l'aide des engrais naturels de lombricompost.

Recommandations :

Nous conseillons nos agriculteurs d'investir sur le processus de lombricompost soit à la maison ou au niveau des sites d'agricoles pour obtenir des bonnes récoltes.

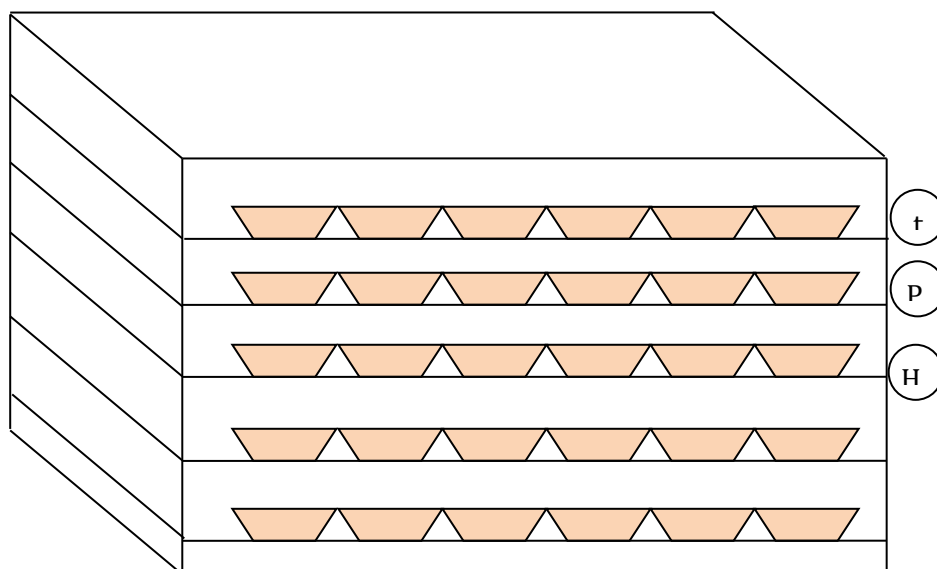
Le lombricompost est un procédé écologique et économique plus un gain environnementale, puisque la récupération des déchets organiques après leur traitement ne coûte rien, si on fait un bilan au niveau de l'urbanisme (Chaque famille de 4 à 8 personnes génère par jour plus de 1 Kg de déchets organiques multiplié par le nombre des familles sera en tonnes). Ensuite après leurs décompositions biologiques on récupère les engrais naturels.

Pour cela et après les résultats d'étude, on propose un dispositif de production d'engrais

Conclusion générale :

naturel et efficace comme suit :

- Confectionner un skid métallique ou en bois avec des compartiments.
- Poser des pots de 10 L forés en superposés.
- Mettre 4 Kg de déchets de verts et des animaux plus les déchets traités de maison.
- Introduire 20 vers de terres épigées dans chaque pot.
- Disposer un bac d'eau de 1 m³ pour humidifier les déchets organiques chaque fois.
- Installation des appareils de contrôle ; un thermomètre, un humidificateur ; un pH mètre.
- Relever les paramètres selon un programme bien étudié.
- La durée de récupération des engrais est estimée 7 semaines maximum.
- On peut installer plusieurs skids dans une grande maison en plastique.



Dispositif de production des engrais naturels de 144 pots

Références Et Bibliographies

Références et bibliographies

1. Archambeaud M Thomas, Les sols agricoles, comprendre, observer, diagnostique, edition France agricole 2016. P143-273
2. Adrien, Technicien-Conseil chez Agroressources, comment extraire la solution du sol, sur <https://www.agroressources.com/preparer-la-solution-du-sol/>, Mise à jour 27/01/2022, consulté le 01 Mars 2024
3. Yu-Ping Chin, George Aiken, and Edward O'Loughlin Molecular Weight, Polydispersity, and Spectroscopic Properties of Aquatic Humic Substances Environ. Sci. Technol, 28 (11), 1994, P1853-1858.
4. Kaissoumi H, Chahdi A, Selmaoui, K, Benkirane, R, Ouazzani A, et Douira, A. [Effect of different fertilizing elements on the development of two species of Trichoderma spp.]. 32(1), 2017, P12.
5. Cornu S., & Clozel B., Extractions séquentielles et spéciation des éléments trace métalliques dans les sols naturels. Analyse critique. Etude et gestion des sols,7, 2000, P179-189.
6. Revel J.C, P. Morard, Bailly J-R., Labbe H., B. C. and K. M., "Plants' use of leachate derived from municipal solid waste." *Journal of environmental quality* 28(4), 1999 , P1083-1089.
7. Comprendre les sols agricoles, Interbio France-comité [en ligne] , consulté le <https://www.interbio-franche-comte.com/view.php/Guide%20sols.pdf>
8. Bolan, N., Adriano D , Natesana, R. & Koob, B.J. Effects of Organic Amendments on the Reduction and Phytoavailability of Chromate in Mineral Soil. *Journal of Environmental Quality* 32, 2003, P120-128.
9. Nardi S., D. Pizzeghello, A. Muscolo and A. Vianello , "Physiological effects of humic substances on higher plants." *Soil Biology and Biochemistry* 34(11), 2002, P1527-1536.
10. Jülide Hizal, Resat Apak , Modeling of copper (II) and lead (II) adsorption on kaolinite-based clay minerals individually and in the presence of humic acid , *Journal of Colloid and Interface Science* 295 ,2006, P1–13.
11. Unifa. Oligoéléments. Unifa, bien nourrir les plantes pour mieux [en ligne] consulté le 02/06/2018 <http://fertilisation-edu.fr/nutrition-des-plantes/le-rôle-des-éléments-nutritifs/oligo-elements.html#autres>
12. Dossa J, Togbe E., Pernaci M, Agbossou E & Ahohuendo B, Effet des facteurs de l'environnement sur les Fusarium pathogènes des plantes cultivées. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 13(1), 2019. P493. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v13i1.39>
13. Cooper R, C. Liu and Fischer D, "Influence of humic substances on rooting and nutrient content of creeping bent grass." *Crop Science*.38(6), 1998, P1639-1644.
14. Fagbenro J and A Agboola, "Effect of different levels of humic acid on the growth and nutrient uptake of teak seedlings." *Journal of Plant Nutrition*, 16(8), 1993, P1465-1483.
15. Senesi N, & Brunetti , Chemical and Physico-Chemical Parameters for Quality Evaluation of Humic Substances Produced during Composting. *The Science of Composting*, 1996, P195–212.
16. Cornu S, & Clozel B , Extractions séquentielles et spéciation des éléments trace métalliques dans les sols naturels. Analyse critique. Etude et gestion des sols.7, 2000 P179-189.
17. MacCarthy P., Clapp C., Malcolm R., & Bloom P., Humic substances in soil and crop sciences: selected readings. Soil Science Society of America, 1999

-
18. Vaughan D and D Linehan, "The growth of wheat plants in humic acid solutions under axenic conditions." Plant and Soil.44 1976, P445-449.
 19. Mahmoud Salman, Bassam El-Eswed b, Fawwaz ,Khalili Adsorption of humic acid on bentonite Applied Clay Science 38 ,2007, P51–56.
 20. Sri Juari Santosa , Eko Sri Kunarti a, Karmanto,Synthesis and utilization of g/Al hydrotalcite for removing dissolved humic acidApplied Surface Science 254, 2008 , P7612–7617
 21. WE1 Min' LIAO Jiali' LIU Ning' ZHANG Dong2 KANG Houjun' YANG Yuanyou' YANG Yong JIN Jiannan ,Interaction between uranium and humic acid (I): Adsorption behaviors of U (V1) in soil humic acids, Nuclear Science and Techniques, Vo1.18, No.5, 2007, P287-293.
 22. Maximiliano Brigante , Graciela Zanini b, Marcelo Avena ,On the dissolution kinetics of humic acid particles Effects of pH, temperature and Ca²⁺ concentration ,Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 294, 2007, P64-70.
 23. Stevenson,F.J, Humus Chemistry. New York, Wiley. 1982
 24. Lulakis, M and S Petsas, "Effect of humic substances from vine-canes mature compost on tomato seedling growth." Bioresource Technology.54, 1995 , P179-182.
 25. Vaughan D, & Ord B, Introduction Soil Organic Matter - A Perspective on its Nature, Extraction, Turnover and Role in Soil Fertility. Soil Organic Matter and Biological Activity,16, 1985, P1–35.
 26. Kögel-Knabner I, The macromolecular organic composition of Plant and microbial residues as inputs to soil organic matter. Soil Biology and Biochemistry, 34 (2), 2002, P139–162
 27. Loue A ,Oligo-éléments en agriculture.(N. Paris, Ed.).1993.
 28. Ladislau Martin-Neto, Dinis Gomes Traghetta, Carlos M. P. Vaz, Silvio Crestana, and Garrison Sposito ,On the Interaction Mechanisms of Atrazine and Hydroxyatrazine with Humic Substances,J. ENVIRON. QUAL., VOL. 30, MARCH–APRIL 2001
 29. Erzsébet Illés, Etelka Tombácz ,The role of variable surface charge and surface complexation in the adsorption of humic acid on magnetites, Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 230,2004,P99–109.
 30. Balesden J, The significanceof organic separates to carbon dynamics and its model lingin some cultivated soils. European Journal of Soil Science,47(4), 1996, P485–49.
 31. Sauvé S., Hendershot W., Allen H, Solid- Solution partitioning of metals in contaminated soils: dependence on pH, total metal burden and organic matter. Environmental Science and Technology,34,2000, P1125-1131
 32. Tejada M and J Gonzalez, "Effects of foliar application of a byproduct of the two-stepoliveoil mill process on rice yield." European Journal of Agronomy SU 21(1), 2004, P31-40.
 33. Mylonas, V. A. and C. B. McCants, "Effects of humic and fulvic acids on growth ofTobacco." Plantand Soil.54 , 1980, P485-490.
 34. Malcolm R and D. Vaughan,"Effects of humic acid fractions on invertase activities in plant tissues." Soil Biology and Biochemistry 11(1), 1994, P65-72.
 35. Mato M., M. Olmedo and J. Mendez, "Inhibition of indole acetic acid-oxidase by soil humic acids fractionated on sephadex." Soil Biology and Biochemistry 4(4),1979b, P469-473.
 36. Sessi E., D. Pizzeghello F, Reniero M., Tomasi C. De Siena, G. Nicolini , "Effect of humic substances extracted from pasture and forest soils on plant metabolism." Fresenius Environmental Bulletin10 (2), 2001, P217-220.
 37. Rauthan B. S. and M. Schnitzer , "Effects of a soil fulvic acid on the growth and nutrient

-
- content of cucumber (*cucumis sativus*) plants." *Plant and Soil*. 63,1981,P491-495.
38. Piccolo A., The supra molecular structure of humic substances. *Soil Science*,166, 2001, P810–832.
39. Chen Y and T Aviad , Effects of Humic Substance on Plant Growth.In *Humic Substances in soil and Crop Sciences: Selected Readings*, Malcolm. Madison,Wisconsin, Soil Sci. Society of America, 1990, P 161-186.
40. Baker A, Fluorescence excitation-emission matrix characterization of some sewage-impacted rivers. *Environmental Science & Technology*, 35(5), 2001, P948–53.
41. Roger-Estrade, J., Richard, G., Boizard, H., Defosse, P., Manichon, H., et Caneill J., SISOL: Un modèle d'évolution de l'état structural des couches de sol cultivées. *Etude et Gestion des Sols*, 11, 2004, P33-46.
42. Nardi S., M Panuccio, M Abenavoli and A Muscolo, "Auxin-like effect of humic substances extracted from faeces of *Allolobophora Caliginosa* and *A. Rosea*." *Soil Biol. Biochem.*26(10), 1994 ,P1341-1346.
43. Archambeaud M Thomas, Les sols agricoles, comprendre, observer, diagnostique, Edition France agricole, 2016. P273.
44. Testiati E., Parinet J., Massiani C., Laffont-Schwob I., Rabier J., Pfeifer H-R., Lenoble V, Masotti V, Prudent P, Trace metals and metalloid contamination levels in soils and in two native plant species of a former industrial site: Evaluation of the phytostabilization potential. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, P248-249,131-141.
45. Amir, S., Hafidi, M., Lemee, L., Merlina, G., Guisresse, M., Pinelli, E., Revel, J. C., Bailly, J.R. & Ambles, Structural characterization of humic acids, extracted from sewage sludge during composting, by thermochemolysis-gas chromatography-mass spectrometry. *Process Biochemistry* , 2006,41, P410-422.
46. Stevenson FJ, Humus Chemistry: Composition, Reactions, Wiley studies on PAH – contaminated soil under varying temperatures. *Chemosphere*,2nd Edition,1994
47. Finstein M & Morris M, Microbiology of municipal solid waste composting. *Advances in Applied Microbiology* 19, 1975 ,P113-51.
48. Hsu J. & Lo S.-L, Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformations during composting of pig manure. *Environmental Pollution* 104,1999, P 189-196.
49. Wong J, Ma K , Fang, K & Cheung C, Utilization of a manure compost for organic farming in Hong Kong. *Bio resource Technology* 67,1999 , P43 46.
50. Evans A et Guild W, Studies on the relationships between earthworms and soil fertility. IV - On the life cycles of some British Lumbricidae. V - Field populations. *Ann. Appl. Biol.*, 35, 1948, P471-484 et P485-493.
51. Dordas C, Role of nutrients in controlling plant diseases in sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 28(1), 2008, P33-46.
<https://doi.org/10.1051/agro:2007051>
52. Adrien ,Agroressources ,Comment extraire la solution du sol,[en ligne], consulté 27/01/2022, <https://www.agroressources.com>.
53. Application de la spectroscopie UV visible ,[en ligne] , consulté 2020.
[https:// chap.II Application de la Spectroscopie UV-visible\(PPT\).pdf](https://chap.II%20Application%20de%20la%20Spectroscopie%20UV-visible(PPT).pdf)

Annexes

Annexe 1 :

1- Photos des zones d'enlèvement des échantillons des sols d'étude :

Photo de la zone A : LEBDOUA



Photo de la zone B : LEBRARAI



Annexe 2 :

2- Détermination de la texture du sol dans les deux zones A et B :

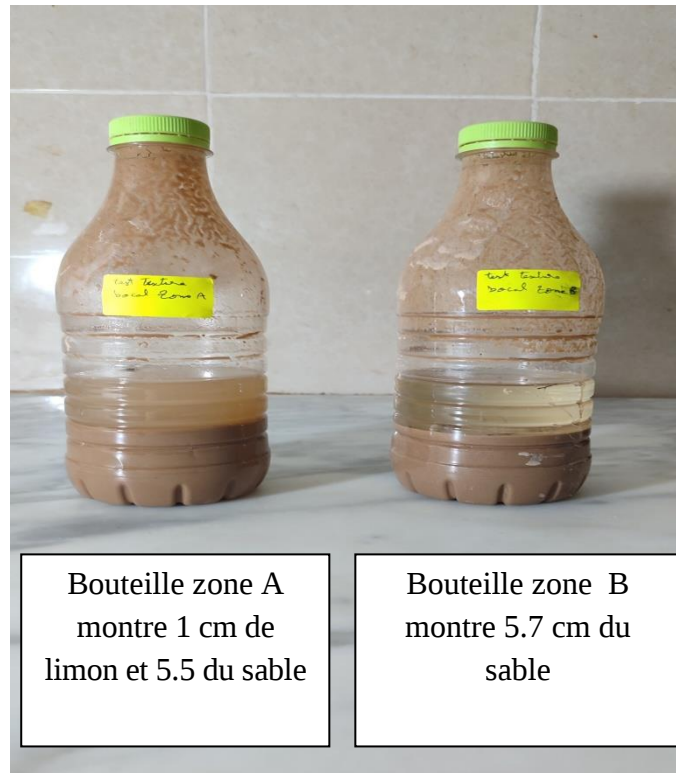
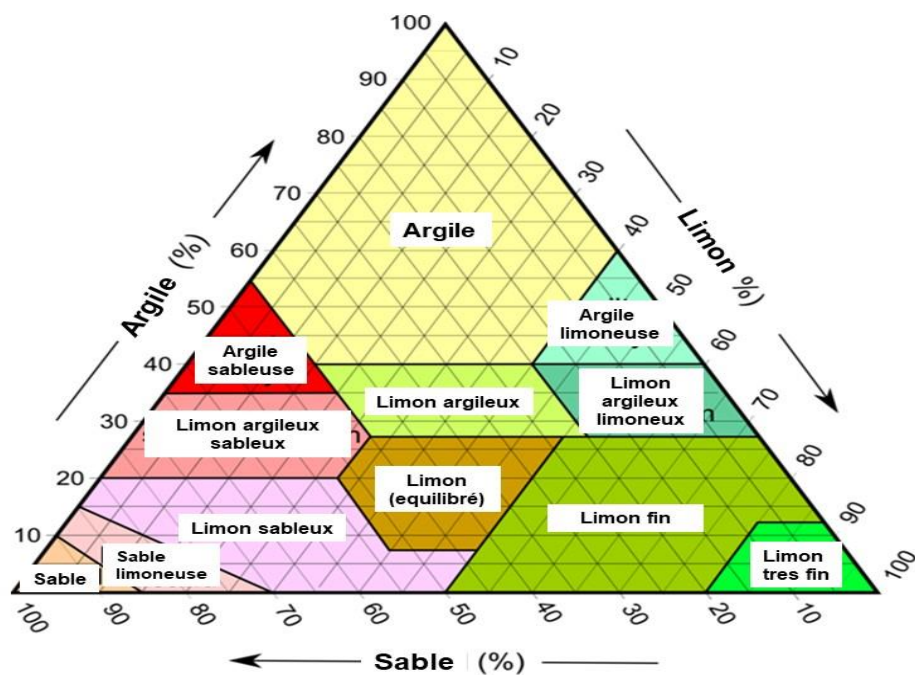


Photo des échantillons du sol pour déterminer les textures des sols dans les zones A et B



Annexe 3 :

3- Le compost :

Photo de compostage à la maison



Photo de compostage au jardin



Annexe 4 :

4- Les vers de terre :

Photo des vers de terre (Lomrics terrestres et lomrics sup) de la zone A



Photo des vers de terre (Lomrics terrestres et lomrics sup) de la zone B



Annexe 5 :

5- Procédure d'extraction des solutions du sol pour faire les analyses

(<https://www.agroressources.com/preparer-la-solution-du-sol/>)



Matériels d'extraction des solutions des sols

(Tamiseur, peseur, l'eau distillée, mélangeur, batteur de cuisine et filtre 10 microns)

1	2	3	4	5	6
					
Tamissage du sol	Préparation 200 g du sol tamisé	Mélange 50g du sol plus 250 ml d'eau distillée	Agitation par agitateur	Agitation par batteur 50g du sol plus 250 ml d'eau	Filtration du mélange par filtre 10 microns

Les étapes d'extraction d'une solution du sol

Annexe 6 :

Les échantillons des solutions des sols d'étude

