

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mouloud MAMMERY de Tizi-Ouzou

Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques

Département d'Agronomie

MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Sciences Agronomiques

Option Sciences du Sol

Thème

*Contribution à la connaissance de certaines propriétés
des sols agricoles irrigués avec les eaux usées, cas
d'une parcelle de vigne de Boumerdes .*

Présenté par

ALLEM Lynda & AMRIOUI Fatma

Devant le jury composé de

Mr MERROUKI K. MCB - UMMTO

Président

Mr CHERFOUH R. MCB - UMMTO

Promoteur

Mr LARBI M.Y. MAAA - UMMTO

Examineur

Date de soutenance : 29/09/2022 Année Universitaire 2021-2022

Dédicace :



Je dédie ce modeste travail accompagné d'un profond amour :

À mes parents ma mère "Nadia" et mon père "MOUHAMED" qui ont toujours cru en moi et qui étaient présents quand j'en avais besoin, leurs encouragements, leurs patience, et leurs sacrifices juste pour que je consacre tout mon temps rien que pour mes études, que dieu les protèges et ma tante FATIMA et la femme de oncle SAMIRA pour leurs sacrifices qui m'ont tout donné et offert, leur amour, soutien, aide, durant toutes mes études.

À mes chers frères: SAID, RAYANE, ANIS 'que dieu les gardent.

Et ma binôme FATMA et toute sa famille.

A mes chères amies sans exception pour leur aide et encouragement :

Lynda et Ryma.

Nous sommes reconnaissantes à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

Lynda

Dédicace :



Je dédie ce modeste travail accompagné d'un profond amour :

À mes parents ma mère 'Djamila' et mon père 'IddYir' qui ont toujours cru en moi et qui étaient présents quand j'en avais besoin, leurs encouragements, leur patience, et leurs sacrifices juste pour que je consacre tout mon temps rien que pour mes études, que Dieu les protège

À mes chers frères Ali ;Massinissa ;Yani ;Tinhinane ;Sarah.

Et ma binôme LYNDA et toute sa famille.

A mes chères amies sans exception pour leur aide et encouragement : Fazia ; Wiza ; Fella ;Sylia.

Nous sommes reconnaissantes à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

FATMA

Remerciements :



Nous remercions Dieu le tout puissant, pour nous avoir donné la force, la santé, la patience, le courage et la chance d'étudier et de suivre le chemin de la science et de la connaissance.

Nous tenons à remercier Mr CHERFOUH R., notre promoteur, d'avoir accepté de diriger ce mémoire. Pour ces conseils, ces encouragements et pour la confiance qu'il nous a témoigné aux cours de réalisation de ce travail.

Nous tenons également à exprimer nos sincères remerciements à Mr MERROUKI K d'avoir accepté d'examiner et de juger ce travail.

Nous tenons également à exprimer nos sincères remerciements à Mr LARBI M.Y d'avoir accepté d'examiner et de juger ce travail.

Résumé

Ce travail de recherche qui a porté sur une parcelle de vigne à Corso, wilaya de Boumerdes a pour objectif de mettre en évidence les incidences à long termes sur les propriétés des sols de l'application des eaux usées épurées urbaines. L'analyse a porté sur les paramètres agronomiques pertinents : le pH, la conductivité électrique (CE), la teneur en matières organique (MO %) mesurés sur 27 échantillons de sol pris sur trois profondeurs (0-10cm ; 10-20cm et 20-40cm).

Les résultats des analyses chimiques qualifiants le pH du sol de légèrement acide à neutre. Les apports de sels solubles induits par les eaux usées épurées ne constituent pas une contrainte limitant à la nutrition minérale et au développement normal de la vigne. Les teneurs en matières organiques déterminées montrent que les apports constituent une source de carbone organique pour les sols. La distribution des paramètres sur les plans horizontaux et verticaux présente une variabilité significative induite par la variabilité de l'irrigation et leur évolution dans le sol.

Mots clé : sol, eaux usées épurées, propriétés des sols.

Abstract

This research work, which focused on a plot of vines in Corso, wilaya of Boumerdes, aims to highlight the long-term effects on the properties of the soils of the application of urban treated wastewater. The analysis focused on the relevant agronomic parameters: pH, electrical conductivity (EC), organic matter content (OM%) measured on 27 soil samples taken at three depths (0-10cm; 10-20cm and 20 -40cm).

The results of chemical analyzes classify the pH of the soil as slightly acidic to neutral. The addition of soluble salts induced by treated wastewater does not constitute a constraint limiting mineral nutrition and the normal development of the vine. The organic matter contents determined show that the inputs constitute a source of organic carbon for the soil. The distribution of the parameters on the horizontal and vertical planes presents a significant variability induced by the variability of the irrigation and their evolution in the soil.

Keywords: soil, treated wastewater, soil properties.

Liste des Abréviations :

- CE** Conductivité électrique.
- DBO** Demande biochimique en oxygène.
- DCO** Demande chimique en Oxygène.
- PH** Potentiel Hydrogène.
- N** Azote total du sol.
- P** Phosphore.
- P%** Porosité.
- T** Température
- MMS** Matières Minérales Sèches
- MO** Matière Organique.
- MES** Matières En Suspensions.
- DBO5** Demande Biochimique en Oxygène.
- DCO** Demande Chimique en Oxygène
- CEC** Capacité d'échange cationique
- EU** Eaux usées.
- EUE** Eaux usées épurées.
- NO2-** Nitrite.
- NO3-** Nitrate.
- OMS** L'Organisation Mondiale de la Santé.
- ONA** L'Office National de l'Assainissement.
- STEP** Station d'Épuration des Eaux Usées.
- µg/l** Microgramme par litre.
- µs/cm** Microseconde par centimètre.
- ms/cm** Millisiemens par centimètre.
- meq/L** Milliéquivalent par litre.
-

Liste des figures :

Figure I.1.Le sol	4
Figure I. 2. Partage des composants principaux dans un sol cultivé (en volume)	5
Figure I.3. Constituants d'un sol humide non saturé.	6
Figure I. 4.Triangle des textures selon l'USDA (USDA, 1954).	10
Figure I. 5.Schéma de formation des humus naturels (DUCHAUFOR, 1980).	14
Figure I. 6. Les boues des eaux usées	21
Figure I.7. Principe de fonctionnement des boues activées.	23
Figure I.8. Les eaux usées	24
Figure I. 9. Bactérie vues au microscope électronique	27
Figure I.10.Virus vus au microscope électronique	28
Figure I.11. Protozoaire vu au microscope électronique	30
Figure I.12.Helminthe vu au microscope électronique	31
Figure II.1. Parcelle de vigne échantillonnée (originelle, 2022)	43
Figure II.2. (a) (b) (c) (d) : Prélèvement du sol (originelle, 2022).	44
Figure II.3. Prétraitement des échantillons du sol au laboratoire (originelle, 2022)	45
Figure II.4. Illustration de la position géographique de la station d'épuration de Boumerdes (Google Maps, 2021).	46
Figure II.5. Le pH-mètre (originelle, 2022)	47
Figure II.6. Illustration de la mesure du ph de la solution du sol.	48
Figure II.7. Illustration de la mesure de la conductivité électrique de la solution du sol.	49
Figure II.8. Illustration de la mesure de la matière organique : (a) creusets à l'intérieur de l'étuve et (b) à l'intérieur du Four.	50
Figure III.1. pH-eau dans le sol des sous parcelle en fonction de la profondeur.	54
Figure III.3. CE du le sol des sous parcelles en fonction de la profondeur.	56
Figure III.3 .évolution de la teneur en % matière organique des trois sous parcelles.	58
Figure III .4. Corrélations entre les paramètres analytiques : pH-eau et MO du sol	59
Figure III.5 Corrélations entre les paramètres analytiques : CE et MO du sol	60
Figure III.6. Corrélations entre les paramètres analytiques : pH-eau et CE du sol.	61

Liste des tableaux :

Tableau. I. 1. La classe granulométrique du sol en fonction des diamètres des particules.	9
Tableau I. 2. La capacité totale d'échange dépend de la nature des colloïdes argilo-humiques.	12
Tableau I.3. La faune du sol : ordre de grandeur par famille (CHAUSSOD, 1996 et GIRAD et al, 2005 in (CALVET, 2013).	19
Tableau I. 4. La flore du sol (ordre de grandeur par famille).	20
Tableau I. 5. Principales bactéries pathogènes présentes dans les eaux usées	27
Tableau I.6.Principaux virus présents dans les eaux usées	29
Tableau I.7.Principaux protozoaires présents dans les eaux usées	30
Tableau I.8.Principaux helminthes présents dans les eaux usées	31
Tableau I.9. Les plus dangereux métaux lourds	33
Tableau I.10. L'apport à l'hectare de terre agricole	34
Tableau III.1 : pH-eau moyenne des échantillons de sol des sous-parcelles (SP) en fonction de profondeur.	53
Tableau III.2. Conductivité électrique du sol des sous-parcelles en fonction de profondeur.	55
Tableau III.3 : Teneur en matière organique de sous-parcelle F en fonction de profondeur.	57

Tables des matières :

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	1
Généralités sur les sols	3
I.1.Introduction	3
I.1.1. I.1.1. Définition.....	4
I.1.2. Les constituants du sol	5
I.1.2.1. La phase solide du sol	6
I.1.2.2. La phase liquide du sol	7
I.1.2.3. La phase gazeuse du sol	7
I.1.3. Types de sols.....	7
I.1.4. Propriétés du sol.....	8
I.1.4.1. Propriétés physique	8
I.1.4.2. Propriétés chimiques	12
I.1.5. Matières organiques	13.
I.1.5.1. Composition de la matière organique du sol	15
I.1.5.2. Importance de la matière organique du sol	15
I.1.5.3. Les effets de la matière organique sur les propriétés du sol	16
I.1.5.4. Matière organique et activité biologique du sol	17
I.1.5.5. Les organismes vivants du sol	17
I.1.5.6. Diversité des êtres vivants	18
A. la faune de sol	18
B. La flore du sol.....	20
I.2.les boues résiduaires des stations d'épuration.....	21
I.2.1. Origine et formation des boues	22
I.2.2. Les différents types de boues	22
I.2.3 Risques environnementaux liées aux boues.....	23
I.3.Généralité sur les eaux usées	24

I.3.1. Définition des eaux usées	24
I.3.2.Origines et compositions des eaux usées	25
I.3.2.1. Les eaux usées domestique	25
I.3.2.2. Les eaux usées industriels	25
I.3.2.3. Les eaux usées ruissellement	26
I.3.2.4. Les eaux usées agricoles	26
I.3.3. Composition des eaux usées	27
I.3.3. 1. Microorganismes	27
I.3.3.2 Les matières en suspension (MES	32
I.3.3.3 Les éléments traces, minéraux ou organiques	32
I.3.3.4 Les substances nutritives	33
I.3.4 Caractéristique des eaux usées	34
I.3.4.1 Les Paramètres physicochimiques	34
I.3.4.2. Les paramètres bactériologiques	38
I.3.4.3. Paramètres Organoleptiques.....	38
I.5. Les effets des eaux usées	39
I.3.5.1 Sur les propriétés physicochimiques du sol	39
I.3.5.2 Sur le sol	39
I.3.5.3 sur les plantes cultivées.....	40
I.3.5.4 Sur la fertilité du sol	40
I.3.5.5 sur l’agriculture	40
I.3.5.6 sur environnement	40
Conclusion Générale	62

Introduction Générale :

Le sol joue un rôle essentiel dans la fonction de l'écosystème terrestre. C'est une ressource importante qu'il convient de protéger tenant compte de l'accélération de sa dégradation liée, souvent à l'activité humaine.

Le sol est une entité naturelle aux formes multiples, c'est un écosystème dynamique et complexe où se rencontrent plusieurs disciplines scientifiques. C'est le lieu de rencontre du minéral (roches, cailloux, graviers, sables et argiles), de l'organique (la flore et la faune), de liquide (eaux) et de gaz (l'air).

Dans un contexte de changement globaux, de réchauffements climatiques et de crise de l'eau le maintien de la performance productive des parcelles agricoles nécessite des apports en eaux et éléments nutritifs pour la satisfaction des besoins hydriques des cultures. L'utilisation des eaux usées représente une opportunité viable pour la préservation des ressources hydriques superficielles et profondes et une valorisation des éléments minéraux contenus dans ces eaux (PEREIRA ET AL., 2002 ; KABATA-PENDIAS et Pendias 2001).

Cette modalité de gestion des eaux résiduaires domestique est adoptée par plusieurs pays méditerranéens (HAMDY ET LACIRIGNOLA 2005). Cependant la littérature scientifique montre que des effets sur les propriétés des sols et des cultures peuvent survenir à long termes (CHERFOUH ET AL., 2018 ; BELAID ET AL., 2012).

Les eaux usées sont les eaux rejetées par les collectivités et les industries et qui sont acheminées par les égouts en station d'épuration afin d'être traitées. Ces eaux sont fortement chargées en polluants et en contaminants divers, ce qui pose le problème des risques sanitaires direct de par la présence d'organismes pathogènes, comme des bactéries, des virus et de parasites. on compte comme dangers sanitaire indirects pour l'homme, la consommation de poissons ou de mollusques rendus toxique par la présence de bactéries, de métaux ou de composées organique que l'on retrouve dans les eaux usées (WALDICHUK ,1989).

L'altération des propriétés des sols risque aussi à long termes une remise en caus des fonctions écologiques des sols à savoir la production de biomasse par l'agriculture et la sylviculture, la protection de l'environnement, la fonction d'épuration, la préservation de la chaîne alimentaire, et la qualité de vie de plusieurs êtres vivants et des sociétés humaines.

L'agriculture constitue le plus gros consommateur des ressources hydriques, vu la diminution des apports pluviométriques constatée depuis plusieurs décennies. Les agriculteurs s'intéressent à l'utilisation des eaux usées (HANNACHI ET AL ., 2014).

La dégradation des sols en Méditerranée est un phénomène ancien qui s'est aggravé dans les dernières décennies, sous l'effet de facteurs naturels (précipitations, vent, ruissellement ...) et d'actions anthropiques (surpâturage, surexploitation des ressources forestières, irrigation mal conduite, urbanisation...). 60% des zones rurales méditerranéennes encourent un risque modéré ou important de dégradation de sol, particulièrement en Algérie, Albanie, Espagne, Grèce, Portugal et Tunisie (FAO, 2000).

En Algérie, le volume d'eaux usées est estimé actuellement à près de 800 millions de m³ et dépassera 1.5 milliards de m³ à l'horizon 2030 (MRE, 2014). Les proportions valorisées en agriculture sont évaluées à 25 % pour les boues et 10 % pour les eaux usées épurées (LADJAL ET ABBOU, 2016).

Atténuer la dégradation des sols et des eaux constitue un défi planétaire. Pour atteindre cet objectif, il est plus que jamais impératif de revoir les modes d'utilisation des terres et assurer un développement durable des territoires.

A Boumerdes, durant une dizaine d'années (de 2002 à 2012) des agriculteurs réutilisaient des eaux usées épurées et des boues résiduaires urbaines sur leurs parcelles. Notre travail, se donne pour objectifs de déterminer certaines caractéristiques chimiques (pH, CE et MO) de sol sous vigne.

Dans le cadre de notre mémoire d'étude, notre travail se donne pour objectif d'évaluer les effets de l'utilisation des eaux usées épurées issues de Step de la ville de Boumerdes sur certaines propriétés chimiques du sol. Nous avons choisi à cet effet de travailler sur une parcelle située dans la commune de Corso willaya de Boumerdes. L'activité agricole dans cette zone est dominée par la viticulture. La détermination des paramètres chimiques des sols et leur comparaison aux normes sont susceptibles d'offrir des indications intéressante les risques potentiels d'altération de la qualité des sols. Les résultats attendus peuvent constitués des indicateurs d'alerte et un outil de prise de décision des pouvoirs publics, comme ils peuvent aussi ouvrir des voies et des axes de recherches afin de connaître les limites de cette modalité de valorisation agricole des eaux usées.

Le présent manuscrit est structuré en trois chapitres.

Le chapitre I, comporte une présentation et une synthèse bibliographique, développée sur les acquis scientifique relatifs au sol et aux eaux usées.

Le chapitre II, revient sur le protocole expérimental et la détermination des paramètres pédologiques.

Le chapitre III, intègre les résultats obtenus et une discussion basée sur une analyse descriptive des paramètres du sol.

Enfin une conclusion générale illustre les résultats expérimentaux essentiels et préconise des perspectives de recherche en vue d'améliorer nos connaissances sur les incidences de la l'utilisation des eaux usées épurées.

I. Généralités sur les sols

I.1. Introduction

La pédologie est la science qui étudie les caractères, l'évolution et la répartition des sols. Pour les pédologues, le sol est un corps organisé qui est à la fois le résultat et le siège des processus complexes. C'est une formation naturelle, qui abrite une multitude de microorganismes. Sol comme étant la formation naturelle de surface, à structure meuble et d'épaisseur variable, résultant de la transformation de la roche mère sous-jacente sous l'influence de divers processus, physiques, chimiques et biologiques, au contact de l'atmosphère et des êtres vivants (DEMOLON, 1960). Le sol est également le support des activités humaines. C'est le lieu de production agricole et forestière, l'endroit de stockage de matière primaire et de déchets (ROBERT, 1996 ; GOBAT ET AL. 1998) ce qui en fait le lieu de passage et de séjour privilégié des grands types de polluants (ROBERT, 1996) et le grand particulièrement sensible. Le sol étant un milieu poreux, perméable et le siège de phénomènes de transports (BRUCKLER, 1998), cette pollution peut gagner par des phénomènes d'absorption, de lessivage, etc. D'autres animaux (RIVIERE, 1998).

Le sol est non seulement un réservoir d'activité, mais également un réservoir d'espèces (JOCTEUR MONOZIER, 2001) C'est un milieu complexe, organisé et hétérogène, ce qui implique la coexistence de niches écologiques avec des caractéristiques différentes, physique et physico-chimiques (Robert, 1996). De nombreuses espèces animales, de différents taxons : Protozoaires, nématodes, lombricidés, enchytréides, gastéropodes, isopodes, myriapodes. Par ordre croissant de taille, on distingue la microfaune (4-200 μm), le méso-faune (0-2,4mm), macrofaune (4-80mm) et parfois même la mégafaune (GOBAT ET AL. 1998). La macrofaune, composée entre autres des vers de terre et des termites, constituent la plus grosse biomasse animale sur les continents Les individus appartenant à cette catégorie sont également considérés comme les ingénieurs des écosystèmes (LAVELLE ET SPAIN, 2001) Ils ont, en effet, un rôle mécanique important sur la fragmentation de la matière organique et sur le brassage des sols.

I.1.1. Définition

Le sol est la couche la plus externe, marquée par les êtres vivants, de la croûte terrestre. Il est le siège d'un échange intense de matière et d'énergie entre l'air, l'eau et les roches, et un compartiment majeur de l'écosystème terrestre à l'interface de l'atmosphère, de l'hydrosphère, de la lithosphère et de la biosphère. Donc, le sol occupe une position-clef dans les cycles globaux des matières (GOBAT, 2003 ; BOURRIER ET BERTHELIN, 1998 ; ROBER, 1996). Il est constitué de particules minérales et de particules organiques (**figure I.1**). Il contient également de l'eau et de l'air. Les particules minérales sont le résultat de l'altération des roches en surface sous l'action de facteurs climatiques (précipitations, température...) et des facteurs biologiques (racines de végétaux). Les particules organiques sont le résultat du travail incessant de microorganismes, d'invertébrés et de bactéries qui peuplent le sol et qui décomposent la matière organique morte (litière). Il peut être défini comme le produit de l'altération, du branchement et de l'organisation des couches supérieures de la croûte terrestre sous l'action de la vie, de l'atmosphère et de ses échanges énergétiques qui s'y manifestent (AUBERT ET BOULAIN, 1980, IN LOZET ET MATHIEU, 2002).



Figure I.1. Le sol.

Le sol est également le support des activités humaines. C'est le lieu de production agricole et forestière, l'endroit de stockage de matière primaire et de déchets (ROBERT, 1996 ;

GOBAT ET AL. 1998) ce qui en fait le lieu de passage et de séjour privilégié des grands types de polluants (ROBERT, 1996) et le grand particulièrement sensible. Le sol étant un milieu poreux, perméable et le siège de phénomènes de transports (BRUCKLER, 1998).

Selon MAGNET ET AL, (2013) le sol détermine un excellent support culturel pour la croissance de nombreux types d'organismes dont les bactéries, les algues, les protozoaires, les virus et les champignons.

Ces derniers sont l'un des groupes dominant présent dans le sol, qui représente le principal réservoir de champignons (ALI-SHTAYEH ET JAMOUS ,200 ; RANE ET GANDHE ,2006).

I.1.2. Les constituants du sol :

Le sol comprend des constituants solides (minéraux et organiques), des liquides et des gaz, les espaces vides peuvent représenter 50% du volume total (**figure I.2**). Ils sont occupés par de l'eau et de l'air. L'air pénètre dans le sol et l'eau s'y infiltre.

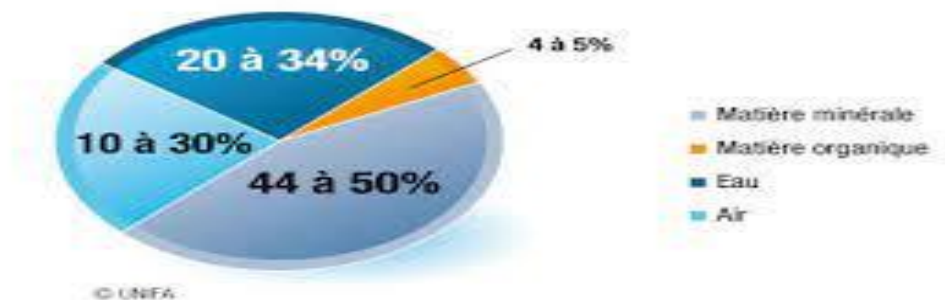


Figure I. 2. Partage des composants principaux dans un sol cultivé (en volume)

Solen(SCHLOSSER1988) un sol est un mélange d'éléments solides constituant le squelette solide, d'eau pouvant circuler ou non entre les particules et d'air ou de gaz.

- ❖ Il est donc, en général, constitué de trois phases

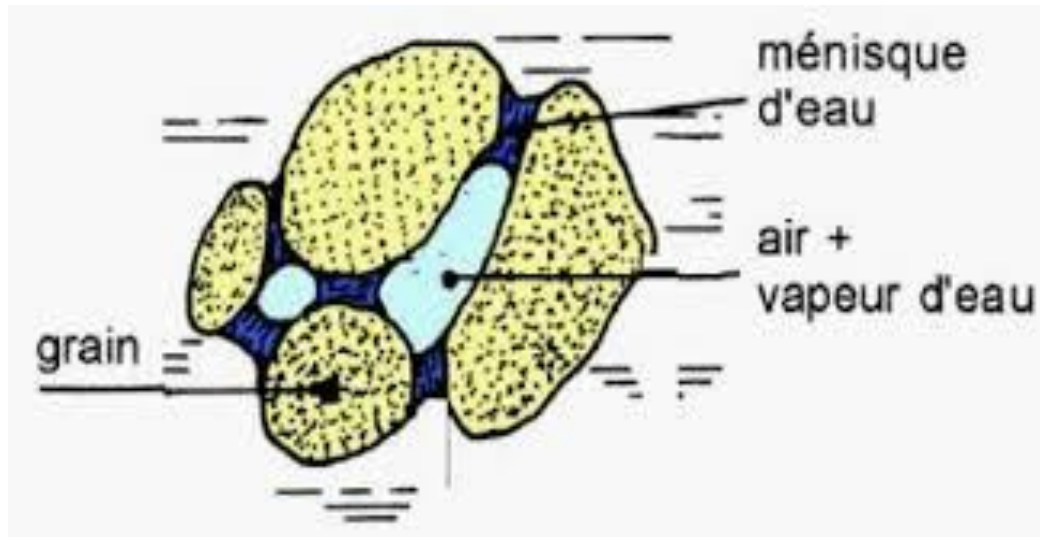


Figure I.3. Constituants d'un sol humide non saturé.

- ✓ Une phase solide dont les grains solides, dans leur arrangement naturel constituent le squelette,
- ✓ Une phase liquide (eau),
- ✓ Une phase gazeuse (en général de l'air).

I.1.2.1. La phase solide du sol :

La phase solide est la phase prépondérante du sol et représente 50 à 70% du volume. Elle est constituée d'un ensemble de particules solides élémentaires (minéraux primaires et secondaires) et de matière organique. Selon MOREL, (1996) et MERMOUD, (2006) la phase solide est la phase contenant des minéraux de formes et de composition différentes (tel que gravier, sable, limons et argiles) et des éléments organiques formés à partir de résidus organiques, d'origine végétale ou animale, On pourrait considérer les organismes vivants du sol comme une partie de la phase solide, puisqu'ils ne sont ni gazeux ni liquides (CALVET, 2003). On distingue deux fractions dans le sol :

a. Fraction minérale :

Les minéraux constituent, en général, de 95 à 99% du sol. Les constituants de la fraction minérale du sol sont issus de la dégradation physique (altération mécanique) et chimique de la roche mère. Les minéraux du sol peuvent être séparés par une analyse granulométrique recelant une fraction entre 2mm et 50 μ m (sable), une fraction entre 50 et 2 μ m (limons) et la fraction inférieure à 2 μ m (argiles). Les deux premières catégories sont relativement inertes

contrairement aux argiles qui possèdent des surfaces spécifiques énormes (KSIEZOPOLSKA, 2002).

b. Fraction organique :

La fraction organique du sol est constituée à plus de 80% de matière organique morte (PAUL E ET AL. 1996). La fraction organique du sol comprend tous les composés organiques simples ou complexes, isolés ou bien associés entre eux dans des ensembles vivants ou non vivants. D'après STEVENSON (1994), ils peuvent être classifiés en quatre catégories : les organismes vivants constituant la biomasse ; les organismes morts en voie de dégradation ; les composés organiques des chaînes réactionnelles de la minéralisation et les substances humiques.

I.1.2.2. La phase liquide du sol :

La phase liquide du sol, souvent désignée par le terme « solution du sol », occupe une partie plus au moins importante de la porosité du sol. Elle est constituée d'eau où se trouvent diverses substances et minérales dissoutes et des particules en suspension (QUENEA, 2004). Cette solution remplit partiellement ou totalement les pores du sol (MOREL, 1996).

I.1.2.3. La phase gazeuse du sol :

La phase gazeuse du sol est constituée par les mêmes éléments que l'air atmosphérique (O₂, CO₂, N₂..), mais à cause de l'activité biologique, les teneurs de chaque composant peuvent changer considérablement. Sa composition dépend elle-même de la profondeur et du temps de renouvellement de l'air à l'intérieur du sol (QUENEA, 2004). La composition de cette phase gazeuse du sol peut contrôler fortement la distribution et l'activité des communautés bactériennes des sols. Une étude comparative entre la composition de l'air du sol et de l'air atmosphérique réalisée par MERMOUD, (2006). a montré que dans l'air du sol, la concentration en co₂ est plus élevée et la teneur en O₂ est plus réduite que dans l'air atmosphérique .Cette différence est expliquée par le phénomène de respiration des racines et des microorganismes vivants du sol et la dégradation de la matière organique dans le sol.

I.1.3. Types de sols :

On identifie habituellement les différents types de sols selon la dimension de leurs particules. C'est une méthode assez rapide qui fournit des renseignements élémentaires sur les

propriétés hydrauliques et mécaniques des sols. En mécanique des sols, la classification la plus simple consiste à regrouper les sols en deux grandes classes :

Les **sols à gros grains** comprennent les sols dont les particules sont visibles à l'œil nu. La valeur de leur diamètre équivalent est normalement supérieure à 0.08 mm, puisqu'en deçà de cette limite l'œil humain est pratiquement incapable de discerner les formes, et elle peut atteindre quelques mètres dans le cas des grosses roches.

Les **sols à grains fins** regroupent évidemment tous les sols dont les particules sont invisibles à l'œil nu. Le diamètre équivalent de ces particules peut varier d'environ 1 nm (10⁻⁶) à 0.08mm. (ROBITAILLE ET TREMBLAY, 1997).

I.1.4. Propriétés du sol

I.1.4.1. Propriétés physique :

La physique du sol est exprimée comme une science naturelle appliquée, dans laquelle le sol est considéré comme un milieu multiphasique, et sa composition change avec l'espace et le temps (MUSY ET SOUTTER 1991). En fournissant une description de son processus, la physique du sol constitue un outil indispensable à la bonne gestion des sols, leurs protections et conservation mais elle contribue également à l'amélioration de la production végétale (MUSY ET SOUTTER, 1991).

Les propriétés physiques les plus importantes du sol sont sa texture et sa structure, ces deux derniers déterminent la porosité du sol, permettant à l'eau et à l'air de s'écouler à travers les macropores (LANZ, 2004). Favorisant également l'exploration racinaire (SEGUIN, 1986 ; VAN LEEUWEN ET AL., 2004).

a. Texture :

La texture du sol se définit par ses proportions relatives en argile, limon, sable fin, sable grossier. Ces particules plus ou moins fines interviennent sur les propriétés physiques du sol. La composition minéralogique des particules est d'ailleurs en relation avec leur taille (Les grossières sont surtout à base de quartz, les fines à base de phyllosilicates).

La texture d'un sol est l'ensemble des propriétés qui découlent de la composition granulométrique du sol (teneur en pourcentage de sables grossiers et fins, de limons, d'argile, d'humus et de calcaire), elle est déterminée par l'analyse granulométrique (HALITIM, 1988).

D'après (HELLER ET AL, 1993 ; DELAUNOIS ET AL, 2009), la texture est le diamètre moyen des particules du sol, ou la composition granulométrique.

De même HALITIM (1988), expliqua qu'on peut aussi définir le texteur comme un facteur déterminant de la fertilité des sols puisqu'elle influence les propriétés physiques (économie en eau et en air, structure, perméabilité, résistance à l'érosion ect ...) et chimiques (capacité des échanges) des sols.

❖ **Echelle granulométrique de la texture du sol :**

D'après BAIZE (2000), on peut résumer les classes granulométriques du sol en fonction des diamètres des particules en argile, limon fin, limon grossier, sable fin et sable grossier pour la terre fine et graviers et cailloux pour la terre grossière dite aussi refus ou éléments grossier (tableau I.1).

Tableau. I. 1. La classe granulométrique du sol en fonction des diamètres des particules.

Classes	Terre fine					Terre grossière	
	Fraction argileuse	Fraction limoneuse		Fraction sableuse		graviers	cailloux
	Argiles	Limons Fins	Limons grossiers	Sables Fins	Sables grossier		
Diamètre des particules	<2 µm	2 – 20 mm	20-50 µm	50-200 mm	200 µm -2mm	2-20 mm	>20mm

Source: BAIZE, (2000)

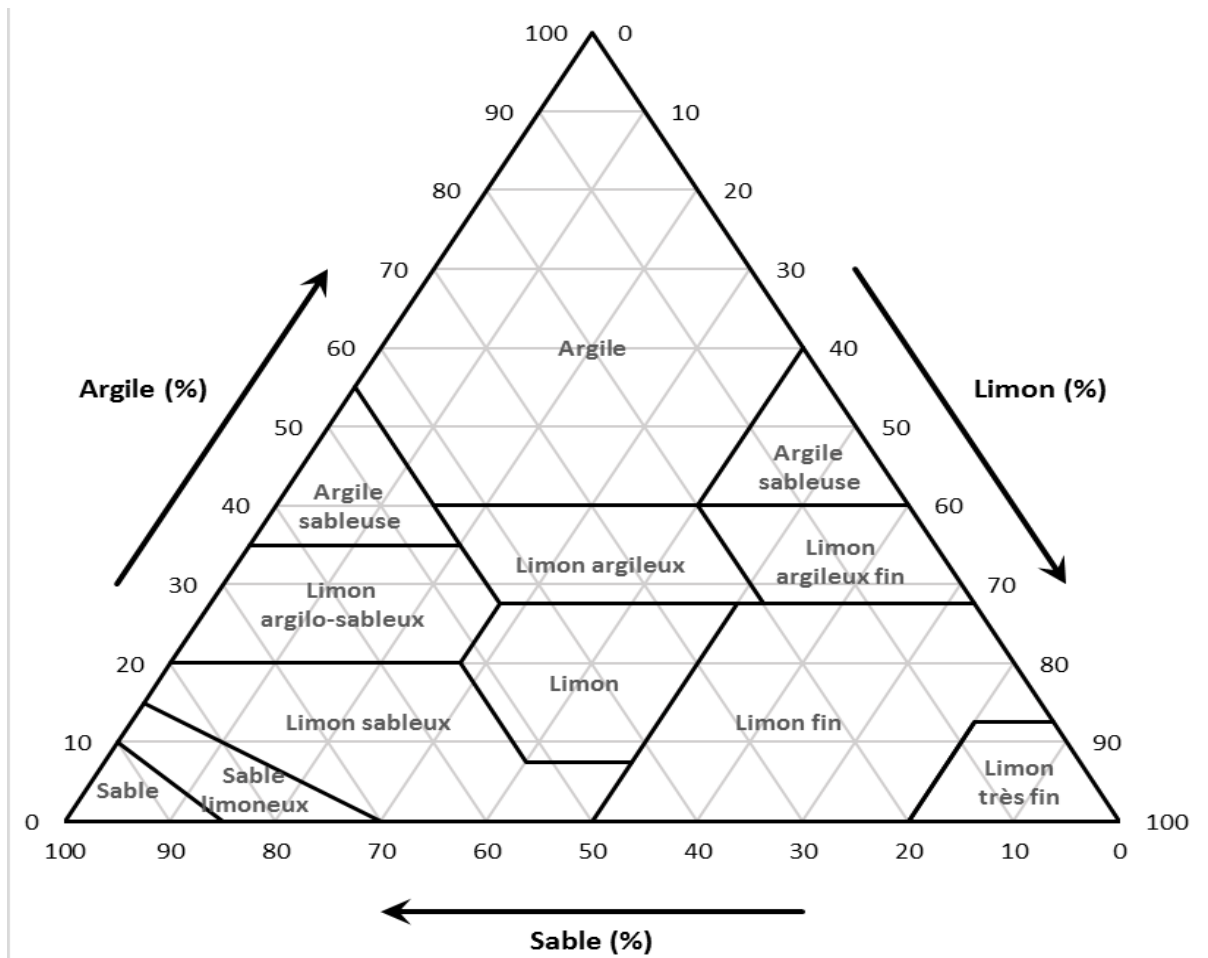


Figure I. 4. Triangle des textures selon l’USDA (USDA, 1954).

b. Structure :

La structure d'un sol désigne le mode d'assemblage, à un moment donné (PASQUIER, 2010), des constituants d'un sol. La structure, contrairement à la texture qui ne change pas, est un état qui évolue dans le temps.

La structure s’observe et se décrit à deux niveaux à l’échelle macroscopique observable à l’œil nu et à l’échelle microscopique (microstructure ou micromorphologie). La structure du sol fait référence à la taille, la forme et la disposition des constituants solides (minéraux et organiques) et des constituants gazeux (vides), à la continuité des pores « dont certains sont occupés par de l’eau, d’autres, les plus grossiers, par de l’air. Il est donc clair que la structure du sol peut se décrire à plusieurs échelles (particules minérales, agrégats, parcelle) (DUCHAUFOR, 2001). La structure détermine de manière considérable le fonctionnement du sol. Elle agit, d’une part, sur la pénétration des racines dans le sol et, d’autre part, sur la circulation des éléments nutritifs (CALLOT ET AL. 1982 ; LAVELLE AND SPAIN 2001). Elle influence également la distribution des microorganismes du sol.

Selon (HELLER ET AL, 1993 ; CALVET, 2003), la structure est l'agencement des constituants du sol.

C. Porosité :

La porosité désigne la fraction du volume total du sol occupé par des vides (eau +air) dans le sol tels que : la circulation de l'eau et de l'air, le transport de solutés et la croissance et le développement des racines. Elle se caractérise par la distribution de la taille des pores suivant leur forme et leur connectivité. La porosité est exprimée par le rapport entre le volume des vides et le volume total du sol.

La porosité du sol se définit comme étant l'ensemble des espaces lacunaires créés lors de la structuration du sol (STENGEL, 1990 ; MUSY ET SOUTTER, 1991).

Ces espaces vont influencer la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol et la capacité de ce dernier à la stocker. La porosité agit aussi sur le développement des racines des plantes ainsi que sur la circulation des organismes du sol (LAMANDE, 2003). Selon CHOSSAT, (2005), la porosité est la conséquence du mode d'assemblage des constituants du sol, c'est une de ses caractéristiques essentielles. Cette porosité est constituée par tous les vides qui sont laissés entre les particules élémentaire, ainsi que par des vides qui se créent entre les agrégats et ceux qui proviennent d'activités biologiques. RAMADE (2003), expliqua que la porosité peut se définir comme la proportion du volume des lacunes par rapport au volume totale.

d. Perméabilité :

La perméabilité d'un sol est définie par la vitesse d'infiltration de l'eau de gravité en cm par seconde (ou par heure, si la vitesse est lente). L'infiltration est le nom donné au processus d'entrée de l'eau dans le sol à travers la surface du sol et verticalement vers le bas, ce processus est d'une grande importance dans la pratique car son régime détermine souvent le ruissellement qui se forme à la surface du sol pendant les orages (HILLEL, 1984).

La vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol est profondément affectée par l'état structural de la surface et l'état structural de la couche du sol intéressé par l'infiltration. Par exemple lorsque les pluies sont intenses, elles modifient la surface du sol, du moins lorsque la structure est instable, et peut là aussi, se former une couche compacte limitant la pénétration de l'eau (HENIN ET AL., 1969).

I.1.4.2. Propriétés chimiques :

Le sol est une matrice réactive qui est composée d'éléments chargés, minéraux et organiques. Ces éléments interagissent entre eux et confèrent au sol des propriétés chimiques qui interviennent, entre autres, dans la nutrition des plantes.

a. La capacité d'échange cationique (CEC) :

La capacité d'échange cationique (CEC ou T pour capacité totale) d'un sol est la quantité de cations que celui-ci peut retenir sur son complexe adsorbant à un pH donné.

La CEC est une caractéristique très importante à déterminer dans toute étude des sols et en agronomie. Elle est en effet, reliée au comportement des cations et de ce fait est une indication intéressante pour l'étude des processus pédologiques qu'il s'agisse de pédogenèse ou de nutrition minérale des végétaux (CALVET, 2003).

Selon DUCHAUFOR, (1997), la capacité d'échange varie avec le pH ; lorsqu'un sol acide est progressivement neutralisé (par apport d'amendements calciques par exemple).

La CEC, qui est une expression des charges négatives par unité de masse d'un sol. C'est une des plus importantes caractéristiques du sol (BRADY ET AL, 2002 CITE PAR MONIGABA ET AL, 2009).

Les réactions d'échanges cationiques entre la solution du sol et le complexe adsorbant se réfèrent à deux importants paramètres chimiques des sols, à savoir la capacité d'échange Cationique (CEC) et les cations échangeables (MONIGABA ET AL, 2009).

La capacité totale d'échange d'un sol est stable, puisqu'elle dépend du taux et de la nature des colloïdes de ce sol, et que celui-ci ne peut beaucoup varier. Elle est élevée pour les sols argileux et humifère, et faible pour les sols sableux (**tableau I. 2**) (SOLTNER, 2000 ; GIASSON ET JAOUICH, 2008).

Tableau I. 2. La capacité totale d'échange dépend de la nature des colloïdes argilo-humiques.

Nature des colloïdes	T (milliéquivalents pour 100 g de terre)
Kaolinite	3 à 15
Illite	10 à 40
Montmorillonite	80 à 150
Composés humiques	300 à 500
Matière organique peu humifiée (tourbe, mor)	100

Source : SOLTNER (2000)

B. Potentiel d'hydrogène (pH) :

Le pH est défini comme le logarithme décimal de la concentration d'une solution en ion H⁺. Il permet d'approfondir les modalités d'interaction entre les ions et les surfaces absorbantes du sol.

Le pH exprime la réaction acide, neutre ou basique d'un corps selon qu'il renferme beaucoup ou peu d'ions H⁺ libres en solution. Au niveau du sol, le pH est variable et il influe sur les propriétés du sol. Ces variations sont cependant limitées car si, en chimie, le pH varie de 0 à 14 (7 étant la neutralité), le pH des sols a pour extrêmes 4,5 à 5 pour les sols plus acides et 8 pour les terres très basiques (PREVOST, 2006).

Selon (CHAUDE ET LECLE, 1999), le pH est fortement influencé par la roche mère et la composition de la litière joue aussi un rôle en particulier à travers son rapport C/N.

c. La conductivité électrique :

C'est l'indice de la teneur en sels solubles dans le sol. Elle exprime approximativement la concentration des solutions ionisables présentes dans l'échantillon c'est à dire son degré de salinité. Cette propriété électrochimique est basée sur le fait que la conductance d'une solution s'accroît au fur et à mesure que les concentrations en cations et anions porteurs de charges électriques augmentent (CLEMENT, 2003).

d. Le complexe argilo-humique

Le complexe argilo-humique (CAH), ou complexe adsorbant est le résultat de l'association de l'humus et des argiles. Ces deux substances s'associent par l'intermédiaire de ponts calcaïques, de ponts constitués d'hydroxydes de fer et d'aluminium et de ponts aluminium positionnés aux points de rupture des feuillets d'argile. Le CAH présente une charge globale négative qui lui permet de fixer des cations, et dans une moindre mesure des anions. Les ions sont retenus sous forme échangeable et sont en équilibre avec la solution du sol. Lorsque la concentration en ions est modifiée dans la solution du sol (prélèvement par les racines des plantes, par exemple), certains ions fixés sur le CAH passent en solution (Désorption) et sont remplacés par d'autres ions présents auparavant dans la solution du sol (adsorption) (GOBAT ET AL. 2010).

I.1.5. Matières organiques

Les matières organiques des sols rassemblent tout ce qui vit ou a été vivant dans les sols, c'est-à-dire des résidus végétaux et animaux à divers stades de décomposition, la faune et la flore du sol ainsi que les racines (GREGORICH ET AL. 2003).

La matière organique est une substance qui n'a pas de composition chimique bien définie, elle comprend en proportions variables selon les situations écologiques ; des matières humifères ou en voie d'humification à des stades divers d'évolution et des débris organiques pure ou non décomposés (HALITIM, 1988).

SOLTNER (1979) définit la matière organique comme étant l'ensemble de substances carbonées provenant des débris végétaux, des déjections et des cadavres animaux.

D'après CHAMAYOU ET LEGROS (1989) la matière organique correspond à un ensemble de substances organiques de nature et de propriétés variées. Sur ces deux définitions nous relèvent le terme organique, donc matière dégradable, qu'on peut considérer comme décomposés susceptible d'être incorporés au sol, en vue d'en conserver ou d'en améliorer la qualité.

Ainsi la matière organique est une source importante d'éléments nutritifs pour les plantes et les connaissances de sa teneur totale dans le sol renseignent sur sa potentialité fertilisante. La matière organique a également un rôle important dans la fabrication des agrégats, autrement dit sur l'élaboration de la structure de sol. L'absence de matière organique rend la structure du sol instable.

Les grandes classes de la matière organique peuvent être différenciées de la façon suivante (figure I. 5).

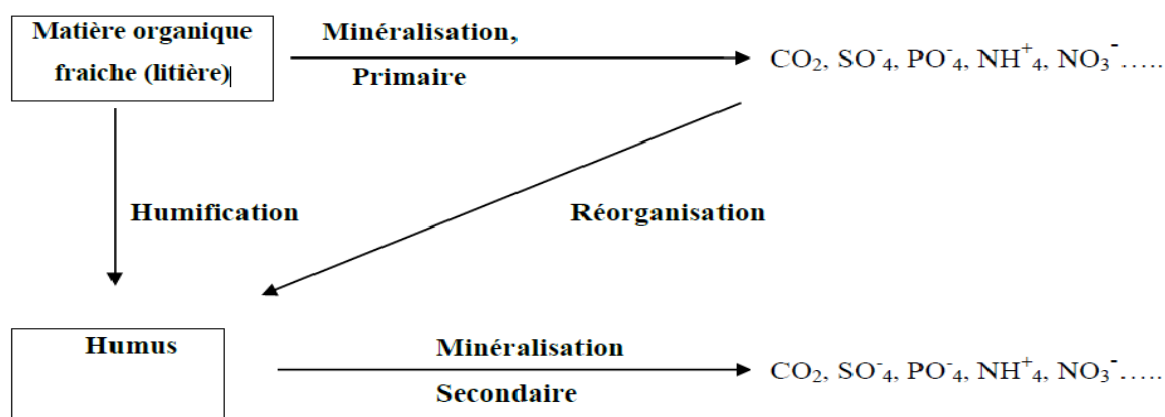


Figure I. 5. Schéma de formation des humus naturels (DUCHAUFOR, 1980).

I.1.5.1. Composition de la matière organique du sol :

a. Matière organique fraîche (la litière) :

Les MO fraîches regroupent la litière (débris végétaux à la surface du sol) mais aussi, les racines mortes, les exsudats racinaires, les déjections et les cadavres d'animaux. Les MO fraîches vont servir de support et d'aliments à la faune et à la biomasse microbienne. Les résidus végétaux constituent la première source de MO des sols.

Selon (GIRARD ET AL, 2005) Les litières au sol représentent de 5 à 15% de la masse de carbone organique du sol. Elle comprend les organismes et les parties d'entre eux qui viennent de mourir et qui en sont détaché, qu'ils soient végétaux, animaux ou microbiens, aériens ou souterrains, Ainsi que les excréments des animaux et différents composés émis directement dans le milieu (GOBAT ET AL, 2003).

b. Matière organique humifiée :

Selon (DUCHAUFOR, 1983). Les matières humiques peuvent être définies comme "des complexes colloïdaux relativement stables et résistants à l'action microbienne, qui se minéralisent à leur tour mais beaucoup plus progressivement que la matière organique fraîche".

I.1.5.2. Importance de la matière organique du sol :

La présence de matière organique dans les sols est à l'origine de l'apparition des propriétés physico-chimiques favorisant le développement des végétaux cultivés et naturel.

L'augmentation des ces teneurs s'accompagne d'une amélioration de la structure, de la facilité de l'infiltration de l'eau, de l'accroissement de la capacité de la rétention en eau, ainsi que du pouvoir de résistance à l'érosion (LEPRUN, 1988). La MO influence l'emmagasinement de l'eau par le sol, la résistance aux agents érosifs et par conséquent affecte la croissance et le développement des cultures (PICCOLO, 1996).

La qualité de la MO est susceptible à changer avec les différents systèmes de gestion des sols (GREGORICH ET CARTER, 1997 ; OADES, 1998 ; PICCOLO ET MBAYWU, 1999 ; BALESDENT ET AL. 1999). Ainsi, il devient nécessaire de maintenir et même d'augmenter le contenu des sols en MO pour améliorer leur fertilité et assurer une agriculture durable en augmentant le taux de séquestration des résidus de récolte (UNGER, 1994).

La MO est la source principale d'azote dans le sol. C'est un composant labile nécessitant une source de renouvellement. Toutefois, la perturbation du sol par le labour provoque généralement une diminution du taux de la MO, favorise l'érosion éolienne et hydrique et de

ce fait provoque un déclin de la productivité de la plante cultivée. Le maintien des résidus de récolte en surface du sol peut contribuer à la synthèse d'une nouvelle MO (CAMPBELL ET ZENTNER, 1993).

I.1.5.3. Les effets de la matière organique sur les propriétés du sol :

Les M.O ont de multiples propriétés qui leurs confèrent des fonctions primordiales dans les agros et écosystèmes et en font une composante de la fertilité. Les fonctions des M.O participent de façon générale à l'aptitude des sols à la production végétale par l'amélioration de ces propriétés physiques, chimiques et biologiques (KOULL, 2007).

a. Actions de la matière organique sur les propriétés physiques du sol :

Les matières organiques assurent la cohésion des autres constituants du sol entre eux et contribuent à la structuration du sol et à la stabilité de la structure. Ceci est dû au grand nombre de liaisons électrostatiques et surtout de liaisons faibles que les matières organiques peuvent assurer (BALESDENT, 1996).

Selon (KOULL, 2007) dans les terres manquant de colloïdes minéraux et où l'absence de phénomènes de gonflement « limons ou sables » l'élévation du taux d'humus coïncide avec une certaine tendance à l'agrégation.

La matière organique grossière, à la surface du sol, atténue le choc des gouttes de pluie et permet à l'eau pure de s'infiltrer lentement dans le sol ; l'écoulement en surface et l'érosion sont ainsi réduits Selon (KOULL, 2007).

La capacité du sol pour l'eau est en effet liée à la teneur en Matière organique en raison de l'hydrophile des colloïdes qui la composent (KOULL, 2007). Cette matière retient d'autant mieux l'eau qu'elle est humifiée, elle régularise le bilan de l'eau dans le sol.

b. Actions de la matière organique sur les propriétés chimiques du sol :

Les M.O contribuent classiquement à la fertilité chimique des sols. Elles sont une réserve d'éléments nutritifs, principalement pour l'azote, le phosphore et le soufre (KOULL, 2007). Elles sont connues dans leur ensemble par leur minéralisation, une source d'aliments de certains éléments nutritifs et la facilité de leur utilisation suite à la libération par oxydation de l'humus et de gaz carbonique. Selon DUTHIL (1973), cette décomposition progressive est doublement intéressante :

- ✓ D'une part, elle s'étale sur la quasi-totalité de la période de végétation, ce qui correspond bien à une alimentation régulière et continue et évite des pertes par lessivage ou par insolubilisations.
- ✓ D'autre part, elle apparaît « complète » que la destruction microbienne des débris végétaux enfouis libère aussi bien N, P, K, Ca, S que d'autres éléments moins connus ou moins évidents Mg, Zn, B, Cu, Fe, Al, Si... Etc.
- ✓ Cette propriété rend la M.O dans certains milieux comme les sols sableux, la principale réserve des bases disponibles (K^+ et Ca^{+2}) (KOULL, 2007).

C. Actions de la M.O sur les propriétés biologiques du sol :

Selon (PARR, 1973) Les apports organiques facilement fermentescibles permettent d'améliorer l'activité biologique

Les matières organiques sont l'aliment des vers de terre et des arthropodes (insectes, acariens...). Les matières organiques jeunes apportent les sucres et les matières azotées nécessaires aux micro-organismes. Les matières organiques, en améliorant la structure et l'aération du sol, favorisent le développement des bactéries aérobies, indispensables à la minéralisation et aux échanges dans la rhizosphère (SOLTNER, 2003).

Par son rôle capital dans la fourniture des éléments majeurs et des oligo-éléments. Les M.O favorisant la croissance et la résistance des plantes aux parasitismes (KOULL, 2007).

Au contact du substrat minéral, elles ont une grande valeur comme amendement humique, comme « ensemencement microbien » et comme générateur d'enzymes, à ces points de vue, elles sont irremplaçables (KOULL, 2007).

I.1.5.4. Matière organique et activité biologique du sol :

Il y'a un lien très important entre le taux de matière organique et l'activité biologique des sols. L'existence des sols nécessite la présence d'une activité biologique qui constitue une facture majeure de leur évaluation et influe sur nombre de leurs propriétés des sols interagissent également sur les conditions de l'activité biologique qui s'y développe.

La biologie des sols fait référence à l'abondance, la diversité et l'activité des organismes vivants qui participent au fonctionnement du sol (CHAUSSOD, 1995).

I.1.5.5. Les organismes vivants du sol :

Les organismes du sol sont des êtres vivants qui réalisent au moins une partie de leur cycle biologique dans le sol, à la surface du sol dans la matière organique en décomposition. Les

MO vivantes représentent la totalité de la biomasse en activité (racines, vers de terre, microflore du sol), animale, végétale. Ces organismes vivants, nombre et très divers, trouvent dans les sols une grande diversité de biotopes permettant leur développement, adaptés à leur taille et leur besoins (CALVET, 2013).

I.1.5.6. Diversité des êtres vivants :

Le sol héberge une grande diversité d'organismes vivants qui sont usuellement classés selon leur taille. Deux grandes catégories sont distinguées : la faune et la microflore et sont elles-mêmes subdivisées en plusieurs classes.

A. la faune de sol :

La faune du sol (BACHELIER AND BACHELIER 1963) est divisée en 4 groupes : la mégafaune, la macrofaune, la mésofaune et la microfaune. La mégafaune regroupe les animaux vertébrés dont la taille dépasse 80 mm (LAVELLE AND SPAIN 2001 ; GOBAT *ET AL.* 2010).

a. Microfaune (taille <0,2 mm) :

Les protozoaires et les nématodes constituent l'essentiel de la microfaune. La microflore désigne l'ensemble des microorganismes du sol et inclut les virus (WILLIAMSON *ET AL.* 2005 ; FIERER *ET AL.* 2007), les bactéries (TORSVIK *ET AL.* 1990 ; FIERER *ET AL.* 2007), les champignons (THORN *ET AL.* 1997 ; FIERER *ET AL.* 2007), les algues (BOND AND HARRIS 1964) et les archaées (BINTRIM *ET AL.* 1997 ; FIERER *ET AL.* 2007).

b. Méso faune (0,2 à 4 mm) :

Cette catégorie comprend principalement les microarthropodes (acariens, collembolés) et ainsi que les grands nématodes et vers enchystréides (LAVELLE AND SPAIN 2001 ; GOBAT *ET AL.* 2010).

c. Macrofaune (4 à 80 mm) :

Elle est aussi constituée d'une très grande variété d'organismes tels que des vers, des insectes, des myriapodes, des mollusques et des araignées et les lombricidés (vers de terre). Les vers de terre représentent une catégorie importante. Par sa biomasse et leurs rôles dans le transport et la biotransformation des résidus.

D. Mégafaune (taille >80 mm) :

Regroupe les animaux grande taille (vertébrés, reptiles, amphibiens) qui utilisant le sol comme habitat. (LAVELLE AND SPAIN 2001 ; GOBAT ET AL. 2010). Selon (CALVET, 2013). Ce sont les animaux de grande taille (vertébrés, reptiles, amphibiens) qui utilisent le sol comme habitat.

Tableau I.3. La faune du sol : ordre de grandeur par famille (CHAUSSOD, 1996 et GIRAD et al, 2005 in (CALVET, 2013).

		Nombre d'espèces	Taille	Abondance	Biomasse g/m ²	Fonctions	Régime alimentaire
Microfaune	protozoaires	68	0.2mm	10^3 à $10^{11}/m^2$	6 à >30	microphages consommateurs de colonies bactériennes action	champignons, bactéries, débris organiques, algues.
	nématodes	65	0.1 à 5 mm	10^6 à $10^8/m^2$	1 à 3	De prédation stimulant le renouvellement de la microflore.	
Mésafaune	Enchytréide et bactéries. (annélides)	140	0.2 à 4 mm	2×10^4 à $4 \times 10^5 / m^2$	0.2 à 400	broyeurs de feuilles.	résidus de végétaux, algues, champignons et bactéries.
		36					
Macrofaune	Taupe, hérisson, lombrics, araignées, Myriapodes, Fourmis,.....	11	3 à 30 cm	10 à $10^3 / m^2$	20 à 400	fragmentation de la matière organique + brassage avec matière minérale.	résidus de végétaux, cadavres d'invertébrés, champignons et bactéries.
		6	>1	20 à $700 / m^2$	0.5 à 12.5		

Source: (R.CHAUSSOD, 1996 et M.C GIRAD et al., 2005(CALVET,2013).

B. La flore du sol

La flore du sol : ordre de grandeur par famille d'après (CHAUSSOD, 1996 ET GIRAD ET AL., 2005 IN (CALVET, 2013).

Tableau I. 4. La flore du sol (ordre de grandeur par famille).

	Nombre d'espèces	Taille	Abondance	Biomasse g/m ²	Fonctions»	Régime alimentaire
Bactéries		0.01 à 0.05 mm	10 ⁸ à 10 ⁹ /g de sol	2 à 200	indispensables aux cycles du C et de N	Matière organique et N atmosphérique.
Champignons	10 ⁴	< 1 micron	10 ⁴ à 10 ⁶ /g de sol	100 à 150	dégradation de la M.O.	résidus végétaux, parasite, symbiote mycorhizien.
Algues		0.2 mm	10 ² à 10 ⁴ / g de sol	5 à 20	synthèse de M.O à partir de M.M. et CO ₂ .	synthèse de M.O à partir de M.M. et CO ₂ .

Source : R.CHAUSSOD, 1996 et M.C GIRAD et al, 2005 in (CALVET, 2013)

I.2.les boues résiduaires des stations d'épuration



Figure I. 6. Les boues des eaux usées

Source : www.ouest-france.fr.

I.2.1. Origine et formation des boues

Les eaux résiduaires contiennent des déchets grossiers séparables sous l'action des forces de gravité lorsqu'on les laisse séjourner dans un bassin calme, ces phénomènes de décantation donnent naissance à des résidus, dont certains (sable grossier, graisse) sont évacués séparément et dont la majorité constituent une composante inerte appelée boue (DUCHENE, 1990).

En fonction de sa nature, la matière contenue dans les eaux usées connaît un sort différent : La matière minérale et la matière organique réfractaires sont accumulées tandis que la matière organique biodégradable sert de substrat aux micro-organismes épurateurs (GRULOIS ET AL. 1996).

Les boues issues d'une épuration physico-chimique sont dites boues de coagulation, Les boues résiduaires peuvent être considérées comme des substances extraites à partir des eaux usées afin de pouvoir récupérer dans le milieu naturel une eau épurée (ANRED, 1988), ce sont des boues riches en résidus formés de réactifs chimiques (SBIH, 1990).

I.2.2. Les différents types de boues

Les boues sont principalement constituées de particules solides non retenues par les prétraitements en amont de la station d'épuration, de matières organiques non dégradées, de matières en suspension minérales et de micro-organismes (bactéries déprédatives pour l'essentiel). Elles se présentent sous forme d'une « soupe épaisse » qui subit ensuite des traitements visant en particulier à réduire leur teneur en eau (CHAMPIAT, 1994).

Les boues de stations d'épuration sont classées en quatre grands groupes :

1.2.2.1. Les boues résiduaires urbaines

Les eaux usées urbaines sont constituées des eaux usées domestique, des eaux usées provenant d'activités non domestiques éventuellement raccordées et des eaux pluviales si le réseau de collecte est unitaire. En 2001, la production annuelle de boues d'épuration d'origine urbaine représentait environ 1million de tonnes de matières sèches, soit environ 5millions de tonnes brutes (IFEN, 2001). Les types de boues d'épuration produites dépendent du type de procédé de traitement des eaux et des équipements de traitements des boues.

1.2.2.2. Les boues secondaires ou actives

Ce sont les boues issues de clarificateurs ou décanteurs après traitement biologique, que se soit en culture libre (boues actives) ou en culture fixées (lits bactériens ou biologique).Elles sont donc constituées essentiellement de corps bactériens et de leurs sécrétions, elles sont de couleur sombre, très organique (75%), plus homogènes que les boues primaires et ont moins d'odeur que les précédentes (DUCHENE,1990 ET DEBBA, 1998).

Le traitement biologique par boues activées permet d'éliminer une grande partie de la matière organique des eaux résiduaires. Le but des traitements biologiques est d'éliminer la pollution organique soluble au moyen de micro-organismes, principalement les bactéries. Ce traitement est généralement mis en œuvre dans un bassin à boues activées qui est un réacteur biologique, alimenté en continu et aéré (figure I. 7). L'aération peut être assurée en surface par des turbines, ou dans le fond par des procédés de rampe de distribution de bulles d'air alimentées par un suppresseur ou par un compresseur d'air. La masse bactérienne, aussi appelée boue activée ou biomasse, est ensuite séparée par gravité du liquide épuré dans un décanteur.

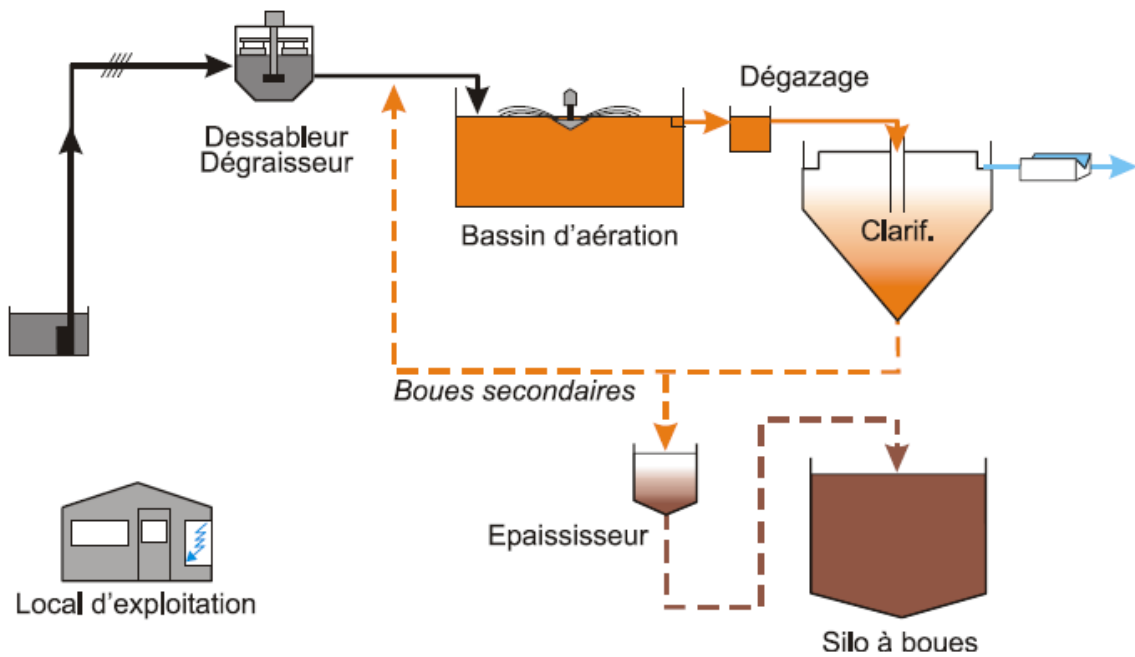


Figure I.7. Principe de fonctionnement des boues activées.

1.2.2.3 Les boues mixte

Le mélange de boues primaires et secondaires conduit à l'obtention des boues mixtes. Leur composition est dépendante de la quantité de boues primaires et secondaires produites. Très fermentescibles, ces boues subissent ensuite le traitement de stabilisation (DEGREMONT, 1989).

1.2.3 Risques environnementaux liées aux boues

Les boues résiduelles urbaines peuvent contenir divers micro-organismes pathogènes et aussi des polluants métalliques et organiques à des teneurs nocives pour l'Homme et à l'environnement. Cependant, CHASSANDE ET AL. (2000) notent qu'en 30 ans de pratique d'épandage, aucun accident portant directement atteinte à la santé publique n'a été recensé. L'application des boues sans mesures de protection, expose les agriculteurs et leur voisinage à des risques sanitaires via la manipulation directe ou l'inhalation des poussières. L'épandage des boues sur les terres agricoles constitue également une voie d'introduction des contaminants organiques et inorganiques dans les sols et les nappes phréatiques capables

d'altérer leurs qualités physiques, chimiques et biologiques (LASHEEN ET AMMAR. 2009 ; WALTER ET AL.2006).

I.3.Généralité sur les eaux usées :

I.3.1. Définition des eaux usées :

Selon REJSEK (2002), les eaux résiduaires urbaines (ERU), ou eaux usées, sont des eaux chargées de polluants, solubles ou non, provenant essentiellement de l'activité humaine. Une eau usée est généralement un mélange de matières polluantes répondant à ces catégories, dispersées ou dissoutes dans l'eau qui a servi aux besoins domestiques ou industriels ou agricole et parvenant dans les canalisations d'évacuation des eaux usées (GROSCLAUDE, 1999). Elles représentent, une fraction du volume des ressources en eaux utilisables mais leur qualité très médiocre exige une épuration avant leur rejet dans le milieu naturel (THOMAS, 1955).



Figure I .8. Les eaux usées

I.3.2. Origines et compositions des eaux usées :

Les eaux usées proviennent de quatre sources essentielles :

I.3.2.1. Les eaux usées domestique

Elles résultent des différentes utilisations domestiques de l'eau. Elles sont constituées essentiellement de déjections humaines (eau de toilette), chargées en matières organiques Azotées, phosphatées et de germes fécaux appelées eaux noires, des eaux ménagères de vaisselle chargées de détergents, de graisses appelées eaux grises (METAHRI, 2012).

Les eaux usées domestiques provenir de :

- Les eaux de cuisine elles contiennent des matières minérales en suspension provenant du lavage des légumes, des substances alimentaires et des produits détergents utilisés pour le lavage de la vaisselle et ayant pour effet la solubilisation des graisses (FRANCK, 2002).
- Les eaux de salles de bains elles sont chargées en produits utilisés pour l'hygiène corporelle, généralement des matières grasses hydrocarbonées (FRANCK, 2002).
- Les eaux de vannes qui proviennent des sanitaires, très riches en matières hydrocarbonées, en azote et en phosphore. Ces eaux représentent un substrat adapté aux procédés de traitements biologiques, mais peuvent contenir des éléments pathogènes (bactéries, virus et parasites divers) (LADJEL ET BOUCHEFER, 2005).
- Les eaux de buanderie Ce sont les eaux de lavage des locaux, elles contiennent des détergents et des savons plus ou moins émulsionnés avec des graisses (LADJEL ET BOUCHEFER, 2005).

I.3.2.2. Les eaux usées industriels :

Elles sont très différentes des eaux usées domestiques. Leurs caractéristiques varient d'une industrie à l'autre. En plus des matières organiques, azotées ou phosphorées, elles sont chargées en différentes substances chimiques organiques et métalliques. Ces eaux ont une grande variété et peuvent être toxiques pour la vie aquatique, ou pour l'homme (EDLINE, 1979). Selon leur origine industrielle elles peuvent également contenir :

- Des graisses (industries agroalimentaires, équarrissage) ;
- Des métaux (traitement de la surface) ;
- De l'eau chaude (circuit de refroidissement des centrales thermiques) ;
- Des hydrocarbures (raffineries) ;

- Des matières radioactives (centre nucléaires, traitement des déchets radioactifs) (CALVET ET AL., 2005).

I.3.2.3. Les eaux usées ruissellement :

comprennent aussi les eaux de pluie qui sont très polluées après une longue période sèche (L'EVY, 1982) la pollution des eaux de lavage et les eaux de drainage est variable dans le temps, plus forte au début d'une précipitation qu'à la fin par la suite du nettoyage des aires balayées par l'eau, les eaux de ruissellement en provenance des cours de fermes sont assez polluées, ainsi elle sont polluées en provenance des trottoirs et chaussées (mazoute, bitume,...) elle contiennent également du zinc, du plomb et du cuivre(GUERREE H. ET GOMELLA C., 1978). Peuvent être particulièrement polluées surtout en début de pluie par deux mécanismes :

- Le lessivage des sols et des surfaces imperméabilisées, Les déchets solides ou liquides déposés sur ces surfaces sont entraînés dans les réseaux d'assainissement par les premières précipitations qui se produisent.
- La remise en suspension des dépôts des collecteurs, par temps sec, l'écoulement des eaux usées dans les collecteurs des réseaux est lent ce qui favorise le dépôt de matières décantables lors d'une précipitation, le flux d'eau plus important permet la remise en suspension de ces dépôts (REJSEK, 2002).

I.3.2.4. Les eaux usées agricoles :

Ce sont des eaux polluées par des substances agricoles, Dans le contexte d'une agriculture performante et intensive, l'agriculteur est conduit à utiliser divers produits d'origine industrielle ou agricole dont certains présentent ou peuvent présenter, des risques pour l'environnement et plus particulièrement pour la qualité des eaux. Il s'agit principalement :

- Des fertilisants (engrais minéraux du commerce ou déjections animales produites ou non sur l'exploitation).
- Des produits phytosanitaires (pesticides, herbicides, fongicides, insecticides). (GROSCLAUDE, 1999).

I.3.3. Composition des eaux usées

I.3.3. 1. Microorganismes

a. Les bactéries

Les bactéries sont des organismes unicellulaires simples et sans noyau. Leur taille est comprise entre 0,1 et 10 μm . Les bactéries sont les microorganismes les plus communément rencontrés dans les eaux usées (TOZE, 1999). Les eaux usées urbaines contiennent environ 10^6 à 10^7 bactéries/100 ml dont la plupart sont entérobactéries, 10^3 à 10^4 streptocoques et 10^2 à 10^3 clostridium.

La voie de contamination majoritaire est l'ingestion. Les pathogènes d'origine hydrique sont responsables de la mort de 3 à 10 millions de personnes par an dans le monde.



Figure I.9. Bactérie vues au microscope électronique

Source : www.google.com

Tableau I. 5. Principales bactéries pathogènes présentes dans les eaux usées

Agent pathogène	Symptôme ; maladie	Voies de contamination principales
Salmonella (différents sérotypes)	Salmonellose	Ingestion
Yersinia enterocolitica	Gastro-entérite	Ingestion
Leptospira spp.	Leptospirose	Cutanée/Ingestion/Inhalation
Legionella	Légionellose	Inhalation
Campylobacter jejuni	Gastro-entérite	Ingestion
Listeria monocytogènes	Listériose	Ingestion
Escherichia coli (Certains sérotypes dont O157 :H7)	Syndrome Hémolytique et Urémique (SHU)	Ingestion
Shigella	Dysenterie bacillaire	Ingestion
Salmonella Typhi	Fièvre typhoïde	Ingestion
Vibrio cholerae	Choléra	Ingestion
Mycobacterium	Tuberculose	Ingestion

Source : adapté de l'US-EPA (1992) ; ASANO (1998) et www.hc-sc.gc.ca cité dans BAUMONT (2004)

b. Les virus

Les virus sont des parasites intracellulaires obligés qui ne peuvent se multiplier que dans une cellule *hôte*. On estime leur concentration dans les eaux usées urbaines comprise entre 10^3 et 10^4 particules par litre. Leur isolement et leur dénombrement dans les eaux usées restent difficiles, Il semble que les virus soient plus résistants dans l'environnement que les bactéries (AULICINO ET AL. 1996). Parmi les virus entériques humains les plus nombreux il faut citer les entérovirus, les rota virus , les rétrovirus, les adénovirus et le virus de l'Hépatite A(ASANO, 1998).D'autre part (BLANCET NASSER .1996), ont constaté que les virus sont plus persistants, à température ambiante, dans un sol irrigué par des eaux usées traitent.

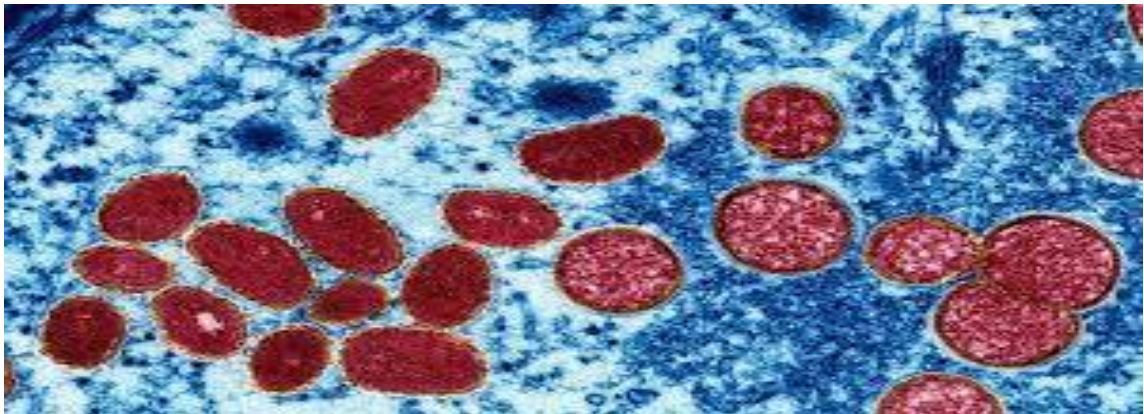


Figure I.10.Virus vus au microscope électronique

Source : www.nationalgeographic.fr

Tableau I.6 .principaux virus présents dans les eaux usées

Agent pathogène	Symptôme ; maladie	Voies de contamination principales
Virus de l'hépatite A	Hépatite A	Ingestion
Virus de l'hépatite E	Hépatite E	Ingestion
Parvovirus	Vomissent ; diarrhée	Ingestion
Reovirus	Affection respiratoire bénigne et diarrhée	Ingestion
Rotavirus	Vomissent ; diarrhée	Ingestion
Calcivirus	Vomissent ; diarrhée	Ingestion
Coronavirus	Vomissent ; diarrhée	Ingestion/Inhalation
Astrovirus	Vomissent ; diarrhée	Ingestion
Virus de Norwaki	Vomissent ; diarrhée	Ingestion
Coxsackie	Méningite ; maladies respiratoire.....	Ingestion
Echovirus	Méningite ; diarrhée..... Méningite ; maladies respiratoire.....	Ingestion
Adenovirus	Maladie respiratoire ; conjonctivite ; diarrhée.....	Ingestion

Source : adapté de l'US-EPA (1992) ; ASANO (1998) et www.hc-sc.gc.ca cité dans BAUMONT 2004).

c. Les protozoaires

Les protozoaires sont des organismes unicellulaires. La plupart des protozoaires pathogènes sont des organismes parasites. Certains protozoaires adopte au cours de leur cycle vital une forme de résistance, appelée kyste qui peut être véhiculé par les eaux résiduaires. Cette forme peut résister généralement aux procédés de traitements des eaux usées (CAMPOS 2008). Plusieurs protozoaires pathogènes ont été identifiés dans les eaux usées (GENNACCARO ET AL. 2003). Parmi les plus importants du point de vue sanitaire, il faut citer *Entamoeba histolytica*, responsable de la dysenterie amibienne, *Giardialamblia* et *Cryptosporidium parvum* (TOZE 1997, IN TOZE, 2006). En revanche, 10 à 30 kystes, est une dose suffisante pour causer des troubles sanitaires (CAMPOS, 2008).

Tableau I.7. Principaux protozoaires présents dans les eaux usées

Agent pathogène	Symptôme ; maladie	Voies de contamination principales
Entamoeba histolytica	Dysenterie amibienne	Ingestion
Giardia lamblia	Giardiase	Ingestion
Balantidium coli	Dysenterie balantidienne	Ingestion/ Inhalation
Cryptosporidium parvum	Diarrhée ; fièvre	Ingestion
Toxoplasma gondii	Toxoplasmose	Ingestion
Cyclospora	Diarrhée ; légère fièvre	Ingestion
Microsporidium	Diarrhée	Ingestion
Naegleria	Méningite	Ingestion
Enterocytozoon spp	Diarrhée chronique ; problèmes rénaux ; musculaires ; pulmonaires et oculaires.	Ingestion

Source : adapté de l'US-EPA (1992) ; ASANO (1998) et www.hc-sc.gc.ca cité dans BAUMONT (2004)

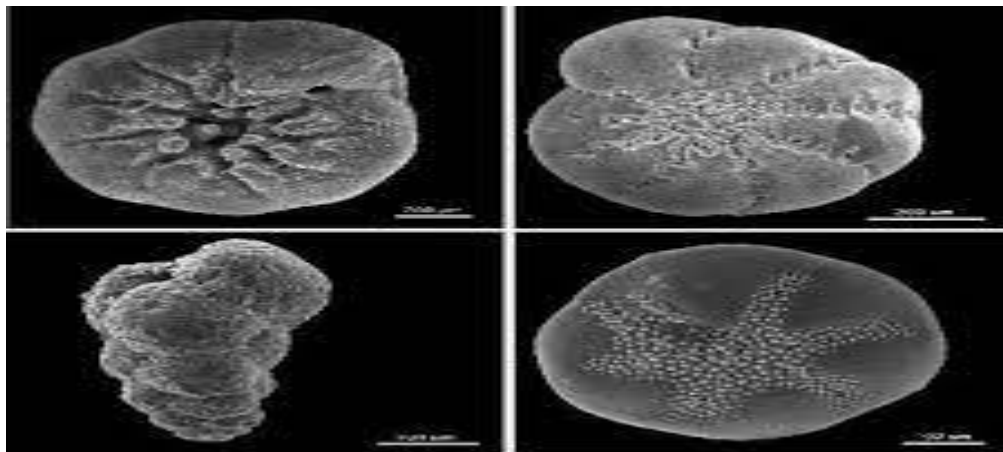


Figure I.11. Protozoaire vu au microscope électronique

Source : htpsressource.unisciel.fr

D. Les helminthes

Les helminthes sont des vers multicellulaires. Tout comme les protozoaires, ce sont majoritairement des organismes parasites rencontrés dans les eaux résiduaires. La concentration en œufs d'helminthes dans les eaux usées est de l'ordre de 10 à 10³ œufs/l. Il faut citer, notamment, *Ascaris lumbricoides*, *Oxyuris vermicularis*, *Trichuris trichuria*, *Taenia saginata* (CSHPF, 1995). Le stade infectieux de certains helminthes est l'organisme adulte ou larve, alors que pour d'autres, ce sont les œufs. (FABY, 1997). Les œufs d'helminthes sont

très résistants et peuvent notamment survivre plusieurs semaines voire plusieurs mois sur les sols ou les plantes cultivées (BAUMONT *ET AL*, 2004).

Tableau I.8.Principaux helminthes présents dans les eaux usées

Agent pathogène	Symptôme ; maladie	Voies de contamination principales
Ascaris lumbricoides	Ascariase	Ingestion
Ancylostoma duodenale	Ancylostomiase	Ingestion/Cutanée
Ancylostoma spp.	Anémie	Ingestion/Cutanée
Necator americanus	Necatoriase	Ingestion
Strongloides stercoralis	Strongyloïdase	Ingestion
Trichuris trichuria	Trichuriase	Ingestion
Taenia spp.	Diarrhée ; douleurs musculaires	Ingestion
Enterobius vermicularis	Enterobiase	Ingestion
Hymenolepis	Nervosité ; troubles digestifs ;.....	Ingestion
Toxocara	Fièvre ; douleur abdominale	Ingestion
Echinococcus granulosus	Hydatidose	Ingestion

Source : adapté de l’US-EPA (1992) ; ASANO (1998) et www.hc-sc.gc.ca cité dans BAUMONT (2004).



Figure I.12.Helminthe vu au microscope électronique

Source : [httpsthumbs.dreamstime.com](http://thumbs.dreamstime.com)

1.3.3.2 Les matières en suspension (MES)

Ce sont des matières biodégradables pour la plupart. Elles donnent également à l'eau une apparence trouble, un mauvais goût et une mauvaise odeur (FABY, 1997). La plus grande part des microorganismes pathogènes contenus dans les eaux usées, est associée aux MES (FAO, 2003). Les particules en suspension peuvent être éliminées par décantation. C'est une étape simple et efficace pour réduire la charge organique et la teneur en germes pathogènes des eaux usées (FAO, 2003). Enfin, une présence excessive de matières en suspension peut entraîner des difficultés de transport et de distribution des effluents ainsi que l'obturation des systèmes d'irrigation.

1.3.3.3 Les éléments traces, minéraux ou organiques

Sont des micropolluants organiques et non organiques résultent d'une pollution multiple et complexe. Ils sont des éléments présents dans les eaux usées. La voie de contamination principale, dans le cas d'une réutilisation des eaux usées épurées, est l'ingestion (JAYAKUMAR ET AL. 2017). Il peut donc y avoir une contamination de la chaîne alimentaire et une concentration de ces polluants dans les organismes (YANG ET AL. 2009).

a. Les métaux lourds

Les métaux sont présents naturellement dans les sols. Certains en sont des constituants majeurs (Al) ou importants pour la structure des minéraux (Fe, Mn) (BAIZE AND STERCKEMAN. 2001; HAMON ET AL. 2004; HORCKMANS ET AL. 2005). Les plus abondants sont le fer, le zinc, le cuivre et le plomb. Les autres métaux (manganèse, aluminium, chrome, arsenic, sélénium, mercure, cadmium, molybdène, nickel, etc.) sont présents à l'état de traces» (CAUCHI, 1996). Les éléments cités dans la littérature comme étant les plus dangereux sont le plomb (Pb), l'arsenic (As), le mercure (Hg), le cadmium (Cd) et le nickel (Ni) (GUPTA ET AL. 2008). Certains en sont des constituants majeurs (Al) ou importants pour la structure des minéraux (Fe, Mn) (BAIZE AND STERCKEMAN, 2001; HAMON ETAL. 2004; HORCKMANS ET AL. 2005). Les principaux phénomènes naturels conduisant à la dissémination des métaux dans les compartiments environnementaux sont l'activité volcanique et l'érosion des roches (DOELSCH ET AL. 2006). En plus du fond géochimique, les milieux aquatiques sont enrichis en métaux par les activités humaines. Les métaux sont utilisés par l'homme comme matériaux mais également comme réactifs dans l'industrie (traitement de surface, intermédiaire réactionnel...) et l'agriculture (phytosanitaires) (AZIMI ET AL. 2005). En effet, la plupart des métaux dans les eaux de ruissellement sont majoritairement associés aux matières en suspension ou aux colloïdes (MAKEPEACE ET AL. 1995).

Tableau I.9. Les plus dangereux métaux lourds

Métaux lourds	Symptôme ; maladie	Voies de contamination principales
Plomb Pb	Anémie ; trouble neuropsychiques ; douleurs abdominales ; hypertension artérielle	Inhalation /Ingestion Cutané
Arsenic As	Cancers ; une neuropathie	Inhalation /Ingestion Contact avec la peau
Mercure Hg	Malformation ; congénitale ; trouble de l'équilibre et de langage etc. ...	Inhalation /Ingestion Cutané
Cadmium Cd	Cancer (poumon ; reins prostate) ; perte de réflexe ; paralysie respiratoire etc.	Inhalation /Ingestion Cutané
Nickel Ni	Cancer (nez ; poumon ; estomac)	Inhalation

Source : adapté de l'US-EPA (1992) ; ASANO (1998) et www.hc-sc.gc.ca cité dans BAUMONT (2004)

b. Les éléments toxiques organiques

Les eaux usées contiennent des composés chimiques toxiques. Parmi ces composés, on peut citer les hydrocarbures polycycliques aromatiques, les alkyl-phénols, chlorophénols, phtalates, les pesticides et les résidus pharmaceutiques actifs. (BELGIORNO ET AL.2007). Cependant, les faibles concentrations en ces composés dans les eaux usées limitent le risque d'exposition lors de leur réutilisation pour l'irrigation (TOZE, 2006).

1.3.3.4 Les substances nutritives

Les nutriments se trouvent en grande quantité dans l'eau usée, sont importants pour la valorisation de ces eaux en agriculture et en gestion des paysages (HAMODA, 2004). Les éléments les plus fréquents dans les eaux usées sont l'azote, le phosphore et parfois le potassium, le zinc, le bore et le soufre. D'après FABY ET BRISSAUD (1997) une lame d'eau résiduaire traitée de 100 mm peut apporter à l'hectare de terre agricole environ

Tableau I.10. L'apporté à l'hectare de terre agricole

ÉLÉMENT	Pois (kg)
Potassium	2 à 69 kg
Phosphore	4 à 24 kg
Magnésium	9 à 100 kg
Azote	16 à 62 kg
Calcium	18 à 208 kg
Sodium	27 à 182 kg

I.3.4 Caractéristique des eaux usées

Selon TABET 4 (2015), les normes de rejet des eaux usées, fixent des indicateurs de qualité physicochimique et biologique. Ce potentiel de pollution généralement exprimés en mg/l, est quantifié et apprécié par une série d'analyses. Certains de ces paramètres sont indicateurs de modifications que cette eau sera susceptible d'apporter aux milieux naturels récepteurs. Pour les eaux usées domestiques, industrielles et les effluents naturels, on peut retenir principaux caractéristiques suivantes:

1.3.4.1 Les Paramètres physicochimiques

Ils résultent de l'introduction dans un milieu des substances conduisant à son altération, se traduisant généralement par des modifications des caractéristiques physicochimiques du milieu récepteur.

a. La température

La température est un facteur écologique important des milieux aqueux. Son élévation peut perturber fortement la vie aquatique (pollution thermique). Elle joue un rôle important dans la nitrification et la dénitrification biologique. La nitrification est optimale pour des températures variant de 28 à 32°C par contre, elle est fortement diminuée pour des températures de 12 à 15°C et elle s'arrête pour des températures inférieures à 5°C (RODIER, 2005).

b. Le potentiel d'Hydrogène (pH)

D'après RODIER (2005), Les organismes sont très sensibles aux variations du pH, et un développement correct de la faune et de la flore aquatique n'est possible que si sa valeur est comprise entre 6 et 9. L'influence du pH se fait également ressentir par le rôle qu'il exerce sur les autres éléments comme les ions des métaux dont il peut diminuer ou augmenter leur mobilité en solution biodisponible et donc leur toxicité. Le pH joue un rôle important dans l'épuration d'un effluent et le développement bactérien. La nitrification optimale ne se fait qu'à des valeurs de pH comprises entre 7,5 et 9.

c. Les matières en suspension (MES)

Selon REJSEK (2002), la pollution particulaire est due à la présence de particules de grande taille, supérieure à 10µm, en suspension dans l'eau, et que l'on peut assimiler aux matières en suspension (MES) En fait, les matières en suspension ne sont des particules solides véritablement en suspension que dans des conditions moyenne d'écoulement des effluents correspondant à une vitesse minimale de 0,5 m/s. En fonction de la taille des particules, on distingue les matières grossières ou décantables (diamètre supérieur à 100 µm) et les matières en suspension.

Selon (SAID.M, 2012) Elles représentent, la fraction constituée par l'ensemble des particules, organiques ou minérales, non dissoutes de la pollution. Elles constituent un paramètre important qui marque bien le degré de pollution d'un effluent urbain ou même industriel.

d. La conductivité électrique

La conductivité est la propriété que possède une eau de favoriser le passage d'un courant électrique. Elle est due à la présence dans le milieu d'ions qui sont mobiles dans un champ électrique. Elle dépend de la nature de ces ions dissous et de leurs concentrations. (REJSEK, 2002). La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm². L'unité de conductivité est le siemens par mètre (S/m).

$$1 \text{ S/m} = 10^4 \mu\text{S/cm} = 10^3 \text{ ms/m. (RODIER, 2005).}$$

e. L'Oxygène Dissous

L'oxygène dissous est un composé essentiel de l'eau car il permet la vie de la faune et il conditionne les réactions biologiques qui ont lieu dans les écosystèmes aquatiques.

L'oxygène est souvent présent dans l'eau. Sa solubilité est en fonction de la pression partielle dans l'atmosphère et de la salinité. La teneur de l'oxygène dans l'eau dépasse rarement 10 mg/l. Elle est en fonction de l'origine de l'eau ; L'eau usée domestique peut contenir de 2 à 8 mg/l (LADJEL, 2006).

f. La Demande Chimique en Oxygène(DCO)

La demande chimique en oxygène (DCO) est la quantité d'oxygène consommée par les matières existantes dans l'eau et oxydables dans des conditions opératoires définies. En fait la mesure correspond à une estimation des matières oxydables présentes dans l'eau quel que soit leur origine organique ou minérale.

La DCO étant fonction des caractéristiques des matières présentes, de leurs proportions respectives, des possibilités de l'oxydation. (RODIER, 2005).

g. La Demande Biochimique en Oxygène (DBO)

Sa détermination consiste à mesurer la quantité totale de l'oxygène consommé, par des processus biochimiques, au cours de l'oxydation des matières organiques dans un échantillon donné.

Pratiquement, la demande biochimique en oxygène devrait permettre d'apprécier la charge du milieu considéré en substances putrescibles, son pouvoir auto-épuration et d'en déduire la charge maximale acceptable, principalement au niveau des traitements primaires des stations d'épuration. (RODIER, 2005).

Selon REJSEK (2002), la demande biochimique en oxygène après 5 jours (DBO5) d'un échantillon est la quantité d'oxygène consommé par les microorganismes aérobies présents dans cet échantillon pour l'oxydation biochimique des composés organiques et/ou inorganiques.

h. Les métaux lourds

Les métaux lourds que l'on trouve dans les eaux usées urbaines sont extrêmement nombreux (de l'ordre de quelques $\mu\text{g/l}$). Les plus abondants sont le fer, le zinc, le cuivre et le plomb. Les autres métaux (manganèse, aluminium, chrome, arsenic, sélénium, mercure, cadmium, Molybdène, nickel, etc.). Leur origine est multiple : ils proviennent « des produits consommés au sens large par la population, de la corrosion des matériaux des réseaux de distribution d'eau et d'assainissement, des eaux pluviales dans le cas de réseau unitaire, des activités de service (santé, automobile) et éventuellement de rejets industriels » (CAUCHI *et al*, 1996).

i. L'azote

L'azote est un élément essentiel des structures vivantes. Il existe dans l'eau sous trois formes essentielles selon le degré d'oxydation : nitrates (NO_3^-), nitrites (NO_2^-) et ammonium (NH_4^+). Ce sont les formes d'azote utilisables par le phytoplancton (COPIN-MONTEGUT, 1996). L'azote présent dans l'eau peut avoir un caractère organique ou minéral. L'azote

organique est principalement constitué par des composés tels que des protéines, des polypeptides, des acides aminés, de l'urée. Le plus souvent ces produits ne se trouvent qu'à de très faibles concentrations. Quant à l'azote minéral (ammoniac, nitrate, nitrite), il constitue la majeure partie de l'azote total. (RODIER, 2005).

j. L'azote ammoniacal

Pour désigner l'azote ammoniacal, on utilise souvent le terme d'ammoniac qui correspond aux formes ionisées (NH_4^+) et non ionisées (NH_3) de cette forme d'azote.

L'ammoniac constitue un des maillons du cycle de l'azote. Dans son état primitif, l'ammoniac (NH_3) est un gaz soluble dans l'eau, mais, suivant les conditions de pH, il se transforme soit en un composé non combiné, soit sous forme ionisée (NH_4^+). Les réactions réversibles avec l'eau sont fonction également de la température et sont les suivantes :



k. Les nitrates (NO_3^-)

Les nitrates constituent le stade final de l'oxydation de l'azote organique dans l'eau. Les bactéries nitrifiantes (nitrobactéries) transforment les nitrites en nitrates.

Les nitrates ne sont pas toxiques ; mais des teneurs élevées en nitrates provoquent une prolifération algale qui contribue à l'eutrophisation du milieu. Leur potentiel danger reste néanmoins relatif à leur réduction en nitrites. (RODIER, 2009).

l. Les nitrites (NO_2^-)

Les ions nitrites (NO_2^-) sont un stade intermédiaire entre l'ammonium (NH_4^+) et les ions nitrates (NO_3^-). Les bactéries nitrifiantes (nitrosomonas) transforment l'ammonium en nitrites. Cette opération, qui nécessite une forte consommation d'oxygène, est la nitrification.

Les nitrites proviennent de la réduction bactérienne des nitrates, appelée dénitrification. Les nitrites constituent un poison dangereux pour les organismes aquatiques, même à de très faibles concentrations. La toxicité augmente avec la température. (RODIER, 2009).

m. Le phosphore

Dans les eaux urbaines, le phosphore provient environ pour moitié des rejets humains et pour moitié de l'utilisation des détergents (lessives). (BAUMONT, 2009) On distingue :

- ✓ Phosphore organique : résidu de la matière vivante, organophosphoré (ATP, ADP, AMP, phospholipides) ;
- ✓ Phosphore minéral, essentiellement constitué d'ortho phosphates (PO_4^{3-}) qui représente 50% de la totalité contenue dans les eaux usées urbaines.

1.3.4.2. les paramètres bactériologiques

Pour les bactéries, rechercher les organismes pathogènes de manière spécifique est trop coûteux et aléatoire, c'est pourquoi l'on s'intéresse aux concentrations de germes témoins (coliformes totaux, coliformes fécaux et streptocoques fécaux en général) pour estimer la population de pathogènes. En effet, il existe une corrélation entre la présence de ces bactéries témoins et la présence de bactéries pathogènes (BAUMONT ET AL, 2004). Pour les parasites, il s'agit essentiellement de la recherche des formes de résistance des protozoaires (kystes) et des œufs d'helminthes. Il est important de rappeler que les helminthes constituent le risque majeur à cause de leur persistance et leur très faible dose infectieuse. Les bactéries et les protozoaires présentent un risque plus faible. Les virus présentent le risque le moins élevé (UNITE D'APPUI AU PROGRAMME, 2010).

1.3.4.3. Paramètres Organoleptiques

a. La couleur

Une eau pure observée sous une lumière transmise sur une profondeur de plusieurs mètres émet une couleur bleu clair car les longueurs d'ondes courtes sont peu absorbées alors que les grandes longueurs d'onde (rouge) sont absorbées très rapidement. (REJESK, 2002). La coloration d'une eau est dite vraie ou réelle lorsqu'elle est due aux seules substances en solution. Elle est dite apparente quand les substances en suspension y ajoutent leur propre coloration. (RODIER et Al, 2005).

b. La turbidité

Selon REJSEK (2002), la turbidité représente l'opacité d'un milieu trouble. C'est la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de matières non dissoutes. Elle est causée, dans les eaux, par la présence de matières en suspension (MES) fines, comme les argiles, les limons, les grains de silice et les microorganismes. Une faible part de la turbidité peut être due également à la présence de matières colloïdales d'origine organique ou minérale. Les unités utilisées pour exprimer la turbidité proviennent de la normalisation ASTM (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL) qui considère que les trois unités suivantes sont comparables:

Unité JTU (Jackson Turbidity Unit) = unité FTU (Formazine Turbidity Unit) = unité NTU (Nephelometric Turbidity Unit).

I.5. Les effets des eaux usées

I.3.5.1 Sur les propriétés physicochimiques du sol

L'irrigation avec les eaux usées, affecte avec le temps certains paramètres du sol. Ainsi, une légère diminution du pH est observée dans certains sols basiques, (YADAV ET AL. 2002; ABBASS ET AL.2006; RATTAN ET AL.2005; SOLIS ET AL. 2005;HERPIN ET AL.2007). Les eaux usées, à travers leur pouvoir fertilisant, entraînent également une augmentation du taux de la MO et des éléments nutritifs du sol (RATTAN ET AL. 2005; YADAV ET AL. 2002). Toutefois, ces éléments nutritifs stimulent l'activité microbologique du sol (MAGESAN ET AL. 2000 ; RAMIREZ FUENTES ET AL. 2002), ce qui favorise la minéralisation de la MO et la diminution de la CEC du sol (SOLIS ET AL. 2005; HERPIN ET AL. 2007). Et aussi diminue la conductivité hydraulique du sol (MAGESAN ET AL. 2000).

I.3.5.2 Sur le sol

Une grande quantité d'ions sodium dans l'eau affecte la perméabilité des sols et pose des problèmes d'infiltration (SUAREZ ET AL. 2006). Le calcium et le magnésium adsorbé sur les agrégats du sol et cause la dispersion de ces particules argileuses. Cette dispersion comme conséquence la désagrégation des sols. Le sol devient alors dur et compact. Sa porosité se colmate, réduisant ainsi les vitesses d'infiltration de l'eau et de l'air, affectant ainsi sa structure (HALLIWELL ET AL.2001; LEONE ET AL. 2007). L'accumulation d'éléments traces au niveau des premières couches du sol à cause de leur mobilité réduite ; ce qui peut conduire à la déstabilisation des équilibres biologiques et donc à la stérilisation progressive du sol (JELLAL. 1996).L'augmentation de la pression osmotique qui entraîne la diminution ou l'arrêt de l'absorption de l'eau. Le problème le plus important et le plus courant que les eaux usées peuvent occasionner dans les sols est la salinisation. (OMS. 2012).L'utilisation des eaux usées pour l'irrigation ajoute des nutriments, des matières solides dissoutes, des sels et des métaux lourds au sol. Au fil du temps, des quantités excessives de ces éléments peuvent s'accumuler dans la zone racinaire avec des effets probablement nocifs sur le sol. L'utilisation à long terme des eaux usées pourrait provoquer une salinité des sols, leur engorgement, l'effondrement de leur structure, la réduction globale de leur capacité productive et une baisse des rendements agricoles.

D'autres problèmes sont prévus au niveau du sol et qui sont :

- L'alcalinité et la réduction de la perméabilité du sol.
- L'accumulation d'éléments potentiellement toxiques.

- L'accumulation de nutriments (FAO. 2003).

1.3.5.3 sur les plantes cultivées

La biodisponibilité des éléments traces (le bore, le fer, le manganèse, le zinc, le cuivre et le molybdène) dans le sol peut engendrer leur accumulation dans les tissus des plantes et dans certains cas, les teneurs en ces éléments peuvent atteindre des seuils de phytotoxicité (FABY ET BRISSAUD. 1997). Les problèmes de l'utilisation des eaux usées à des fins agricoles, celui de la salinité ; l'accumulation des sels dans la zone racinaire atteint une concentration, causé une baisse de rendement ou arrêt de la croissance du végétal. (AYERS, WESTCOT. 1988). L'accumulation de certains ions (Cl^- , Na^+), au niveau des feuilles de la plante après assimilation qui se traduit par des effets toxiques.

1.3.5.4 Sur la fertilité du sol

Les nitrates et l'ammonium ont été déterminés par chromatographie ionique à partir des extraits aqueux des sols. Dans le calcisol irrigué par les EUT, les teneurs en NH_4^+ de l'extrait aqueux de sol sont faibles. D'une manière générale, on constate que les teneurs augmentent de la surface vers la profondeur. Le contenu de ces eaux en fertilisants, notamment l'azote, le potassium et le phosphore, permet d'obtenir des rendements meilleurs avec moins d'apports en engrais chimiques (FABY ET BRISSAUD. 1997). L'apport en quantité importante des doses d'azote et de phosphore peut nuire à la production agricole et contribue à la pollution des nappes lorsque les doses appliquées ne sont pas bien estimées.

Un excès en azote peut causer un retard de maturation et une grande sensibilité aux maladies (AYERS & WESTCOT .1985).

1.3.5.5 sur l'agriculture

L'eau dans certaines régions, largement utilisée pour l'arrosage ou l'irrigation sous forme brute (non traitée). La texture du sol, sa flore bactérienne, les cultures et le bétail, sont sensibles à la qualité de l'eau. De même, les boues issues du traitement des eaux usées pourront, si elles contiennent des toxiques (métaux lourds) être à l'origine de la pollution des sols, en cas d'épandage. (GAUJOUS. D, 1993).

1.3.5.6 sur environnement

La contamination des eaux souterraines par des composés organiques, même à faible concentration, peut compromettre l'exploitation de la ressource en eau potable pour très

longues périodes. Ils accroissent la biomasse et la consommation de l'oxygène dissous. (DEGREMONT, 1989).

Les matières en suspension résiduelles même à faible concentration réduisent la transparence du milieu récepteur réduisent ainsi la photosynthèse des végétaux et limitant les échanges gazeux entre l'atmosphère et le milieu aquatique. La présence des nitrates et des phosphates peuvent accélérer le processus naturel d'eutrophisation qui peut aller jusqu'à la mort par asphyxie de la plus part des organismes qui y vivent. (HENRY.A, 2008).

II.1. Identification de la parcelle étudiée :

L'échantillonnage du sol a été réalisé, en 16 mai 2022. Il s'agit d'une parcelle de vignoble de 13ha dont 8ha de vignes (raisin de table), amendée avec les boues résiduaires et irriguée avec les eaux usées épurées provenant de la STEP (station d'épuration) de la ville de Boumerdes depuis 2002. sur une parcelle étudiée est située dans la commune de Corso (Figure ..). Un prélèvement de sol a été effectué sous dix sujets de vigne désignés au préalable selon une distribution en diagonale (figure II.1). Après un nettoyage de la surface, les prélèvements de sol ont été effectués sur trois (3) profondeurs (0 – 10cm ; 10 – 20 cm et 20 – 40cm). Ils ont été conditionnés dans des sacs, étiquetés et acheminés vers le laboratoire.



Figure II.1. Parcelle de vigne échantillonnée (originelle, 2022)



Figure II.2. (a) (b) (c) (d) : Prélèvement du sol (originelle, 2022).

Ce présent travail a été réalisé au niveau de laboratoire de pédologie (PAVDA) de département des sciences Agronomique, il porte sur :

Analyses physique et chimique du sol.

II.2. Prétraitements des échantillons du sol :

Une fois arrivée au laboratoire, l'échantillon a été réparti sur des feuilles posées sur les paillasses bien propres et séchés à l'aire, pendant quelques jours (figure)

Une fois les échantillons séchés, ils sont tamisés à l'aide d'un tamis pédologique de 2 mm à mailles. Après le tamisage, la terre fine (fraction ≤ 2 mm) et les graviers sont séparés et pesés (figure). Les échantillons de terre sont ensuite conservés dans des boîtes en carton et les gravillons dans des sacs en plastique.



Figure (II.3) : Prétraitement des échantillons du sol au laboratoire (originelle, 2022)

II.3. Présentation de STEP de Boumerdes :

Cette La ville de boumerdes est située à cheval entre les villes d'Alger et Tizi-Ouzou, elle a été créée pour être une ville universitaire après l'indépendance de l'ALGERIE. Elle représente en elle seule 10% littoral algérien soit '120km' de côtes. La station d'épuration de BOUMERDES ainsi est conçue pour traiter les eaux usées domestique de la ville de BOUMERDES ainsi que d'autre communes telles que CORCO et TIJALABINE, elle s'étend une surface de '3.11 hectares' et peut traiter jusqu'à 75000 Eqh. L'eau épurée issue de la station est acheminée directement vers la Mer par oued TATAREG.

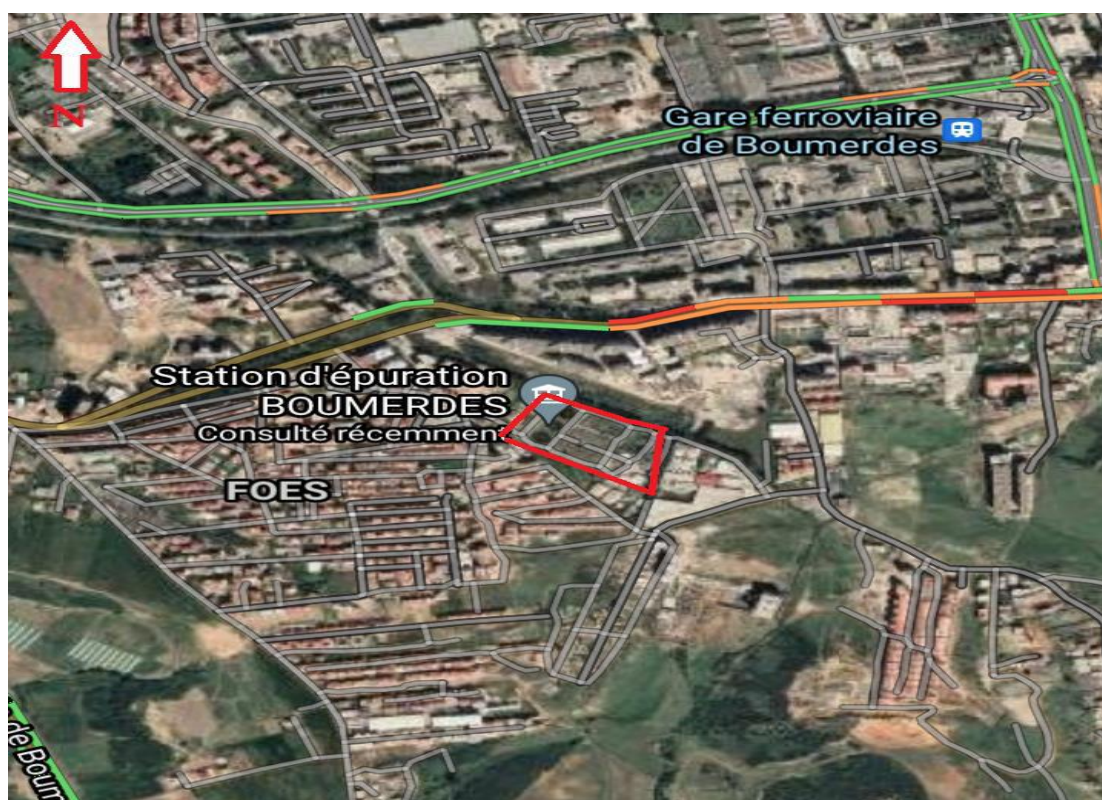


Figure II.4. Illustration de la position géographique de la station d'épuration de Boumerdes (Google Maps, 2021)

II.4. Paramètres analytiques

II.4.1. pH du sol

Par définition, il est l'unité de mesure de la concentration en ions hydrogènes, permettant d'évaluer l'acidité ou la basicité d'un milieu. Il existe plusieurs méthodes de mesure du pH (DAJOZ, 1985) et C'est la mesure de l'acidité d'une suspension de terre dans de l'eau, avec un rapport terre/eau normalisé (1/5), il indique aussi la concentration en ions « H + » présente

dans l'eau (MOREL, 1986). La lecture du pH se fait sur le pH mètre lorsque l'aiguille est stabilisée et après un repos au moins d'une heure de la suspension. (BEN AMARA, 2007).

Le pH du sol est une mesure de l'acidité ou de l'alcalinité des sols. Le pH de la solution du sol est considéré comme l'une des principales variables exprimant les propriétés chimiques des sols selon (SOLTNER, 2004) Selon KABATA-PENDIAS, 2011) Le potentiel hydrogène affecte spécifiquement la disponibilité des éléments nutritifs des plantes, en contrôlant les formes chimiques des nutriments et permet de déterminer le degré d'acidité ;de neutralité d'alcalinité des eaux usées .Il joue un rôle capital dans la croissance des microorganismes dont le PH optimum varie de 6.5 à 7.5 selon l'OMS(1987a)

Selon (ADJANOHOUN ET AL. 2017) le ph de la solution du sol est un élément déterminant pour une bonne dissolution des éléments nutritifs et par conséquent pour une absorption efficace de ces éléments nutritifs par les racines des plantes.

Le pH exprime la réaction acide, neutre ou basique d'un corps selon qu'il renferme beaucoup ou peu d'ions H⁺ libres en solution. Au niveau du sol, le pH est variable et il influe sur les propriétés du sol. Le pH des sols a pour extrêmes 4,5 à 5 pour les sols plus acides et 8 pour les terres très basiques (PREVOST, 2006).

La mesure du ph est faite à l'aide d'un pH-mètre selon le mode opération suivant :



Figure II.5. Le pH-mètre (originelle, 2022)

Pour le pH-eau :

- Étalonnage du pH mètre avec les solutions tampon pH 4, pH 7 et pH 10.
- Poser 20g de sol terre (terre fine $\leq 2\text{mm}$) dans un b cher de 100 ml. Le rapport sol/eau à respecter est 1/5.
- Ajouter 50ml d'eau distillé, selon le rapport solide/liquide de 1/5.
- Agiter chaque 3 minute pendant 2h.
- Etalonnage du ph mètre la solution tampon ph 7.
- Effectuer la mesure après stabilisation de la valeur affichée.



Figure II.6. Illustration de la mesure du ph de la solution du sol.

II.4.2. Conductivité elektrische

La conductivité elektrische est la mesure du degré de la salinité du sol étudié. La détermination de la conductivité elektrische se fait sur extrait de sol (rapport sol/eau=1/5)   l'aide d'un conductimètre (DELAUNOIS, 1976). Les valeurs sont comparées à une étude de salinité.

la conductivité elektrische d'une eau nous renseigne sur les variations de sa composition d'origine naturelle ou anthropique (RODIER, 1984)

La conductivité d'une solution est définie comme l'inverse de la résistance. Sa mesure s'effectue par l'utilisation d'une cellule de conductivité couplée à un conductimètre, et la conductivité s'exprime en $\mu\text{S/cm}$, mS/cm ou dS/m .

La détermination de la conductivité elektrische a été faite selon le mode opération suivant :

- Poser 10g de sol terre fine $< 2\text{mm}$ préalablement séché.

- Ajouter 50ml d'eau distillé dans un bécher 100 ml. le rapport sol/eau à respecter est 1/5.
- Agiter chaque 15 minute pendant 2h.
- Transvaser le liquide dans un bécher de 50 ml.
- Faire la mesure de la CE.



Figure II.7. Illustration de la mesure de la conductivité électrique de la solution du sol.

II.4.3. Teneur en matière organique du sol

Pour doser de la matière organique, nous avons utilisé le protocole de la perte au feu décrit PAR (MATHIEU ET PIELTAIN, 2003). La méthode consiste à soumettre l'échantillon de sol à niveau de températures : à 200°C durant 16h pour éliminer le maximum d'eau inter-foliaire

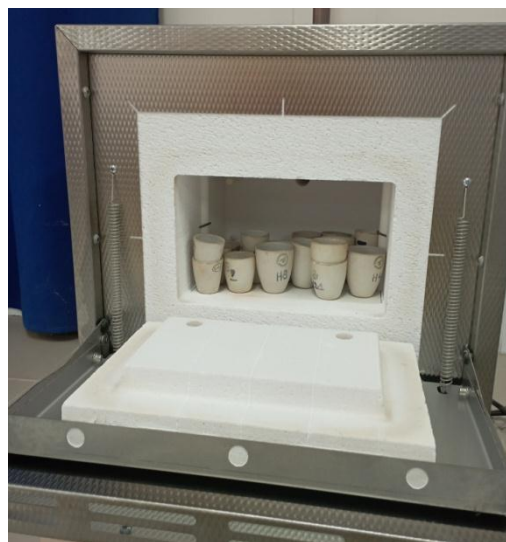
et d'eau des bordures des argiles et à 450°C durant 4 heures pour la combustion du carbone organique.

Le mode opératoire a été adopté pour l'ensemble des échantillons :

- Le sol d'un poids de 5 g a été mis dans des creusets en céramique préalablement pesés à 0.001 g. le poids du creuset est noté M0.
- Introduire les échantillons pour une durée de 16h dans l'étuve à 200°C, puis peser et noté le poids de l'échantillon déshydraté M1.
- Placer le creuset et son contenu dans le four électrique et porter la température à $450 \pm 10^\circ\text{C}$, maintenir cette température pendant 4 heures, peser et noter le poids M2.
- Recommencer l'opération de calcination jusqu'à ce que la différence de poids entre des pesées successives soit de moins de 0,01 g. Noter le poids du creuset plus l'échantillon calciné : M2.



(a)



(b)

Figure II.8. Illustration de la mesure de la matière organique : (a) creusets à l'intérieur de l'étuve et (b) à l'intérieur du Four.

Calculs :

La perte au feu exprimée en pourcentage de la masse de l'échantillon déshydraté (après chauffage à 220°C) est donnée par l'expression :

$$\text{Perte au feu} = \text{Carbone Organique (\%)} = \frac{M1 - M2}{M1 - M0} * 100$$

$$\text{Matière Organique (\%)} = 1,724 \times \text{C Org (\%)}$$

II.4.4. Analyse statistique

L'analyse des données des paramètres analytique a été faite avec les logiciels Excel, Stat Box et le R. Cette analyse est faite pour décrire l'évolution des paramètres sur le plan horizontal et vertical au sein de la parcelle étudiée en nous basons sur leurs valeurs et le calcul de moyennes, ainsi que l'analyse de la variance pour connaître la signification des différences des paramètres. ACP, permet une projection des données dans un plan multi -dimensionnel, et d'observer les corrélations pertinentes éventuelle entre paramètres.

III.1 Réaction de la solution du sol

III.1.1 pH de la solution du sol

Les résultats de la détermination du pH-eau de la solution du sol des échantillons prélevés de la parcelle étudiée sont portés dans le tableau (III.1). Les pH enregistrés évoluent de 5.89 à 6.61 alors que le pH moyen du sol de la parcelle est de 6.26. Ceci indique que la réaction du sol est qualifiée selon les normes (annexe 1) de légèrement acide à neutre, confirmant ainsi les résultats trouvés par BEN ABBOU ET KADI, 2021 ET CHERFOUH ET AL. (2018). Cette catégorie de pH est considérée comme étant adéquate à l'alimentation minérale des plantes et quelle ne constitue pas de contrainte quelconque entravant le développement normal des organismes vivants (SOLTNER, 2005).

Tableau III.1 : pH-eau moyenne des échantillons de sol des sous-parcelles (SP) en fonction de profondeur.

	SP- H	SP- F	SP- G
0 à 10cm	6,193	6,193	6,205
10 à 20cm	6,272	6,327	6,193
20 à 40cm	6,193	6,311	6,239

La variabilité du pH, illustrée sur le figure(III.1), en fonction des points de prélèvement est peu importante (inférieure à 1 unité de pH). Cette observation confirme le transfert des ions de la surface du sol et leur accumulation dans la couche inférieure de 20 à 40cm.

Les figures a, b et c ci-dessous représentent les valeurs de pH des sous-parcelles analysées (F,G,H) qui montrent augmentation du pH en fonction de la profondeur d'échantillonnage confirmant ainsi le transfert ionique par processus d'échange et de lessivage via le complexe adsorbant et la solution du sol..

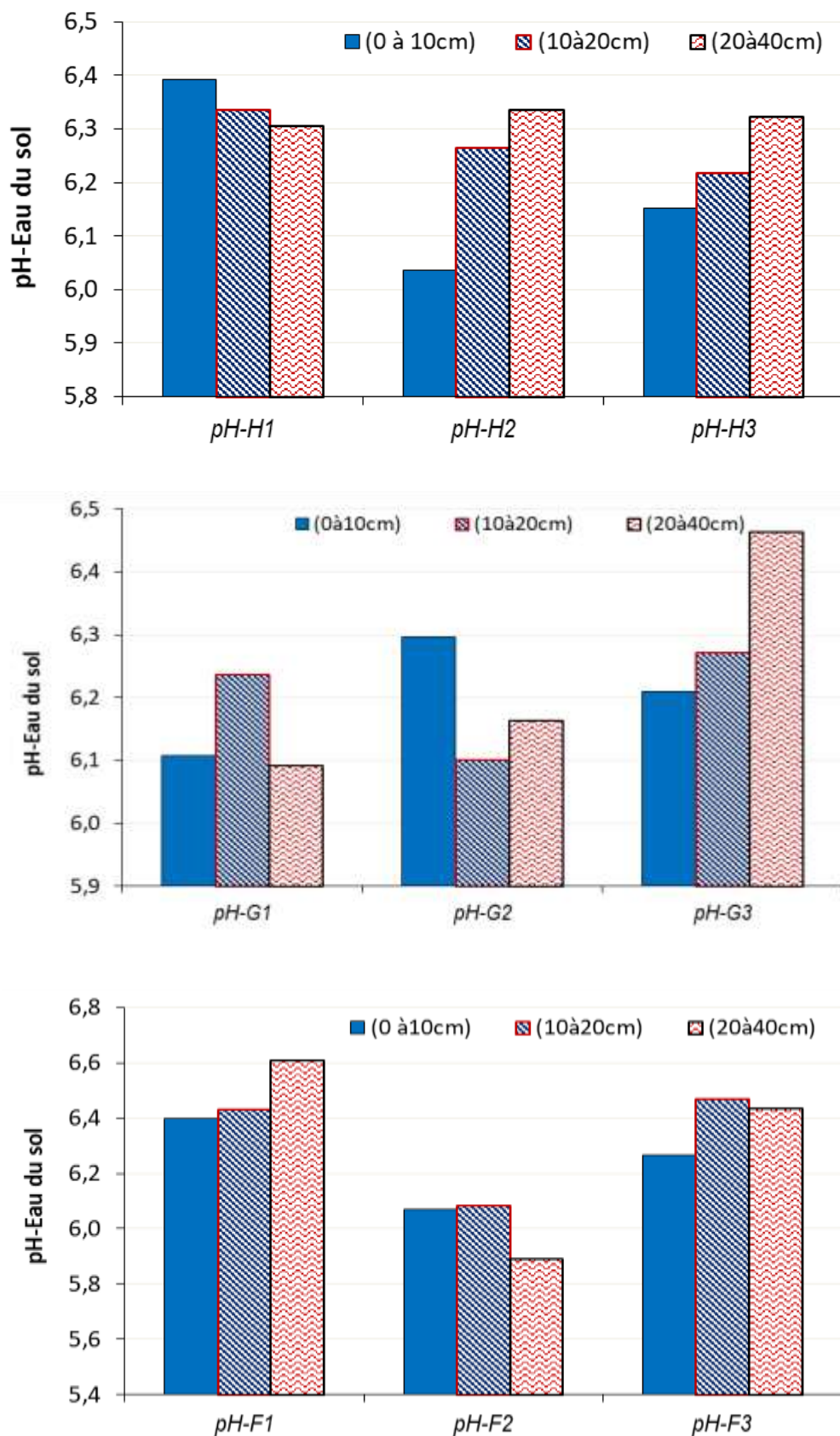


Figure III.1.1 pH-eau dans le sol des sous parcelles en fonction de la profondeur.

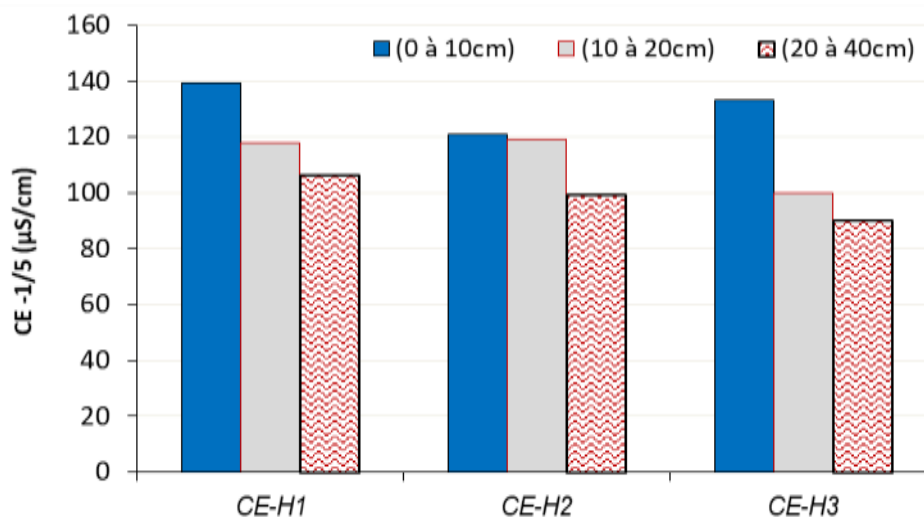
III.1.2 Conductivité électrique

Les résultats de la détermination de la conductivité électrique de l'extrait aqueux (rapport 1/5) des échantillons prélevés de la parcelle étudiée sont portés dans le (Tableau III 2). Les valeurs de la CE enregistrées évoluent de 90.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 148.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, alors que la CE moyenne du sol est de 114.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Tableau III 2 : Conductivité électrique du sol des sous-parcelles en fonction de profondeur

	CE - H	CE - F	CE - G	CE-moye
(0 à 10cm)	131,2	133,8	131,2	126,8
(10 à 20cm)	131,2	131,2	101,7	112,1
(20 à 40cm)	98,7	110,5	107,4	131,2

A l'échelle des sous-parcelles considérée (H, F, G) les valeurs de la CE moyennes déterminées sont variables de 98.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 133.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$.



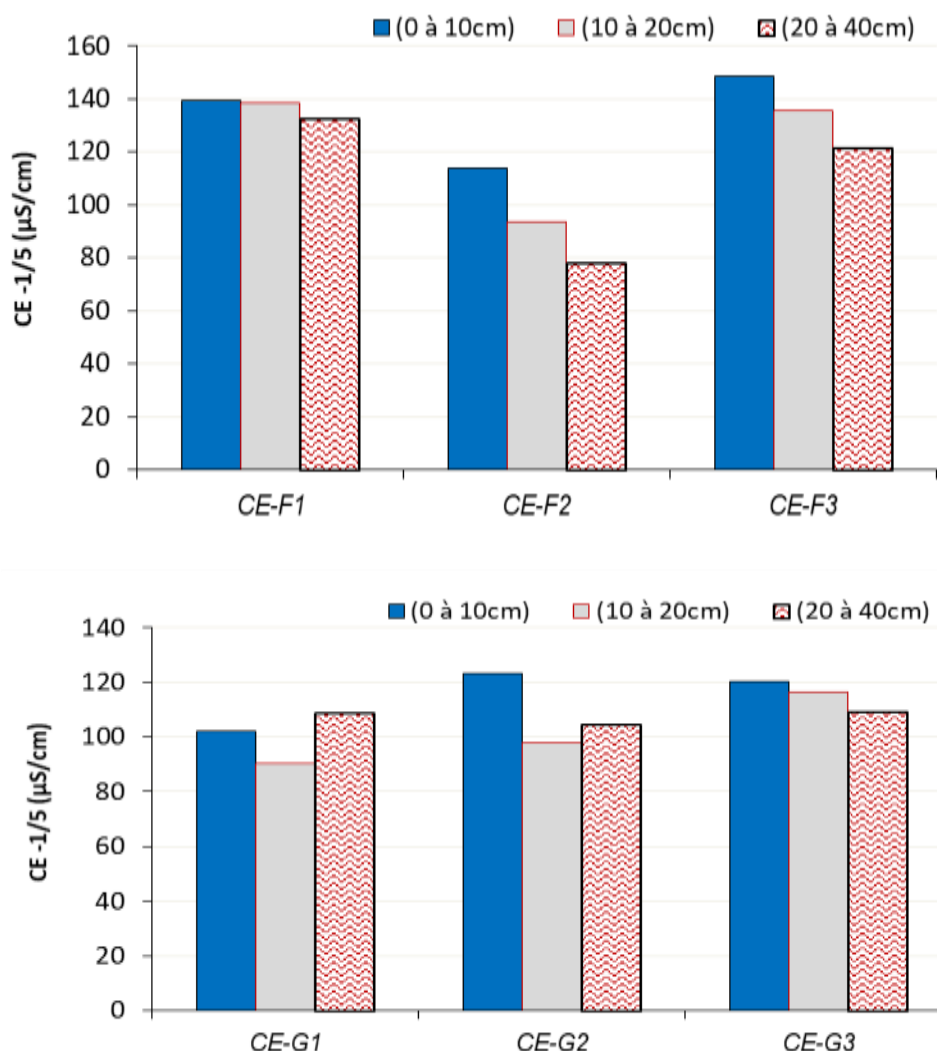


Figure III.2 : CE du le sol des sous parcelles en fonction de la profondeur.

Les résultats d'analyse de BENABBOU ET KADI(2021), dont les travaux ont porté sur 54 échantillons, confirment bien que l'homogénéité de la parcelle sur le plan horizontal. En revanche sur la profondeur (20à40cm), la différence entre la distribution des sels soluble est très hautement significative (BEB ABBOU ET KADI, 2021 ; CHERFOUH ET AL, 2018). Les irrigations pratiquées sur la parcelle apportent au sol des sels dont la distribution reste sous l'influence des doses d'irrigation, des fréquences d'irrigation et de demande climatique.

En effet, cette diminution a été attribuée par certains auteurs à la minéralisation de la MO, à la nitrification de l'ammonium ainsi qu'au lessivage par irrigation du calcaire actif du sol. La diminution du taux de MO et la dissolution des sels et des carbonates inorganiques, les

transferts verticaux des éléments chimiques et aux travaux culturaux de la vigne notamment la fertilisation minérale (engrais potassiques).

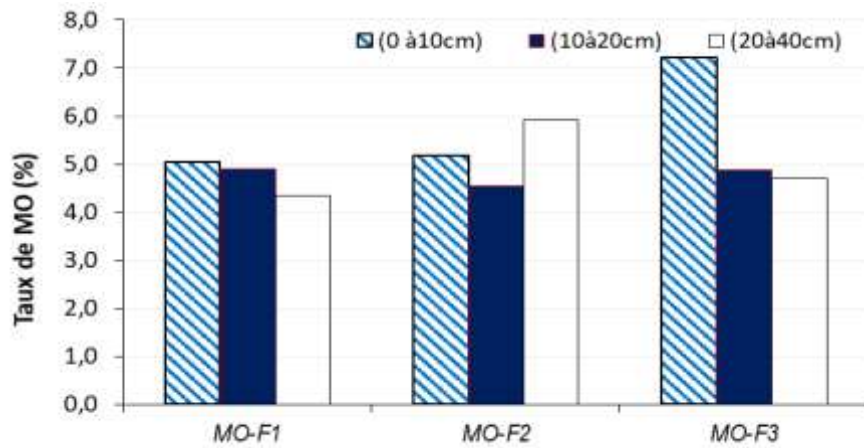
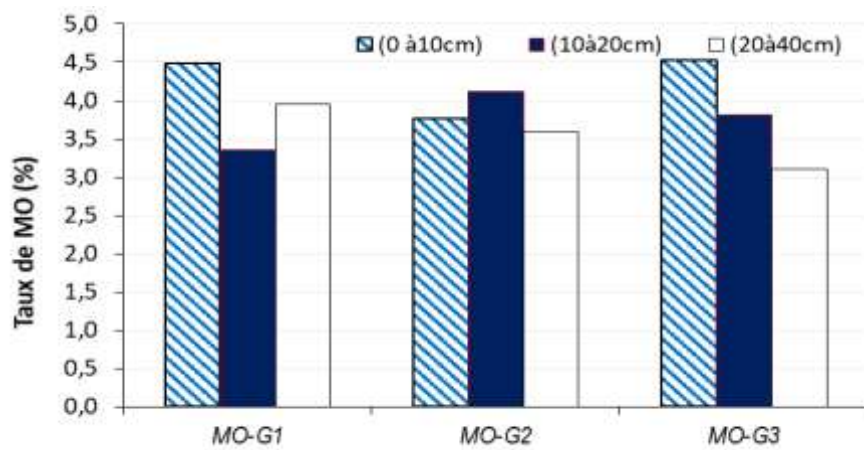
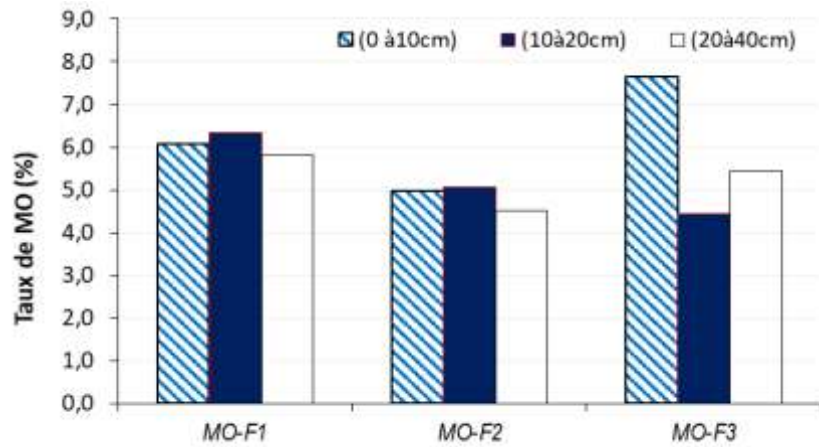
III.1.3 Teneurs en Matières Organiques :

Les résultats de la détermination de la teneur en matière organique du sol des échantillons prélevés de la parcelle étudiée sont portés dans les (Tableaux III.3). Les teneurs en MO enregistrés évoluent de 3.10% à 7.63 %, alors que la teneur moyenne est 4.87%. CHERFOUH ET AL., (2018) notent que l'apport de boues résiduaires et d'eaux usées implique une augmentation des teneurs en matière organique du sol.

Tableau1III.3 : Teneur en matière organique des sous-parcelles en fonction de profondeur.

	SP- H	SP- F	SP- G
0 à 10cm	3,55	4,26	5,81
10 à 20cm	5,28	3,55	4,77
20 à 40cm	5,25	3,55	3,55

La richesse en carbone, en éléments fertilisant et en oligoéléments des EUE stimulent l'activité biologique du sol (MAGESAN ET AL., 2000 ; RAMIRES-FUENTES ET AL., 2002), et favorisant la minéralisation des matières organiques du sol, ce qui entraîne une baisse du taux de MO dans le sol (SOLIS ET AL., 2005 ; HERPINET AL. 2007). Cependant nous constatons que l'évolution des matières organiques en fonction de la profondeur n'est pas identique sur toutes les sous parcelles (H, G et F). Ceci implique que les conditions de dégradation des MO sont variation d'un point à un autre, bien que dans la majorité des points de prélèvement le taux de matières organiques diminue selon la profondeur du sol



FigureIII.3 la teneur en MO du sol des sous parcelles en fonction de la profondeur.

II.2 Interactions entre paramètres analytiques

Les interactions entre les paramètres analytiques mesurés, pH, CE et MO sont illustrées par les figures ci-dessous, qui montrent des corrélations établies par les paramètres sus-cités deux à deux. Les pratiques agricoles de fertilisation et d'amendement peuvent contribuer à modifier profondément les propriétés des sols, notamment le pH et la CEC (PERNES-DEBUYSER ET TESSIER, 2002). Les transformations que subissent les matières organiques et minérales contribuent à modifier significativement les propriétés du sol. La confrontation des résultats, montre que les paramètres de pH, CE et teneur en MO, présentent des corrélations positives et négatives par les valeurs enregistrées dans la profondeur du sol allant de 0 à 40 cm. Le pH et la teneur en matières organiques sont corrélés positivement (figure III.4). Plusieurs auteurs observent que le pH diminue principalement suite à la libération des groupements acides par les matières organiques (CHAMAYOU ET LEGROS, 1989). Il faut noter aussi que le R² (0,02) est faible ceci implique que cette corrélation est peu significative. Ce résultat contredit les observations d'AMMOUR (2021), qui observe que la corrélation pH-MO est négative avec un R² de 0,5.

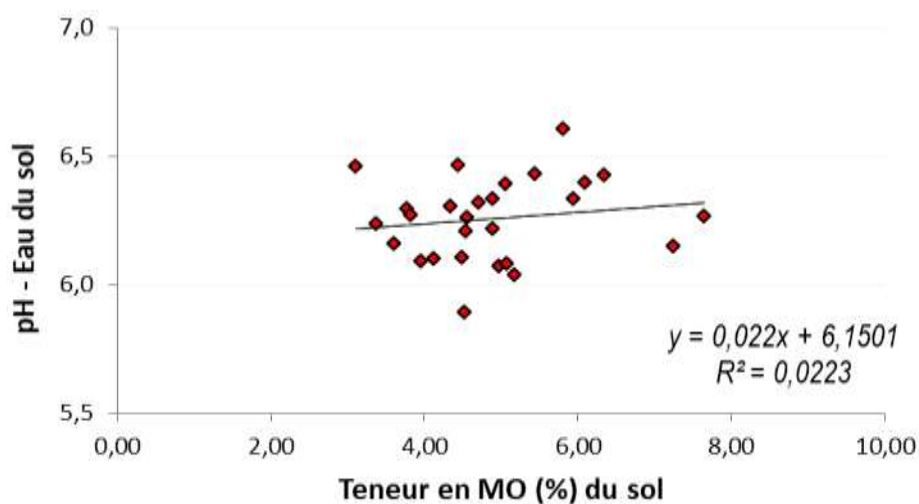


Figure III 4. Corrélations entre les paramètres analytiques : pH-eau et MO du sol

La relation matière organique et CE dans le sol est complexe. Il est certes clair que les matières organiques apportent aux sols des sels solubles suite à sa minéralisation. CHERFOUH ET AL., (2018) notent que les boues résiduaires et les eaux usées participent à la salinisation des sols agricoles. Cependant HALILAT ET KOULL (2016) observent que la croissance des doses des apports de fumiers, ovin et bovin, réduisent la CE du sol. Ces effets, sont le résultat de l'amélioration de la structure, de l'activité biologique et de la porosité qui facilité la percolation des eaux et le lessivage des sels hors du profil (MALLOUHI, 1979).

Nos résultats, montrent une nette corrélation positive entre la teneur en MO et la CE ($R^2 = 0,31$), indiquant que les apports de boues et d'eau usée engendrent un enrichissement en sels solubles de la solution du sol (figure III.5). Cette relation contradictoire entre la MO et la CE est bien confirmée par les résultats de BEN ABBOU ET KADI (2021) et de AMMOUR (2021).

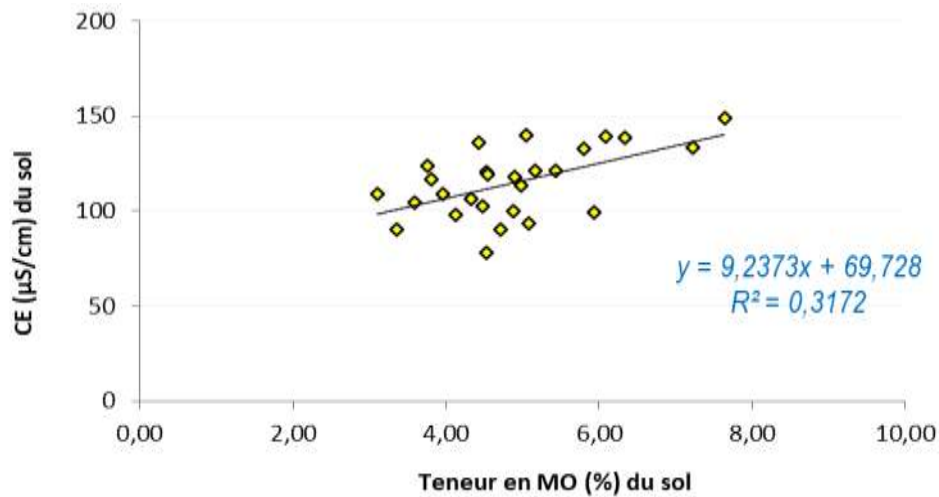


Figure III.5 Corrélations entre les paramètres analytiques : CE et MO du sol

La nature des amendements organiques (acide) et la durée de dégradation sont des paramètres importants dans la réduction du pH du sol. Selon MUSTIN (1987), le pH dépend de la concentration en ions H^+ provenant de l'oxydation du carbone de la matière organique et du processus de nitrification. En revanche l'interaction pH-eau - CE présente une corrélation positive (figure III.6). Le pH du sol affecte la solubilité des sels du sol, ainsi une forte alcalinité des sols contribue à une réduction des quantités de sels solubles dans le sol (PROVIN ET AL., 2001). Les apports de boues résiduelles et d'eau usée contribuent à élever la conductivité électrique de la solution du sol (CHERFOUH ET AL., 2018). Les apports de sels solubles sous forme de carbonates, de chlorures ou de sulfates qui représentent des éléments susceptibles d'alcaliniser la solution du sol.

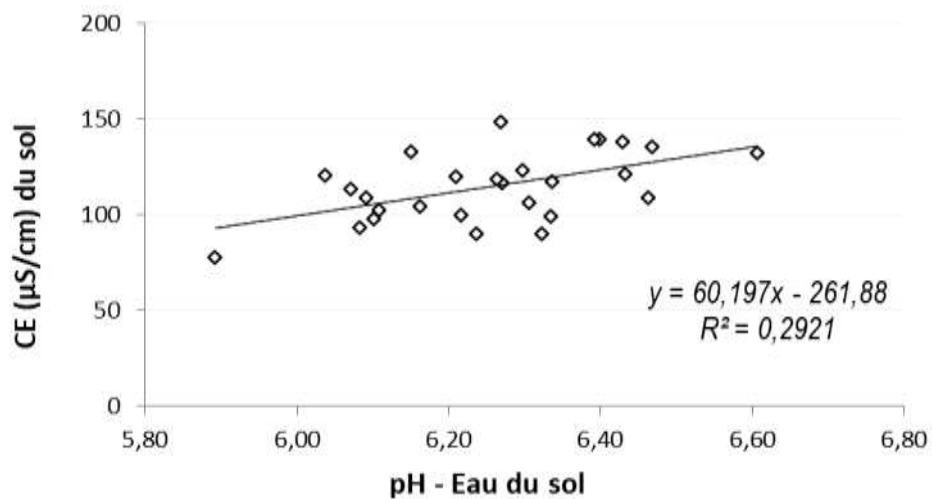


Figure III.6. Corrélations entre les paramètres analytiques : pH-eau et CE du sol

Conclusion Générale

A travers ce travail, nous avons essayé d'étudier l'impact des eaux usées sur quelques propriétés du sol d'une parcelle de vigne dans la commune de Corso, wilaya de Boumerdes. Les eaux usées utilisées sont issues de station d'épuration urbaine de la ville de Boumerdes.

Les paramètres analytiques mesurés permettent de relever globalement que l'apport des eaux usées épurées (EUE) engendre des effets sur les propriétés agronomiques des sols agricoles.

Les résultats d'analyse du pH-eau du sol montrent que notre sol est légèrement acide à neutre, les valeurs varient de 5,89 à 6,61, avec une augmentation en fonction de la profondeur. Ce pH demeure assez convenable à l'ensemble des espèces cultivées.

La conductivité électrique (CE) de notre sol est située entre 90,2 à 148,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. L'irrigation avec les EUE n'a pas influencé la salinité de la parcelle étudiée. Ce sol est considéré non salés, et l'application des EUE n'a aucun effet de salinisation secondaire de la parcelle étudiée.

Concernant le taux de matière organique, les teneurs varient de 3,10% et 7,63%, on constate que le sol étudié est qualifié de très pauvre à riche en matière organique. Cette observation montre que l'irrigation avec les EUE participe à l'amélioration de la teneur en matière organique du sol.

A l'issue de ce modeste travail, il a relevé que certaines conditions comme : Le renchérissement des engrais et la rareté croissante des sources d'amendement organique et la pauvreté des sols, sont des éléments motivants pour le développement de l'utilisation des EUE en agriculteurs. Les résultats obtenus à notre niveau montrent que la valorisation des EUE en agriculture constitue une voie intéressante pour le secteur agricole.

Dans l'objectif d'approfondissement de travail de détermination de l'effet d'irrigation avec les EUE, quelques recommandations pratiques basées sur notre travail peuvent être énoncées :

- ✚ Il est souhaitable de compléter cette étude par d'autres études pour apprécier la fertilité des sols les analyses des éléments majeurs.
- ✚ Une quantification des teneurs en métaux lourds afin d'éviter les risques de pollution des sols, ainsi que les risques de toxicité qu'ils peuvent engendrer sur les végétaux.
- ✚ Une augmentation du nombre d'échantillons à analyser et de parcelle afin d'élucider les effets des EUE selon la variabilité des conditions agro-pédologiques.
- ✚ Avant toute utilisation des EUE, il est souhaitable de quantifier des teneurs en métaux lourds, dans les eaux et dans les sols à fin d'interpréter les risques de pollution des sols, ainsi que les risques de toxicité qu'ils peuvent engendrer sur les végétaux.

Références bibliographique :

- **Amir, S., 2005.** Contribution à la valorisation de boues de stations d'épuration par compostage. Devenir des micropolluants métalliques et organiques et bilan humique du compost. Thèse de doctorat en sciences Agronomiques de l'institut National polytechnique de Toulouse. 312 p.
- **Abdelaziz W. (2006).** Isolement des mycètes producteurs des substances antibactériennes à partir des sols sahariens .Mémoire de Magistère En Microbiologie et Biochimie Appliquées .Université Mentouri. Constantine.
- **Aulicino E. A., Mastrantonio A., Orsini E., Bellucci C., Muscillo M. and Larosa G. (1996).** Enteric viruses in a wastewater treatment plant in Rome. *Water, Air, and Soil Pollution*, 91 327-334P.
- **Ayers R.S., Westcot D.W. (1989).**, Water quality for agriculture, Bulletin FAO d'irrigation et de drainage, No. 29, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. Rév. 1, 174pp.
- **AYERS R.S et WESTCOST D.W, 1985.** Water quality for agriculture. FAO irrigation and drainage paper 29 Rev.
- **ASANO T. (1998):** Wastewater terreclamation and reuse. *Water quality management library*, pp 1475.
- **ABDENNACEUR, H ; BEN RAJEB, A ; HAMDI, K. (2013).** Epuration des eaux usées urbaines par infiltration-percolation.
- **Breulmann G., Forti M. C. Et Melfi A. J., (2007),** Chemical effects on the soil-plant system in a second ary-treated wastewater irrigated coffee plantation- A pilot field study in Brazil. *Agricultural Water Management* 89, 105 – 115.
- **Abbas S.T., Sarfraz M., Mehdi S.M., Hassan G. et Obaid-Ur-Rehman (2007),** Trace elements accumulation in soil and rice plants irrigated with the contaminated water; *Soil& Tillage Research* 94 503–509.
- **Asano T., (1998).** Wastewater reclamation and reuse. *Water quality management library*, 1475-1528 p.
- **Baize, D., Sterckeman, T., (2001),** of the necessity of knowledge of the naturalpedogeochemical background content in the evaluation of the contamination of soils by trace elements. *The Science of the Total Environment* 264 (1–2), 127– 139.

- **Blanc R. and Nasser A. (1996),** Effect of effluent quality and temperature on the persistence of viruses in soil. *Water Science and Technology*, Volume 33, Issues 10-11, 237-242.
- **Belaïd N, Catherine N, Monem K, Tarek A, Abdelmoneim A, Michel B (2012)** Long term effects of treated wastewater irrigation on calcisol fertility: a case study of Sfax-Tunisia. *AgricSci* 3:702–713.
- **Balesdent J., 1996.** Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France. *Etude et gestion des sols*. INRA. (afes). Vol 3 N°4. Paris. pp 245-260.
- **Benabbou Meziane et Kadi Arezki, 2020,** Caractéristiques chimiques d'un sol agricole irrigué avec des eaux usées épurées et amendé avec des boues de station d'épuration, cas d'un vignoble dans la wilaya de Boumerdes mémoire de fin d'étude, UMMTO 32.34.35.p.
- **BAIZE D., 2000-** Guide des analyses en pédologie. Choix_ expression. Présentation interprétation, 2ème édition. INRA. Paris, 255 p.
- **Baumont S., 2004.** *Réutilisation des eaux usées épurées : risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France*, École nationale supérieure agronomique de Toulouse (ENSAT).
- **CALVET R ., (2013)** , Les sol, 2eme édition .France Agricole, Paris, 72-73 p.
- **Calvet, R.** « Le Sol Propriétés Et Fonctions », Tome 1, France Agricole DUNOD, 455 P. (2003).
- **CARBI, S. (2008).**Fosse septique, roseaux, bambous .Traiter écologiquement ses eaux usées.
- **Crowley DE,Kretzschmar R (2006)** Geochemical aspect of phytosiderophore-promoted iron acquisition by plants. *AdvAgron* 91:1–46.
- **CALVET., 2003-**Le sol propriétés et fonctions. Tome I; constitution et structure, phénomènes aux interfaces. Ed. Dunod , France Agricole. 455 p.
- **Campos C., 2008.** New perspectives on microbiological water control for wastewa terrestre, *Désalination*, 218, pp.34-42.
- **CSHPF. (1995).**, Recommandations sanitaires relatives à la désinfection des eaux usées urbaines, 22p.
- **Clément M., PIELTAIN F., (2003).** Analyse chimique du sol .Edition TEC&DOC ,387p.

- **CHAUDE J et LECLE. RC., (1999)** Ecophysiologie végétale, 283p.
- **CAUCHI et al, (1996)** : La réutilisation des eaux usées après épuration. Techniques, sciences et méthodes.
- **Chafouh ; Guernit S, 2015** : Etude l'effet de quelques paramètres physicochimiques des eaux usées de la station WWG sur le comportement des Jonc et Papyrus. Diplôme d'états en écologie environnement. Université Kasdi Merbeh OUARGLA.
- **Cherfouh, R., Lucas, Y., Derridj, A., Merdy, P., 2018.** Long-term, low technicality sewage sludge amendment and irrigation with treated wastewater under Mediterranean climate: impact on agronomical soil quality. Environ Sci Pollut Res 25:35571–35581.
- **Chamayou H. et Legros J.P., 1989.** Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol. Technique vivante. Presses universitaires de France. Paris. pp 212-213.
- **DUCHAUFOR PH., 2001**-Introduction à la science du sol. Végétation et environnement. 6ème édit. Dunod, Paris.331p.
- **DUCHAUFOR PH ., 1980**-Ecologie de l'humification et pédogenèse des sols forestiers Actualité d'écologies forestières sol – faune- flore .Ed .Gouttier-Villare, Manque la localité pp177-202.
- **DUCHAUFOR PH., 1983**- Pédologie. Tom1: pédogenèse et classification. 2ème eddi . Masson, Paris. 491p.
- **DUCHAUFOR PH., 1997**-Abrégé en pédologie: Sol, végétation et environnement. Edition Masson, Paris. 232p
- **DELAUNOIS A., FERRIE Y., BOUCHE M., COLIN C.et RIONDE C., 2009**-guide pour la décrispation et l'évolution de la fertilité des sols, chambre d'agriculture. INRA.37p.
- **D.P.A.T., 2009.** monographie de la wilaya de Boumerdes.
- **Duthil J., 1973.** Elément d'écologie et d'agronomie. Tome II. Exploitation et amélioration du milieu. Ed.J.B. Baillièrè. Paris. 265p.
- **FAO, 2003.** Irrigation avec des eaux usées traitées, Manuel d'utilisation.
- **Faby J.A., et Brissaud F., 1997.** L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation. 283p.
- **Faby J. A, Brissaud. F, 1997** : L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation. Office International de l'Eau. 76p.
- **Faby JA., Brissaud F, 1997.** L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation, Office International de l'Eau, France, 76 p

- **FAO. (2008)**- Les méthodes de production d'alevins de tilapia nilotic ADCP/REP/89/46/ : p120.
- **FAO, (2003)**.L'irrigation avec des eaux usées traitées: *Manuel d'utilisation. Bureau Régional pour le Proche-Orient et Bureau sous-régional pour l'Afrique du Nord*. 11-16 p.
- **GOBAT M.G., ARAGNON M et MATTHEY.Y. W., 2010**- Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols. 3ème édition .s. I: Presse Polytechnique et Universitaire ROMANDES. 817p.
- **GAID, A. (1984)**.Epuration biologique des eaux usées urbaines –TOMEII.216p
- **GOBAT J.M., ARAGNO M et MATTHEY .Y.W. 2003** -le sol vivant 2eme édition, presse polytechniques et universitaires romandes, France, 568 p.
- **GOBAT M.G., ARAGNON M et MATTHEY.Y. W., 2010**- Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols. 3ème édition .s. I: Presse Polytechnique et Universitaire ROMANDES. 817p.
- **Gennaccaro A.L., McLaughlin M.R., Quintero-Betancourt W., Huffman D.E. and Rose J.B. (2003)**. Infectious *Cryptosporidium parvum* oocysts in final reclaimed effluent. *Application. Environment. Microbiology*. 69P, 4983–4984.
- **GOBAT J.M., ARAGNO M et MATTHEY .Y. W., 1998** -le sol vivant bases de pédologie le sol .Ed. Presse polytechniques et universitaires romandes, 519 p.
- **GOBAT .J.M, ARAGNO M Et MATTHEY W** : Le Livre (Le Sol Vivant : Base De Pédologie Et Biologie Des Sols). 3eme Edition Revue Et Augmentée P150-165/2010.
- **Girardin, H., Morris, C. E., Albagnac , C., Dreux, N., Glaux, C. & Nguyen-The, C. (2005)**. Behaviour of the pathogen surrogates *Listeria innocua* and *Clostridium sporogenes* during production of parsley in fields fertilized with contaminated amendments. *FEMS Microbiology Ecology* 54, 287- 295.
- **Grulois. P., Famel, J., Hangouet, J.P et Fayoux, C., 1996**. Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme...en boues, l'eau, l'industrie, les nuisances, 195, pp42-46.
- **Grosclaude, G. (1999)**. L'eau : tome I. Milieu naturel et maîtrise. Ed INRA, Paris.
- **HILLEL D., 1984**- L'eau et le sol. Principes et processus physique. Ed. Louvain-la-Neuve, 288 p.
- **HALITIM A., 1988**- Les sols des régions arides d'Algérie. Ed. O. P. U, Alger. 384p.
- **HELLER R., ESNAULT R et TANCE C., 1993**- Physiologie végétale. 5 Ed. MASSON M, Paris. 294 p.

- **HALITIM A., (1988)**. Les sols des régions arides d'Algérie. Edition .O. P. U, Alger, 384p.
- **Hamdy, A. and Lacirignola, C. (2005)**. (eds.). Coping with Water Scarcity in the Mediterranean: What, Why and How. pp. 89-90.
- **HENIN S., Gras R ET Monnier G., (1969)**. L'état physique du sol et ses conséquences agronomiques. Edition Masson et Cie, paris ,332p.
-
- **Hamoda M.F. (2004)**, Water strategies and potential of water reuse in the south Mediterranean countries. Desalination 165, 31-41.
- **Hamon, R. E., M. J. McLaughlin, R. J. Gilkes, A. W. Rate, B. Zarcinas, A. Robertson, G. Cozens, N. Radford, and L. Bettenay (2004)**, Geochemical indices allow estimation of heavy metal background concentrations in soils, *Global Biogeochem. Cycles*, 18, GB1014,
- **Herpin U., Gloaguen T. V., da Fonseca A. F., Montes C. R., Mendonça F. C., Piveli R. P., Horckmans, L., Swennen, R., Deckers, J., Maquil, R., (2005)**, Local background concentrations of trace elements in soils: a case study in the Grand Duchy of Luxembourg. *Catena* 59 (3), 279–304.
- **Herpin U., Gloaguen T. V., da Fonseca A. F., Montes C. R., Mendonça F. C., Piveli R. P., Breulmann G., Forti M. C. Et Melfi A. J., (2007)**, Chemical effects on the soil-plant system in a secondary treated wastewater irrigated coffee plantation- A pilot field study in Brazil. *Agricultural Water Management* 89, 105 – 115.
- **Jocteur Monrozier L., 2001**. Conséquence de l'anthropisation des sols. Les Boues quels risques, Colloque Marseille, 5 avril 2001. Mounement Nationa de lutte pour l'Environnement.
- **JELLAL.J, (1996)** : la gestion de l'eau. Séminaire à l'école d'ingénieurs Mohamedia Département de Génie civil, Univ.mohammed V. Rabat.
- **KOULL .N . , 2007**-Effet de la matière organique sur les propriétés physiques et chimiques. Mém. Mag. Arg, Univ.K.M-Ourgla, 86p+VI.
- **Kabata-Pendias, A., 2011**. Trace elements in soils and plants. 4th ed. CRC Press Taylor & Francis Group. 405p.)
- **Kabata-Pendias A, Pendias H (2001)** Trace elements in soils and plants, 3rd edn. CRC Press, Boca Raton Kraemer SM,

- **LAMANDE M., 2003-** Effets de l'interaction des pratiques culturales et des communautés Lombriciennes sur la structure du sol et son fonctionnement hydrique. Thèse de Doctorat., E. N. S. A. R, Rennes. 109 p.
- **Lavelle, P. & Spain, A. V. (2001).** Soil ecology: Springer.
- **Ladjel, F., et Bouchefer S. 2005.** « Exploitation d'une station d'épuration à boues activées » Niveau 2, thème, CFMA (centre aux métiers de l'assainissement). BOUMERDES 90p.
- **Louaguenouni Kahina, 2017.** Suivi de la qualité des eaux usées traitées de la STEP de BARAKI pour une réutilisation agricole mémoire de fin d'étude, UMMTO 15-16p.
- **Metahri, M.S. (2012).** Élimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées par des procédés mixtes cas de la STEP est de la ville de Tizi-Ouzou, thèse de doctorat, spécialité : Agronomie, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 21- 23.
- **Mermoud, a. (2001).**cours de physique du sol .Etat de l'eau du sol .école polytechnique Fédérale de lausanne.
- **Martinen, S.K Kettunen, R.H., Rintala, J.A., 2003.** Occurance and removal of organic pollutant in sewageand landfill eachates. The Science of the total environment, p 301, 1-12.
- **Magesan G.N., Williamson J.C., Yeates G.W.et Lloyd-Jones A .Rh., 2000.** Wastewater C :N ratio effects on soilhydraulicconductivity and potentialmechanisms for recoveryBioresourceTechnology 71, 21-27.
- **Magesan G.N., Williamson J.C., Yeates G.W.et Lloyd-Jones A.Rh. (2000),** Wastewater C:N ratioeffects on soilhydraulicconductivity and potentialmechanisms for recovery BioresourceTechnology 71, 21-27
- **Morel, J. 2007 :** Les ressources en eau sur terre : origine, utilisation et perspectives dans le contexte du changement climatique – un tour d'horizon de la littérature.
- **NEBIL, B.2010.** Evaluation des impacts de l'irrigation par les eaux usées traitées sur les plantes et les sols du périmètre irrigué d'El Hajeb-Sfax: salinisation, accumulation et Phytoabsorption des éléments métalliques. Thèse de doctorat *de* l'École Nationale d'Ingénieurs de Sfax.
- **OMS, 2012.** Volume II Utilisation des eaux usées en agriculture. Organisation Mondiale de la Santé, Genève.

- **Paul, E.A., et Clark, F.E., 1996.** Soil microbiology and biochemistry. 2nd edition. Academic Press. San Diego, California (USA), 340.
- **Parr J.F., 1973.** Nature and significance of inorganic transformation in tile drained soil. Soil and fertilizers. N°32. pp 411-415.
- **Pereira, L.S.; Oweis, T.; Zairi, A., 2002.** Irrigation management under water scarcity. Agric. Water Manag. 57: 175-206.
-
- **Quénéa, K., 2004.** Etude structurale et dynamique des fractions lipidiques et organiques réfractaires de sols d'un chrono séquence forêt/maïs (CESTAS, Sud-ouest de la France). Thèse de Doctorat. Université de Paris 6 (France).
- **Robert, M., 1996.** Le sol : Interface dans l'environnement, ressource pour le développement. Paris : Masson. 244 p.
- **Robert, M., 1996.** Le Sol : Interface Dans L'environnement, Ressource Pour Le Développement. Ed. Masson. 244 P.
- **Robert, M.** Le Sol : Interface Dans L'environnement, Ressource Pour Le Développement. Ed. Masson. 244 P. 1996.
- **RAMADE F., 2003-** Eléments d'écologie. 3ème Ed. Dunod, Paris. 690 p.
- **Rodier .J, 2005 :** l'Analyse de l'eau 8ème édition, Dunod Paris.
- **Ramirez-Fuentes E., Lucho-Constantino C., E. Escamilla-Silva et L. Dendooven (2002),** Characteristics, and carbon and nitrogendynamics in soilirrigatedwithwastewater for differentlengths of time; BioresourceTechnology 85, 179–187.
- **Rivière, J.L., 1998.** Evaluation du risque écologique des sols pollués. Lavoisier Tec. et Doc. ed. Paris: Association Record.
- **Robert, M., 1996.** Le Sol : Interface Dans L'environnement, Ressource Pour Le Développement. Ed. Masson. 244 P.
- **Rejsek F. (2002).** Analyse de l'eau : Aspects et règlementaire et technique, Ed : CRDP d'Aquitaine, France, 358 p.
- **Rattan R.K., Datta S.P., Chhonkar P.K., Suribabu K., Singh A.K. (2005),** Long-term impact of irrigation withsewage effluents on heavymetal content in soils, crops and groundwater—a case study. Agriculture, Ecosystems and Environment 109, 310–322
- **SOLTNER D., 2000-** Les bases de la production végétale. Tome 1: Le sol et son amélioration. 22 ème édition. Collection Science et Techniques Agricoles, 472p.
- **Soltner D., 1979.** les bases de la production végétale, le sol.

- **Soltner, D., 2004.** Distribution Liquid Et Voie Métabollique Chez Quatres Bactéries Gramnégative Hydrocarbonoclaste. Variation En Fonction De Sources De Carbone. Docteur De L'université PARIS 6.
- **Solís, C., Andrade, E., Mireles, A., Reyes-Solís, I.E., García-Calderón, N., Lagunas Solar, M.C., Piña, C.U., Flocchini, R.G., 2005.** Distribution of heavymetals in plants cultivated with wastewater irrigated soils during different periods of time. Nuclear instruments & methods in physicsresearch, 1, pp. 351-355
- **Solis C., Andrade E., Mireles A., Reyes-Solis I.E., Garcia-Calderon N., Lagunas-Solar M.C., Ramirez-Fuentes E., Lucho-Constantino C., E. Escamilla-Silva et L. Dendooven (2002),** Characteristics, and carbon and nitrogen dynamics in soil irrigated with wastewater for different lengths of time; Bioresource Technology 85, 179–187.
- **Solis C., Andrade E., Mireles A., Reyes-Solis I.E., Garcia-Calderon N., Lagunas-Solar M.C., Pina C.U. et Flocchini R.G., (2005),** Distribution of heavymetals in plants cultivated with wastewater irrigated soils during different periods of time. Nuclear Instruments and Methods inPhysicsResearch B 241, 351–355.
- **SUAREZ D.L., JAMES D. WOOD, SCOTT M. LESCH, (2006),** Effect of SAR on water infiltration under a sequentialrain–irrigation management system. Agricultural water management 86,150 – 164.
- **Thomas, D., Sumberg, J. E. (1995).** A review of the evaluation and use of tropical forage legumes in sub-Saharan Africa. Agriculture, Ecosystems and Environnent, 54, 151-163.
- **Toze S., 1999.** *PCR and the detection of microbial pathogens in water and wastewater.* Water Resources. 33: 3545--3556.
- **Thomas, O. (1955).** *Météorologie des eaux résiduaires,* Tec et Doc, Ed Lavoisier, Cedeboc, 135-192.
- **TOZE, S; 2006:** Reuse of effluent water-benefits and risksAgric Water Manage 80.
- **USDA. 1954-** Keys to soil taxonomy.332p.
- **VILAGINES, R. (2003).**Eau ; environnement et santé publique .63p
- **Yadav RK, Goyal B, Sharma RK, Dubey SK et Minhas PS. (2002),** Post-irrigation impact of domesticsewage effluent on composition of soils, crops and groundwater—A case study. Environmental International 28: 481–486.

Annexe 1 : Matière organique (MO)

Tableau 1 : Normes d'interprétation

Taux de MO	< 1	1 à 2	2 à 4	> 4
Appréciation	très pauvre	pauvre	moyenne	riche

Source :(I.T.A 1977)

Tableau 2: Classification des teneurs en matière organique (MO) dans le sol.

MO (%)	Sol
< 1%	Taux très faible; sol très pauvre en MO.
1,2%	Taux faible; sol pauvre en MO.
2,4%	Bonne; sol riche en MO.
>4%	Très bonne; sol très riche en MO.

(DEJON et al, 1998 in Tir 2001).

Annexe 2 : Conductivité électrique (CE)

Tableau 3 : Normes d'interprétation de l'état de salinité d'un sol (LAMBRT, 1975).

Résultats CE (mmhos/cm en 25 C°)	<1	0.2	0.5	0.5-1	1>
Interprétations	Très faible	Faible à moyenne	Moyenne à élevée	Très élevée	Très forte salinité