



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Hadj Lakhdar-Batna 1
Institut des Sciences Vétérinaires et des Sciences Agronomiques



Département des Sciences Agronomiques

Thèse en vue de l'obtention du Diplôme de

Doctorat des Sciences

Option : Sciences du sol

Thème



***Utilisation des boues résiduaires en
agriculture : effet sur la qualité du
sol.***

Présentée par : M^{me} Kourtel Ghanem Nadra

Devant le jury d'examen composé de :

Président : *Abdesselam Salah* : MCA.,

Université Batna 1

Encadreur : *Kribaa Mohammed*, Professeur

Université OEB

Examineur : *Bensaid Rabah*, Professeur

Université de Skikda

Examineur : *Sbih Mahtali*, MCA.

Université Batna

Examineur : *Rouag Noureddine*, MCA.

Université Sétif 1

Examineur : *Mesmoudi Ali* : MCA.

Université Biskra

Année universitaire 2017/2018

Remerciements

Ce travail achevé grâce au bon créateur Allah El hamdou li elleh.

*Je tiens dans un premier temps à remercier Monsieur **Kribaa Mohammed** Professeur à l'université d'Oum El Bouaghi, pour m'avoir confié ce travail de recherche, ainsi que pour son aide et ses précieux conseils au cours de ces années.*

*Je remercie également Monsieur **Hallaire Vincent** Professeur à l'INRA UMR de Rennes pour sa sympathie, sa confiance ses idées et conseils. Je le remercie pour son aide précieuse et pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire et m'avoir guidé dans le domaine de l'analyse d'image. Sa disponibilité ses conseils son respect, m'ont énormément touché. Mille mercis Mr Hallaire.*

*Je tiens à remercier **Mr Benard Yannick** à l'INRA pour sa procédure à l'imprégnation des échantillons sans lui ce travail n'a pu voir le jour. Je n'oublierai jamais son aide. Aussi sans oublier toute l'équipe du centre pour leur chaleureux accueil.*

*J'aimerais adresser un remerciement particulier à toute l'équipe de la faculté des Sciences de la nature et de la Vie de Fisdis spécialement à Mr le Doyen ; **Chafaa Smail** et la Vice doyen ; **Nouri Lilia** pour l'aide attribuée pour accomplir le stage pratique à L'INRA de RENNES ainsi que pour leurs confiances et leurs soutiens. Un grand merci à Monsieur **Si Bachir** pour son soutien, sa gentillesse et toute sa sympathie.*

*Mon énorme gratitude à **Mr Bennoune Omar** ; Responsable de la post graduation à l'institut des sciences Vétérinaires et Agronomiques pour son aide et sa gentillesse. Sans oublier Mr Ben Massouad pour son soutien et son suivi.*

*Mes très grands remerciements à **Mr Abdesselem Salah** ; Maître de conférence à l'Université Batna 1 pour avoir accepté de présider mon jury.*

*Je remercie également **Mr Ben Said Rabe**h ; Professeur à l'Université de Skikda et parmi mes meilleurs enseignants durant ma formation, d'avoir accepté de juger ce modeste travail.*

*Aussi je tiens à remercier **Mr Sbih Mahtali**, MCA à l'Université Batna 1, **Mr Rouag Noureddine**, MCA à l'Université de Sétif 1 ainsi que **Mr Mesmoudi Ali** MCA à l'Université de Biskra pour leurs acceptation d'examiner et juger ce travail.*

J'adresse aussi mes sincères remerciements à toutes les personnes qui de près ou de loin ont contribué à me faire avancer tout au long de ce chemin.

Table de matières

Remerciements

Table de Matières

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| Index des figures..... | 3 |
| Index des tableaux..... | 5 |
| Index des photos..... | 7 |
| Glossaires..... | 8 |
| Introduction générale..... | 10 |

Chapitre I : Etude du milieu naturel

| | |
|--|----|
| I.1. Introduction..... | 13 |
| I.2. La plaine d'El Madher..... | 13 |
| I.2.1. Situation géographique et administrative..... | 13 |
| I.2.2. Géologie..... | 15 |
| I.2.3. Pédologie..... | 16 |
| I.2.3.1. Les sols alluviaux basiques..... | 16 |
| I.2.3.2. Les sols insaturés humifères..... | 16 |
| I.2.3.3. Les sols calcaires humifères..... | 16 |
| I.2.3.4. Les sols calciques..... | 16 |
| I.2.4. L'hydrographie..... | 17 |
| I.2.5. Le climat..... | 17 |
| I.3. La région de Ouled Si Slimane..... | 18 |
| I.3.1. Situation géographique et administrative..... | 18 |
| I.3.2. Géologie..... | 18 |
| I.3.3. L'hydrographie..... | 18 |
| I.3.4. Le Climat..... | 19 |
| I.4. Conclusion..... | 19 |

Chapitre II : Caractérisation des boues résiduaires issues de la station d'épuration de la ville de Batna

| | |
|---|----|
| II.1. Introduction..... | 20 |
| II.2. La station d'épuration de la ville de Batna..... | 20 |
| II.3. Caractérisation des eaux usées de la STEP de Batna..... | 22 |
| II.4. Possibilité d'utilisation des eaux de l'oued El-Gourzi dans l'irrigation..... | 26 |
| II.5. Caractérisation des boues résiduaires de la STEP et leur possibilité d'utilisation..... | 27 |
| II.6. Conclusion..... | 29 |

Chapitre III : Etude de l'effet des eaux résiduaires sur les caractéristiques chimiques et biologiques (lombrics) des sols des terrains cultivés

| | |
|--|----|
| III.1. Introduction..... | 30 |
| III.2. Matériels et méthodes..... | 31 |
| III.2.1. Sélection et description des sites d'échantillonnage..... | 31 |
| III.2.2. Méthodes d'échantillonnage..... | 33 |

| | |
|---|-----------|
| III.2.3. Méthodes d'analyse des propriétés chimiques du sol..... | 33 |
| III.2.4. Méthodes d'étude des vers de terre..... | 33 |
| III.3. Résultats et discussion..... | 34 |
| III.3.1. Caractéristiques chimiques du sol..... | 34 |
| III.3.2. Caractéristiques biologiques de la communauté lombricienne..... | 37 |
| III.4. Conclusion..... | 42 |
| Chapitre IV : Impact des eaux usées sur les caractéristiques physiques et hydrodynamiques du sol | |
| IV.1. Introduction..... | 43 |
| IV.2. Méthodes d'échantillonnage du sol..... | 44 |
| IV.3. Méthodes d'analyses des caractéristiques physiques du sol..... | 45 |
| IV.4. Méthodes d'analyses des caractéristiques hydrauliques du sol..... | 48 |
| IV.5. Résultats et discussion..... | 49 |
| IV.5.1. Caractéristiques physiques du sol..... | 49 |
| IV.5.1.1. La stabilité structurale..... | 49 |
| IV.5.1.2. La porosité totale..... | 49 |
| IV.5.1.3. La macroporosité..... | 50 |
| IV.5.1.4. La mésoporosité..... | 53 |
| IV.5.2. Caractéristiques hydrodynamiques du sol..... | 56 |
| IV.6. Conclusion..... | 58 |
| Chapitre V : Interactions entre les caractéristiques du sol sous les conditions d'irrigation par les eaux usées | |
| V.1. Introduction..... | 59 |
| V.2. ACP paramétrique des résultats obtenus..... | 59 |
| V. 3. Corrélation entre les caractéristiques des vers de terre et la porosité %..... | 60 |
| V. 4. ACP des paramètres de porosité et des vers de terre..... | 62 |
| Chapitre VI : Essai expérimentale (in vitro) des effets des boues résiduaire sur les caractéristiques du sol en présence d'une culture | |
| VI.1. Introduction..... | 64 |
| VI.2.1. Matériels et méthodes..... | 64 |
| VI.2.2. Dispositif expérimentale..... | 66 |
| VI.3. Résultats et discussion..... | 67 |
| VI.3.1. Compartiment sol | 67 |
| VI.3.2. Compartiment végétal..... | 71 |
| VI.3.3. Analyse en composantes principales..... | 74 |
| VI.4. Conclusion | 75 |
| Conclusion générale..... | 76 |
| Références bibliographiques..... | 80 |
| Résumés..... | 92 |
| Annexes..... | 95 |

Index des figures

| | Page |
|--|-------------|
| Figure I. 1 : Cartes de location des deux régions de l'étude (El Madher et Ouled Si Slimane) | 14 |
| Figure II.1 : Graphiques des caractéristiques physico-chimiques des eaux usées de Oued El Guourzi en cinq points de prélèvement (Avril 2015)..... | 24 |
| Figure III.1 : Histogrammes des valeurs moyennes des caractéristiques chimiques des sols des différents sites de l'étude..... | 36 |
| Figure III.2 : Histogrammes de l'abondance et de biomasse des vers de terre dans les sols des différents sites de l'étude..... | 39 |
| Figure III.3 : Pourcentage de l'abondance de vers de terre dans les sols des sites d'étude..... | 39 |
| Figure III.4 : Pourcentage global de l'abondance et la biomasse spécifique des vers de terre..... | 39 |
| Figure III.5 : Moyenne de l'abondance des catégories écologiques de vers de terre dans les différents sites de l'étude..... | 41 |
| Figure III.6 : Abondance des catégories écologiques des vers de terre dans les sites des sols étudiés..... | 41 |
| Figure IV.1 : Histogrammes des caractéristiques physiques (P%) totale et Is dans les sols des différents sites de l'étude..... | 51 |
| Figure IV.2 : Moyennes de la macroporosité dans les sols des sites étudiés..... | 52 |
| Figure IV.3 : Répartition des trois catégories de classes des macropores dans les sols des sites étudiés..... | 53 |
| Figure IV.4 : Moyennes de mésoporosité dans les sols des sites étudiés..... | 54 |

| | |
|---|----|
| Figure IV.5 : Répartition des trois classes de catégorie de mésoporosité dans les sols des sites étudiés..... | 54 |
| Figure IV.6 : Histogrammes des caractéristiques hydrodynamiques des sols (Ksat (h)) dans les différents sites de l'étude..... | 57 |
| Figure V.1 : ACP de l'interaction entre les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol..... | 60 |
| Figure V.2 : Dispersion des individus dans le plan PCA 1-2 effectuée sur des paramètres de porosité quantifiés par analyse d'image et les caractéristiques de vers de terre..... | 63 |
| Figure VI. 2 : Valeurs de Dapp (g/cm ³) et de Is du sol des pots avec et sans vers de terre à différents traitements d'irrigation..... | 69 |
| Figure VI. 3 : Valeurs moyennes de conductivité hydraulique à saturation à différentes pression d'eau dans le sol des pots avec et sans vers de terre à différents traitements d'irrigation..... | 70 |
| Figure VI.4 : Valeurs moyennes de conductivité hydraulique à saturation à différentes pressions d'eau dans le sol des pots avec et sans vers de terre..... | 70 |
| Figure VI. 5 : Moyennes de la longueur de la partie aérienne, de la partie souterraine ainsi que la 3 ^{eme} feuille du blé après 30 jours dans les pots avec et sans vers de terre à différents traitements d'irrigation..... | 72 |
| Figure VI.6 : Plan principal de l'ACP effectuée sur l'ensemble des variables mesurées de l'essai expérimental..... | 74 |

Index des tableaux

| | Page |
|---|-------------|
| Tableau II.1: Valeurs des caractéristiques d'eaux usées de l'effluent Oued El Guourzi en cinq points de prélèvements (Avril 2015) | 23 |
| Tableau II.2: Valeurs de l'azote, du phosphore, des métaux lourds (ETM) et des teneurs en agents pathogènes à partir de 7 points d'échantillonnage des eaux usées dans l'effluent El Gourzi, de l'amont vers l'aval selon Tamrabet (2011)..... | 23 |
| Tableau II.3 : Caractérisation des boues d'épuration de la STEP de Batna (Résultats fournis par la STEP, 2015) | 28 |
| Tableau III.1 : Classification texturale des sols des sites d'échantillonnage dans les régions d'El Madher et Ouled Si Slimane..... | 32 |
| Tableau III.2: Caractéristiques des pratiques culturales dans les sites choisis dans les régions étudiées d'El Madher et Ouled Si Slimane..... | 32 |
| Tableau III.3 : Résultats de l'analyse statistique des caractéristiques chimiques dans les différents sites de l'étude..... | 35 |
| Tableau III.4 : Résultats de l'analyse statistique des caractéristiques des vers de terre dans les différents sites de l'étude..... | 38 |
| Tableau IV.1 : Échantillonnage des blocs prélevés pour les images analysées à partir des sols dans les deux régions (Ouled Si Slimane et El Madher)..... | 45 |
| Tableau IV.2 : Classes de catégories morphologiques des macro et mésopores..... | 48 |
| Tableau IV.3 : Résultats de l'analyse statistique des caractéristiques physiques dans les sols des différents sites de l'étude..... | 51 |
| Tableau IV.4 : Résultats des différentes catégories de classes des macropores % dans les sols des sites de l'étude..... | 55 |
| Tableau IV.5 : Résultats des différentes catégories de classes des mésopores % dans les sols des sites de l'étude..... | 55 |

| | |
|---|----|
| Tableau IV.6 : Résultats de l'analyse statistique des caractéristiques hydriques dans les différents sols des sites de l'étude..... | 57 |
| Table V.1 : Valeurs représentatives de corrélation de Pearson à un niveau de signification $\alpha = 0,05$ entre les paramètres de macroporosité% et les caractéristiques des vers de terre..... | 61 |
| Table V.2 : Valeurs représentatives de corrélation de Pearson à un niveau de signification $\alpha = 0,05$ entre les paramètres de mésoporosité% et les caractéristiques des vers de terre..... | 61 |
| Tableau VI.1 : Caractéristiques physico-chimiques du sol utilisé..... | 65 |
| Tableau VI.2 : ANOVA des caractéristiques physiques du sol dans les 06 différents traitements de l'essai..... | 68 |
| Tableau VI.3 : ANOVA des caractéristiques végétale du blé dans les 06 différents traitements de l'essai..... | 73 |

Index des photos

| | Page |
|---|-------------|
| Photo I.1 : Oued El Gourzi (Google Earth, Ghanem N. 2017)..... | 15 |
| Photo I.2 : Photo de la région d'étude de Ouled Si Slimane (Google Earth, Ghanem 2017)..... | 19 |
| Photo II.1 : La STEP de Batna (Ghanem N., 2017)..... | 21 |
| Photo II.2 : Localisation des points de prélèvement des échantillons d'eaux usées de l'effluent de Oued El Gourzi..... | 23 |
| Photo VI.1 : Echantillonnage d'un bloc de sol à structure conservée..... | 44 |
| Photo IV.2. Photo IV.2. Acquisition d'images à partir des blocs du sol du site S1 (A1, A2, A3) et leurs traitement avec le logiciel GIP (B1, B2, B3) pour binarisation, puis avec le logiciel Visilog (C1, C2, C3) pour étude de la porosité..... | 47 |
| Photo V.2 : Image des galeries occupées par les vers de terre juvéniles dans le sol du site S2..... | 61 |
| Photo VI.1 : Dispositif de l'essai mis en place..... | 66 |

Abréviations utilisées

STEP : station d'épuration des eaux

ADE : Algérienne des eaux

C.E. : conductivité électrique

MES : matières en suspension

DBO₅ : demande biochimique en oxygène après 5 jours d'incubation

DCO : demande chimique en oxygène

TEM ou ETM : Eléments Trace Métalliques

OMS : Organisation nationale de la santé

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

TAC : Titre Alcalimétrique Complet

TH : Titre Hydrotimétrique

TDS : Total des Solides Dissous

NtK : total d'Azote par la méthode Kjeldahl

S : site

MO : matière organique

CaCO₃% tot : CaCO₃% total

CaCO₃% act: CaCO₃% actif

tot: totale

Ind/m²: individus/m²

Abd: abondance

adt: adulte

juv : juvénile

end : endogées

epig : épigées

ane : anécique

biom/bio : biomasse

Ap. : *Aporrectodea*

A.: *Allolobophora*

P. : *Proctodrilus*

Ei. : *Eiseniella*

Oc. : *Octodrilus*

ant : *antipae*

cal : *caliginosa*

P. *corethrurus* : *Pontoscolex corethrurus*

M. *posthuma* : *Metaphire posthuma*

ANOVA : Analyse de variance

Da/ Dapp : Densité apparente

P : porosité

K sat : la conductivité hydraulique à la saturation

(h) : pression appliquée

kPa : kilo pascal

Is : Indice de stabilité

Mcp : macroporosité

Msp : mésoporosité

ACP : Analyse en composante principale

H sat : humidité à saturation

PA : partie aérienne du végétal

PS : partie souterraine du végétal

3^{eme} F: feuille

L : longueur

Introduction générale

La population souffrant de la pénurie d'eau représente actuellement 11% de la population mondiale totale, celle-ci sera de 38% en 2025 et de 50% de la population mondiale totale en 2050 (Jiménez et Asano, 2008). Avec l'accent croissant sur l'industrialisation et l'urbanisation, le système d'égout est devenu d'autant plus important pour l'élimination des eaux usées et d'autres matériaux de la société (Kirkham, 1974; Larsen et *al.*, 1975; Arora et *al.*, 1985). La pénurie d'eau devient de plus en plus l'un des principaux défis mondiaux. Le déclin de la disponibilité de l'eau atteint un niveau qui pourrait conduire à des crises à long terme au Moyen-Orient et en Afrique du Nord (Heidarpour et *al.*, 2007). L'eau est une ressource naturelle très limitée et nécessaire à toutes activités socioéconomiques. Cette ressource est limitée en raison du climat, surtout dans les régions semi-arides à arides. Faisant partie de cette région, la région de Batna a un potentiel hydrique relativement limité et aléatoire (MRE, 2001). Les précipitations sont faibles et irrégulières. Ce qui fait que l'eau est une ressource de plus en plus rare et de moins en moins renouvelable. Elle fait actuellement l'objet d'une exploitation concurrentielle selon les besoins de la population. Ainsi, la croissance démographique, la croissance économique et la fréquence d'apparition des épisodes de sécheresse ont entraîné l'augmentation des besoins en eau et une pression accrue sur les ressources en eau conventionnelles. Pour la population de Batna, en croissance, les ressources renouvelables en eau sont de l'ordre de 550 m³/an par habitant (Lehtihet, 2005). Cependant, les ressources en eau sont confrontées à des problèmes de quantité et de qualité. Les eaux usées peuvent contenir toutes sortes de déchets minéraux et organiques (de la terre, des boues, des sables, de l'herbe, des pailles, des feuilles, des graines, etc.) et des micropolluants (hydrocarbures, pesticides, détergents, huiles, débris microscopique de caoutchouc, etc.). Par ailleurs, les rejets industriels résultent d'une utilisation de l'eau autre que domestique. Cette définition concerne les rejets des usines, mais aussi les rejets d'activités artisanales ou commerciales (blanchisserie, restaurant, laboratoire d'analyses médicales, etc.).

La variété des eaux usées industrielles est très grande. Certains de ces eaux sont toxiques pour la flore, la faune et l'homme. Ces rejets peuvent donc suivre plusieurs voies d'assainissement (avec ou sans traitement). L'ensemble de ces eaux usées nécessite des traitements adéquats dans des installations appropriées. Différentes méthodes sont utilisées

telles que la méthode des boues activées, l'utilisation des algues fixatrices pour éliminer certains métaux lourds, méthodes de stockage et traitement suivies d'utilisation directe ou d'épandage dans la nature (Tamrabat, 2011).

Toutefois, les agriculteurs considèrent ces eaux usées comme une ressource régulière, riche en éléments fertilisants et gratuite et l'interdiction n'est pas respectée. La pratique d'irrigation n'est pas faite dans des conditions convenables ; soumettant ainsi le consommateur et l'agriculteur à des risques de contaminations chimiques et microbiologiques considérables. En effet, les effluents urbains sont riches en microorganismes pathogènes qui peuvent facilement nuire à la santé publique. En plus des éléments métalliques nocifs qui peuvent engendrer la dégradation de la qualité des sols et par conséquent la santé humaine.

L'utilisation de l'eau usée traitée dans les stations d'épuration devient un instrument de préservation de cette ressource (OMS, 1989). Cependant, l'accroissement du nombre de ces stations en Algérie s'accompagne de production de quantités non négligeables de boues d'épuration. Dans le contexte actuel de protection de l'environnement, l'élimination des boues d'épuration constitue un des enjeux majeurs pour notre pays. Leur valorisation sera donc un moyen de réduction de la pollution résiduelle engendrée par les activités d'assainissement. Ces boues d'épuration sont une source potentielle de matière organique utilisable. Elles contiennent aussi des macro et des micro-éléments essentiels pour la croissance des plantes. En effet, leur utilisation agricole répond, d'une part, au besoin en matière organique et d'autre part, aux potentialités du sol en tant que système épurateur et de recyclage. Dans les conditions des sols de la région de Batna, les sols y sont squelettiques et pauvres en éléments nutritifs indispensables à la vie des plantes, que leur fertilité naturelle est moindre, ce qui limite la mise en culture des terres si on ne manifeste aucun travail d'amélioration envers ces sols. L'utilisation des boues produites au sein des stations d'épuration des eaux usées urbaines s'avère une alternative pour l'amélioration des propriétés physicochimiques des sols.

Dans ce contexte assez vaste, notre travail s'est articulé en visant plusieurs éléments à partir de l'étude des effets des eaux résiduaires partiellement traitées et provenant de la station d'épuration de la ville 'STEP' sur les propriétés physiques, physico-chimiques et biologiques des sols dans la région de Batna. Ensuite nous avons établi une chaîne d'expérimentation

pouvant mettre en relief l'effet des eaux usées et les boues provenant de cette station sur quelques qualités agronomiques du sol.

Notre travail sera donc reparti en 6 chapitres :

- Le premier chapitre concerne une étude du milieu naturel choisis pour faire une comparaison entre une irrigation avec des eaux résiduaires et une irrigation avec des eaux naturelles.
- Le deuxième chapitre a été consacré à la caractérisation des boues solides et liquides issus de la station d'épuration de la région d'étude utilisées par les agriculteurs à des fins agricoles.
- Le troisième chapitre est consacré à une étude des caractéristiques chimiques et biologiques des sols sous irrigation avec des eaux résiduaires.
- Le quatrième présente éventuellement une étude des caractéristiques physiques et hydrodynamiques des sols sous irrigation avec des eaux résiduaires.
- Le cinquième présente une étude de corrélations et d'interactions paramétriques des caractéristiques étudiées sous les différentes conditions étudiées.
- Finalement l'étude effectuée sur terrain est complétée par des essais expérimentaux aux laboratoires mettant aux points les résultats acquis.

Chapitre I : Etude du milieu naturel

I.1. Introduction

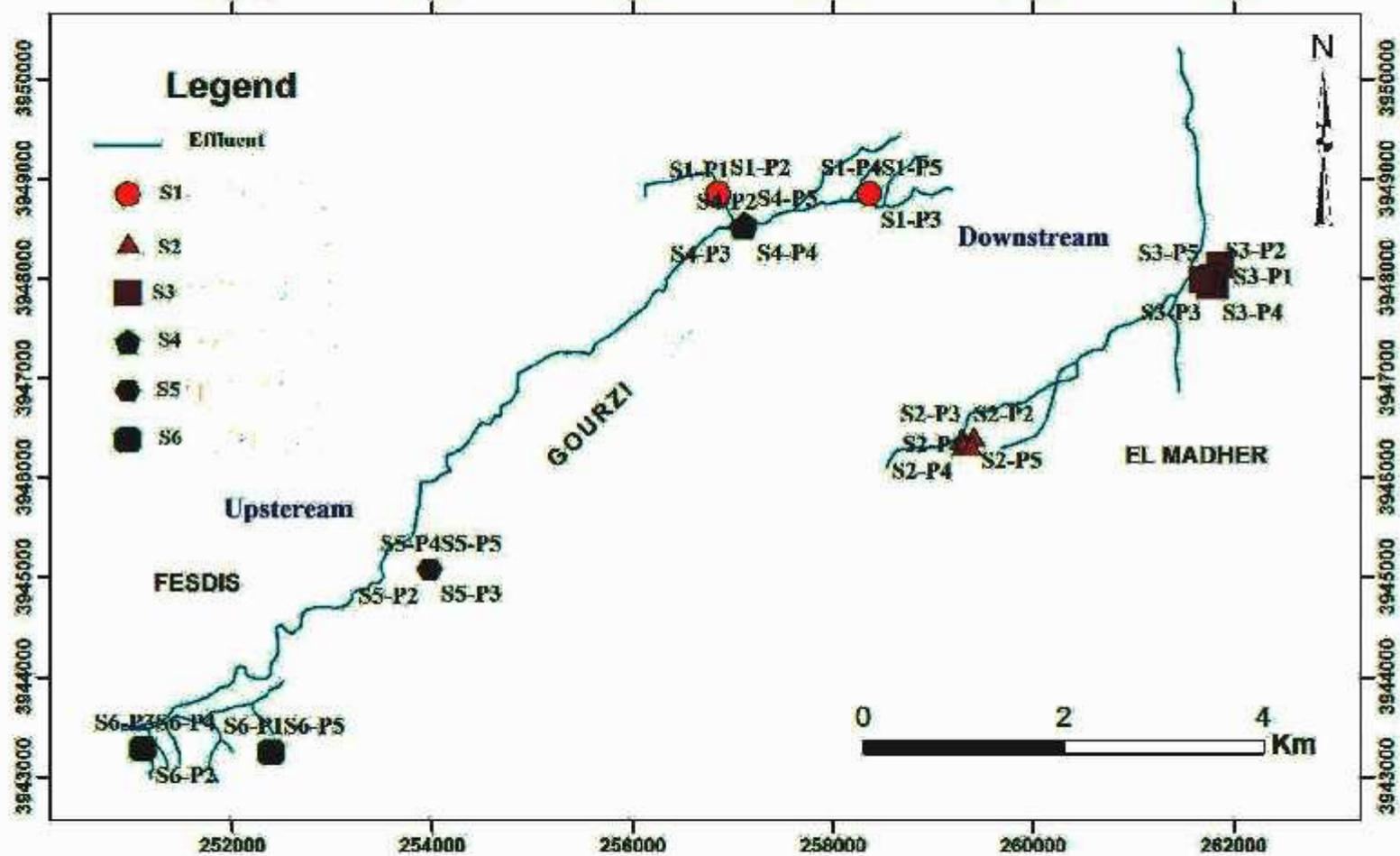
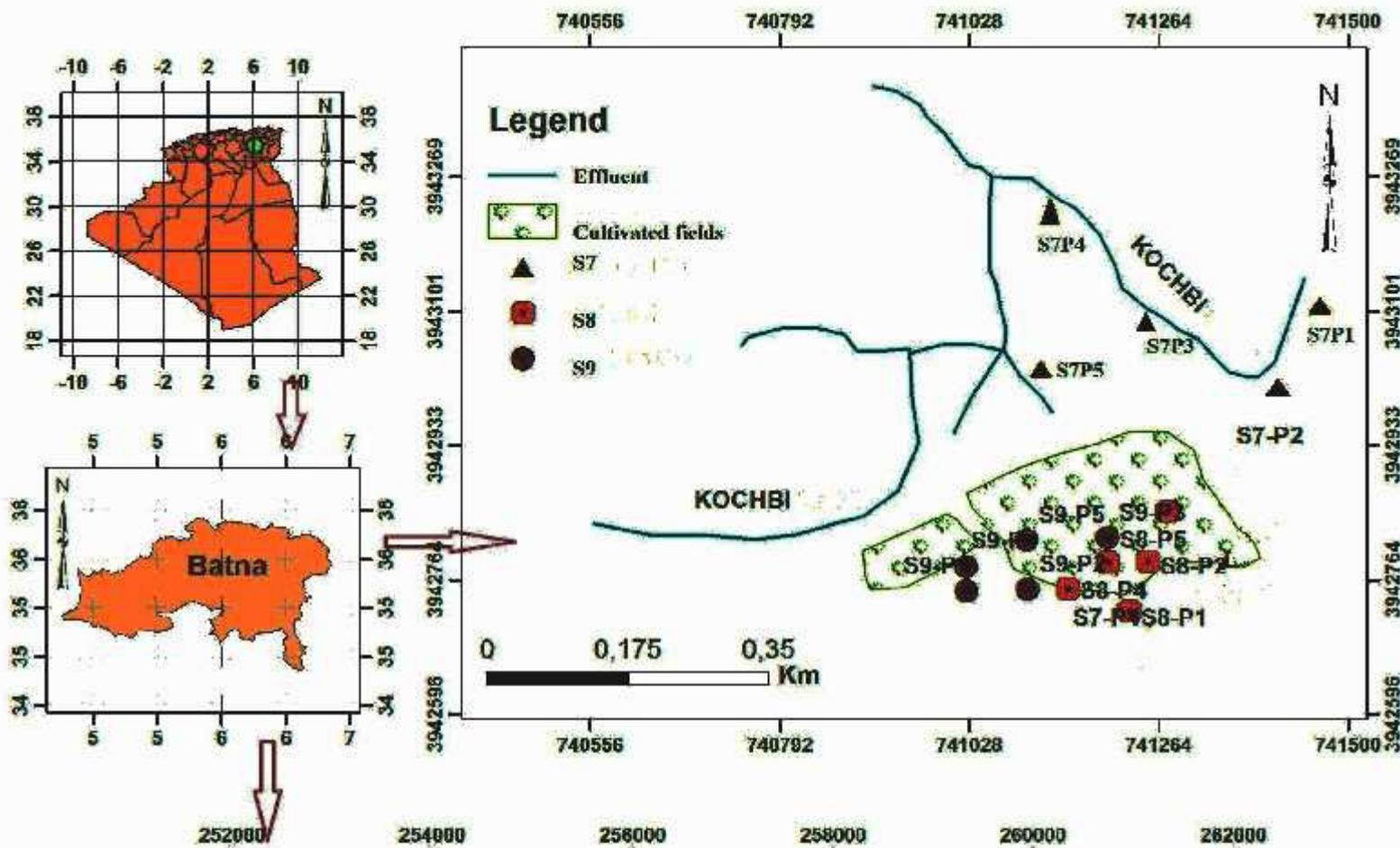
La réutilisation des eaux usées dans la commune de Fesdis et El Maadher dans la région de Batna à partir de Oued El Gourzi est pratiquée depuis plusieurs décennies. Trois principaux facteurs sont à l'origine de cette réutilisation: le régime pluviométrique xérique caractérisé par un climat semi-aride où les précipitations sont de 300 à 400 mm par an; les ressources en eau souterraines sont limitées: les eaux superficielles conventionnelles sont pour le moment inexistantes. La superficie irriguée par les eaux souterraine représente 6% des terres cultivées. Les eaux usées d'Oued El Ghourzi proviennent de la ville de Batna, elles sont partiellement traitées, et irriguent 960 ha des terres agricoles réparties sur les communes de Fesdis (200 ha), El Madher (160 ha) et Djerma (600 ha). Les principales pratiques sont les cultures : maraichères, fourragères et la céréaliculture (Anonyme, 2011).

Ces conditions assez particulières nous ont permis de choisir ces terrains pour l'étude de l'impact des eaux usées en irrigation. Nous avons aussi pris les terrains considérés comme témoin ceux irrigués en eau naturelle dans la région de Ouled Si Slimane. Les zones El Madher et Ouled Si Slimane sont situées dans la wilaya de Batna (fig I.1), caractérisées par un climat semi-aride avec des hivers frais. Les sols y sont des Fluvisols (WRB, 2006) à texture fine.

I.2. La plaine d'El Maadher

I.2.1. Situation géographique et administrative

La plaine d'El Madher est située, entre 35.5° et 35.7° de latitude Nord, à 15 km au Nord-Est de la ville de Batna. Le bassin versant de Oued El Madher s'étend sur une superficie d'environ 200 km² et englobe l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'El Madher qui couvre une superficie d'environ 90 km². Cet aquifère est limité par les montagnes de Batna. Ces montagnes convergent au Sud pour pratiquement fermer le Bassin versant de cette plaine et ne laisse subsister qu'un mince seuil alluvionnaire où coule Oued El-Madher (prolongement naturel d'Oued El Gourzi). Oued El Madher traverse toute la plaine jusqu'à Mechtat Arour, où il se divise en plusieurs bras. Merdja Mazouala est l'exutoire du bassin, elle est située au Nord de la plaine, entre Djebel Tafraout et KoudiatTfouda (Belouanas, 2012).



Coordinate system: WGS 1984 UTM Zone 31N AND 32N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984

S: Sites
 P: Sampling points

Figure 1.1 : Cartes de localisation des deux régions de l'étude (El Madher et Ouled Si Slimane)



Photo I.1 : Oued El Gourzi (Google Earth, Ghanem N. 2017)

I.2.2. Géologie

La plaine d'El Madher est un bassin dans lequel se sont accumulées au quaternaire, d'abondantes formations sédimentaires en un synclinal à substratum marneux très épais d'âge cénomaniens. Il est limité par deux structures anticlinales :

- ✓ D'une part au nord, par l'anticlinal des monts de Batna de direction SW-NE ou le cœur est jurassique à triasique, compliqué au voisinage du Dj. Sarif par des effets tectoniques importants.
- ✓ D'autre part au sud par l'anticlinal de Dj. Bou Arif de même direction ou le cœur est représenté par le crétacé inférieur.

Ces structures sont selon Belouanas (2012) affectées par de nombreux accidents tectoniques :

- ✓ Des accidents longitudinaux aux axes des anticlinaux et à la faveur des quels apparaissent les faisceaux jurassiques dans les monts de Batna, et qui constituent également des axes d'effondrement au droit du village d'El Madher (Dj BouArif).
- ✓ Des accidents transverses aux structures, de direction générale NW-SE.
- ✓ Des accidents de direction N-S à 20° E, à l'origine de nombreux dérochements.

Selon Baziz (2008), le bassin versant de Oued Gourzi appartient au versant méridional de l'Aurès. Il est situé au Sud Est de la médiane des hautes plaines constantinoises correspondant au début des massifs des Aurès. Il est constitué par des formations alluvionnaires d'âge mio-plio-quaternaire. Ce sont des formations détritiques fines. La zone de la plaine est composée des formations quaternaires essentiellement des dépôts alluvionnaires récents (argiles, limons).

I.2.3. Pédologie

Les différentes unités des sols sont décrites à partir de la carte des sols de l'Algérie de Jaseix-Bellon 1938 "feuilles de Biskra et de Tébessa" et les études effectuées dans le cadre de la mise en œuvre du programme de développement rural de proximité par le bureau d'étude (BNEDER, 1985) et (CPCS, 1967). Les sols de notre région d'étude sont classés comme suit :

I.2.3.1. Les sols d'apport alluvial

Ils se caractérisent par une profondeur importante, une charge caillouteuse moyenne (galets et cailloux), une texture équilibrée sablo-limono-argileuse, une CEC importante, un pH légèrement basique, même calcaires sans aucun effet sur les cultures.

I.2.3.2. Les sols insaturés humifères

Ils apparaissent eux aussi au niveau de la zone montagneuse où le relief est accidenté, ils se caractérisent par une texture limono-sablo-argileuse, les carbonates y sont rares.

I.2.3.3. Les sols calcaires humifères

Ces sols se situent au niveau des montagnes sous couvert forestier. Ils se distinguent par une charge caillouteuse élevée (cailloux et pierres) rendant le travail du sol difficile, sous la forêt, ces contraintes sont partiellement compensées par la nature de l'horizon C, les racines des arbres pénètrent facilement.

I.2.3.4. Les sols calciques

Ce sont des sols assez profonds saturés à plus de 90% par du calcium, le pH est supérieur à 7,8 et leur structure est polyédrique subangulaire fine.

I.2.4. L'hydrographie

Le réseau hydrographique est étroitement lié à :

- L'organisation du relief.
- La tectonique complexe.
- La lithologie hétérogène.
- La couverture végétale continue.

Ces facteurs jouent un rôle très important sur les grandes lignes de révolution du réseau hydrographique. Pour notre secteur le réseau hydrographique est représenté essentiellement par Oued El Gourzi (ou Oued El Maadher), qui est issu du sous bassin versant de Batna et débouche dans le Chott Gadin, avec une multitude de chaabas et talwegs (Belouanas, 2012). Selon Baziz (2008), l'assiette de la ville de Batna est traversée par deux grands Oueds (Batna et Tazoult), qui prennent leurs sources dans les versants septentrionaux des massifs des Aurès et de Belezma (Guerarra, 2013). La confluence de ces deux oueds forme Oued El Gourzi. Cette situation l'expose aux inondations lors des crues qui traversent le centre-ville via deux canaux, dont la capacité hydraulique est insuffisante. Oued El Gourzi reste l'unique collecteur naturel des eaux pour toute la région. De nombreux cours d'eau à régime temporaire et issus des bassins versants secondaires se regroupent pour se déverser dans Oued El Gourzi. Il présente un régime d'écoulement permanent, bien qu'en été quelques filets d'eau subsistent, mais qui sont en grande partie issus des rejets domestiques et industriels (Baziz, 2008).

I.2.5. Le climat

Dans notre région d'étude les précipitations sont très faibles et mal réparties sur une période de 31 ans (1985-2016) (tab 1-2 ; annexe 1). La moyenne annuelle totale est de 319,28 mm par an. Les mois pluvieux sont Mai et Avril, avec des hauteurs de précipitation maximum de 36,58 mm. Tandis que les mois les moins arrosés sont Juillet et Aout avec une moyenne pouvant atteindre 8,88 mm. Cependant, la température mensuelle moyenne va de 5,23 °C au mois de janvier jusqu'à 25,66 °C en juillet. Le diagramme Ombrothermique de Gaussen (fig 1 ; annexe 2) montre une période sèche relativement longue, se propageant de mai à octobre. La zone d'étude est classée selon le Climagramme d'Emberger (fig 3 ; annexe 3) dans la zone bioclimatique semi-aride supérieur avec un hiver frais et un été chaud.

I.3. La région de Ouled Si Slimane

I.3.1. Situation géographique et administrative

La commune de Ouled Si Slimane est située dans la partie Ouest de la wilaya de Batna à une distance de 90 km. Le chef-lieu de la commune est limité par les coordonnées Lambert suivants : 35° 37'N pour la latitude Nord et 5°,38' pour la longitude Est et à une altitude moyenne de 760 m.

Les limites de la commune sont :

- ✓ à l'Est : la commune de Taxlent et la daïra de Marouana.
- ✓ au Nord : la commune de Ras-Al-Aioun.
- ✓ à l'Ouest : la commune de N'gaous.
- ✓ au Sud-Est : la commune d'Ouled Aouf et la daïra de Ain Touta.

Elle se situe également sur la route nationale N°78, liant la wilaya de Sétif, Barika et Batna. La daïra de Ouled Si Slimane est issu du découpage de l'année 1991, alors qu'elle constituait depuis 1972 l'une des communes de la daïra de N'Gaous. Elle occupe une position stratégique par rapport aux autres communes de cette daïra, par le faite qu'elle a des frontières avec plusieurs communes limitrophes.

I.3.2. Géologie

La structure géologique principale de la région Ouled Si Slimane est divisée en trois strates réparties comme suit:

- ✓ La région montagnarde : Une partie de djebel Bouraï ainsi qu'une autre partie de Djebel Cheffa ; suites naturelles de Djbel Techar, constitués principalement de roches calcaires du crétacé.
- ✓ Les plaines: constituées principalement de marnes calcaires du miocène inférieur.
- ✓ Les bas de pente et Oueds: ceux sont des alluvions, regs, et terrasses du quaternaire constitués principalement d'argiles, limon et cailloux. Ceux sont des sols très fertiles et jeunes, d'une profondeur intéressante du point de vu agricole, allant jusqu'à 4 m.

I.3.3. L'hydrographie

L'hydrographie est représentée par un réseau d'oueds orientés tous du Nord au Sud et du Nord vers l'Est de la région. Ce qui fait que ce réseau est pratiquement temporaire à régime saisonnier hivernal et torrentiel. Citons principalement Oued Chïïr, Oued Laïoune, Oued Tibgart et Oued Kochbi (Anonyme, 2011).

I.3.4. Le Climat

Notre région d'étude (photo I.2) se caractérise par des précipitations très faibles, réparties sur une période de 30 ans (1985-2016) (tab 3-4 ; annexe 1). La moyenne annuelle totale est de 317,12 mm par an. Les mois pluvieux sont Mai et Avril, avec des précipitations maximales de 36.58 mm. Tandis que les mois les moins arrosés sont Juillet et Aout avec une moyenne pouvant atteindre 7,34 mm. Cependant, la température mensuelle moyenne allant de 5,14 °C au mois de Janvier jusqu'à 24,45 °C en juillet. Le diagramme Ombrothermique de Gausсен (fig 2 ; annexe 2) montre une période sèche relativement longue, se propageant de mai à octobre. La zone d'étude est classée selon le Climagramme d'Emberger (fig 3 ; annexe 3) dans la zone bioclimatique semi-aride inferieur avec un hiver frais et un été chaud.



Photo I.2 : Région d'étude de Ouled Si Slimane (Google Earth, Ghanem N. 2017)

I.4. Conclusion

Notre étude porte sur deux régions s'étalant dans la wilaya de Batna. Ces deux régions se caractérisent par la similitude du substratum géologique ce qui a permis une pédogénèse assez rapprochée, donnant naissance à des Fluvisols de texture fine. Le climat des deux régions a permis de les classer selon le climagramme d'Emberger dans la zone bioclimatique semi-aride avec un hiver frais et un été chaud. Le diagramme Ombrothermique de Gausсен montre une période sèche relativement longue, se propageant de mai à octobre.

Chapitre II : Caractérisation des boues
résiduairees issues de la station d'épuration
de la ville de Batna

II.1. Introduction

Les eaux usées proviennent de quatre sources principales : les eaux usées domestiques, les eaux usées industrielles, les eaux de pluie et de ruissellement dans les villes et le ruissellement dans les zones agricoles (Eckenfelder, 1982).

Le processus de dépollution des eaux usées urbaines produit d'un côté de l'eau épurée ; de l'autre côté des sous-produits en grande quantité (les boues). Elles représentent les sous-produits majoritaires et inévitables de l'assainissement des eaux usées acheminées par les réseaux d'assainissement. Elles constituent le concentré des déchets résultant de l'activité biologique des microorganismes vivant dans ces stations. En plus, elles se présentent sous forme d'une «soupe épaisse» qui subit ensuite des traitements visant en particulier à réduire leur teneur en eau. Elles sont composées de matières minérales en suspension, matières organiques non biodégradables et de microorganismes (Rejesk, 2002).

II.2. La station d'épuration de la ville de Batna

La station d'épuration (STEP) de la ville de Batna a été créée en 1977, et a été confiée à la société française «Degremont». En Octobre 2005, la station est réceptionnée pour début d'exploitation, elle a été gérée par «Vatech-Wabag» pour une période de 05 ans. À partir de Juin 2011, cette station est gérée par l'Office National de l'Assainissement (ONA) affiliée à l'Algérienne des Eaux (ADE) (Anonyme, 2006). La station d'épuration est localisée à la sortie Nord de la ville. Les coordonnées de cette station sont 35°34'28.25"N, 6°11'4.85"E avec une altitude moyenne de l'ordre de 1010 m (Photo II.1). Le terrain réservé au projet est presque plat, il est situé près de l'oued El-Gourzi qui représente l'exutoire naturel de la totalité des eaux usées produites par la ville de Batna et de la ville de Tazoult. La nécessité absolue d'épurer les eaux usées domestiques et industrielles de la ville de Batna qui compte une population de 263.000 habitants ainsi que les eaux usées de la ville de Tazoult 19.000 habitant, raccordées au réseau d'assainissement de la ville de Batna en 2002, a encouragé l'installation de la station.



Photo II.1 : La STEP de Batna (Google Earth, Ghanem N. 2017)

Rappelons que les eaux usées rejetées dans Oued El Gourzi sont utilisées illicitement pour l'irrigation des crudités et s'acheminent vers les nappes du champ captant (situé en aval) et alimentant la ville en eau potable en provoquant une pollution de l'environnement et menaçant ainsi la santé publique. Selon Anonyme (2006) elle a été réalisée pour :

- ✓ la protection de la nappe d'El-Madher qui est une ressource très importante d'approvisionnement en eau potable de la ville de Batna ;
- ✓ la protection de l'Oued El-Gourzi et ces affluents (Oueds Batna, Tazoult, Kechida, Sgan et Boudan) en collectant tous les rejets et les acheminant vers la STEP ;
- ✓ la réutilisation des eaux pour l'irrigation des plaines de Fesdis et d'El-Madher ;
- ✓ l'utilisation des Boues comme amendement pour les terres agricoles.

II.3. Caractérisation des eaux usées de la STEP de Batna

Pour une caractérisation des eaux usées de Oued El Guourzi, une étude physicochimique a été réalisée sur cinq échantillons à partir de cinq points de prélèvements choisis de l'amont vers l'aval (Photo II.2), et cela en période où l'utilisation des eaux usées pour les irrigations atteint son plus haut niveau (mois d'avril de l'année 2015). Cette période coïncide avec la montaison des cultures céréalières les plus répandues dans la région de Fisdis et d'El Madher. Deux points de prélèvements ont été choisis avant la procédure d'épuration par la STEP, et trois après épuration. À l'aide d'un multi paramètre, les analyses de température (°C), pH ainsi que la CE (dS/m) ont été réalisées in situ. Les MES, DBO₅ et DCO ont été réalisés au niveau du laboratoire de l'ADE de Batna. Ces analyses ont été effectuées au moyen des méthodes citées par Rodier (1978) et selon la norme AFNOR (N°90-105). Les résultats (tab. II.1) montrent que la température reste presque stable tout au long de l'effluent (fig II.1, A). La CE, le pH, les matières en suspension, la DBO₅ ainsi que la DCO présentent des valeurs assez élevées avant épuration. Après épuration, les valeurs des caractéristiques des eaux usées de l'effluent d'eaux résiduaire commencent à chuter de l'amont vers l'aval (fig II.1, B, C, D, E, F).

Ces résultats ont été également démontrés dans l'étude de Tamrabet (2011). Selon la même étude (tab. II.2), cet effluent est généralement plus chargé en amont qu'en aval par les nitrates, l'ammonium, les ortho phosphates, le fer, le cuivre, le zinc, le manganèse, les coliformes fécaux et les *Streptococcus fécaux*. Les processus d'évolution de l'amont vers l'aval agissent par la force actuelle sur l'eau s'écoulant sur le flux de matières en suspension, les matières minérales et organiques et sur celle des organismes vivants (Bournaud et Amoros, 1984). Dans les conditions de notre zone d'étude, les problèmes de phyto-toxicité par les TEM (Trace Eléments Metal) ne se posent pas pour le moment en raison de leur faible contenu, d'un côté, et des caractéristiques physicochimiques du sol de l'autre côté. Le sol de la région d'El Madher est de nature argileuse; selon Marschner (1995), ces conditions favorisent la précipitation des TEM. Cependant, Alouini (1994) mentionne que les risques épidémiologiques des agents pathogènes tels que les salmonelles et les *Vibrocholéra* sont nulles. Seuls les risques liés aux coliformes fécaux et aux streptocoques fécaux sont latents dans les eaux usées.

Tableau II.1: Valeurs des caractéristiques d'eaux usées de l'effluent Oued El Gourzi en cinq points de prélèvements (Avril 2015)

| Paramètre Point de prélèvement | T (°C) | CE (dS/m) | pH | M. E.S. (Mg/l) | DBO ₅ (mg d'O ₂ /l) | DCO (mg d'O ₂ /100ml) | DBO ₅ / DCO |
|--------------------------------------|-----------|--------------|------|-------------------|---|--|------------------------|
| P1 | 14,9 | 2,4 | 7,87 | 445,8 | 280,7 | 425,5 | 0,66 |
| P2 | 14,9 | 2,7 | 8,34 | 507,0 | 224,1 | 358,6 | 0,63 |
| P3 | 14,9 | 2,9 | 8,32 | 481,1 | 492,0 | 689,6 | 0,71 |
| P4 | 14,9 | 2,4 | 7,86 | 456,2 | 299,4 | 568,9 | 0,52 |
| P5 | 14,9 | 1,5 | 7,52 | 375,3 | 177,0 | 301,8 | 0,58 |
| Moy | 14,9 | 2,37 | 8,00 | 453,08 | 294,64 | 468,9 | 0,62 |

Tableau II.2: Valeurs de l'azote, du phosphore, des métaux lourds (ETM) et des teneurs en agents pathogènes à partir de 7 points d'échantillonnage des eaux usées dans l'effluent El Gourzi, de l'amont vers l'aval selon Tamrabet (2011)

| Paramètres | NO ³⁻ mg/l | NH ⁴⁺ mg/l | PO ₄ ³⁻ mg/l | Fe mg/l | Mn mg/l | Cu mg/l | Mn mg/l | Zn mg/l | CF G/100ml | SF G/100ml |
|--------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|---|---|
| Range values | 3.25-6.4 | 58.5 - 170.7 | 1.4-13.45 | 0.14-4.08 | 5.14-9.1 | 0.60-0.66 | 5.14-9.1 | 0.28-0.74 | 0.63x10 ⁴ - 2.75x10 ⁴ | 0.7x10 ⁴ - 1.1x10 ⁴ |

NO³⁻: Nitrates; NH⁴⁺: Ammonium; PO₄³⁻: Ortho phosphates; Fe: Fer; Cu: Cuivre; Zn: Zinc; Mn: Manganèse; CF: Fecalcoliforms; SF: Fecalstreptococci; G: Germs/ seeds.



Effluent Oued El Gourzi — Points de prélèvement →

Photo II.2: Localisation des points de prélèvement des échantillons d'eaux usées de l'effluent de Oued El Gourzi (Google Earth, Ghanem N. 2017)

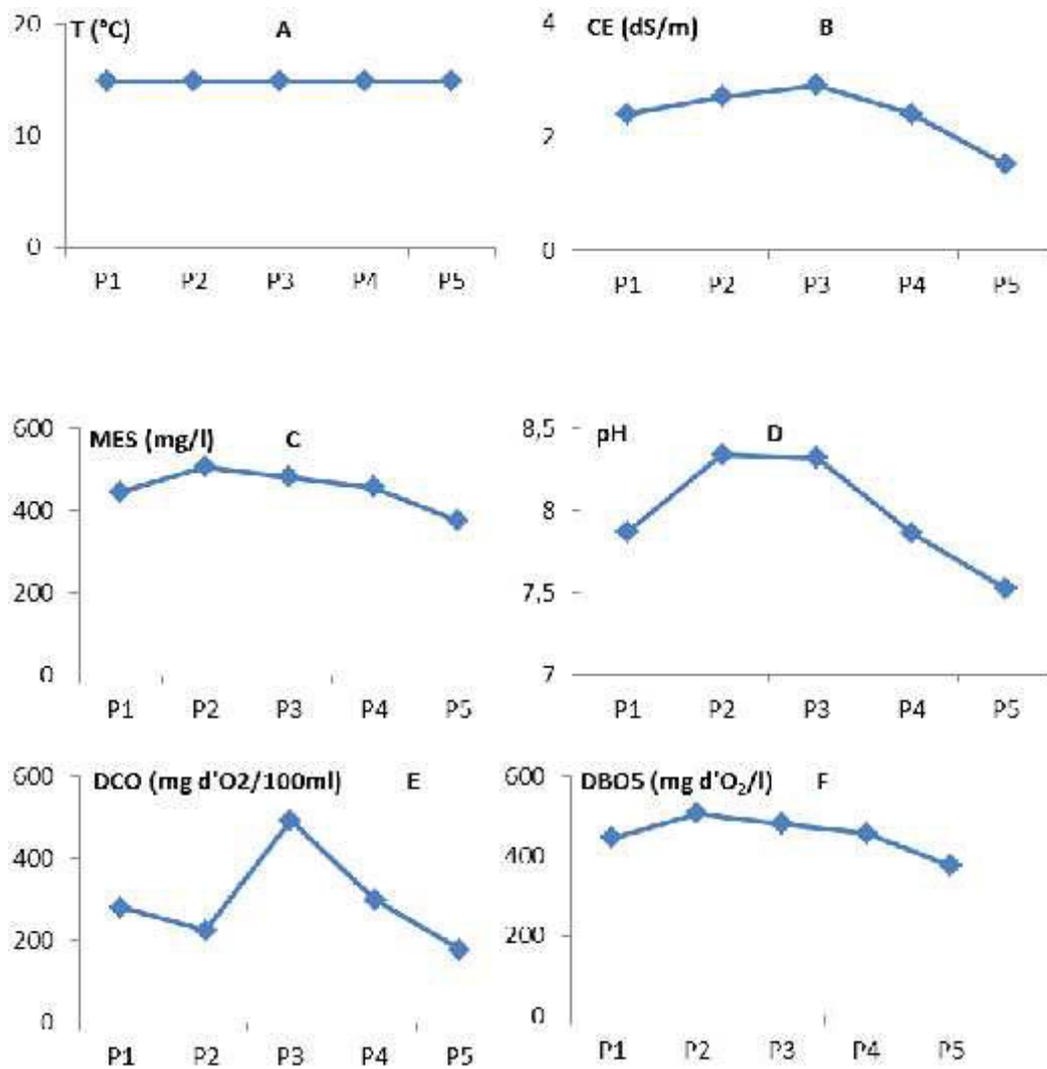


Figure II.1: Graphiques des caractéristiques physico-chimiques des eaux usées de Oued El Gourzi en cinq points de prélèvement (Avril 2015)

Selon Neal et *al.* (2000), l'augmentation de la température des cours d'eau favorise le développement des micro-organismes en même temps qu'elle peut intensifier les odeurs, les saveurs et active les réactions chimiques. La température enregistrée est similaire en tous les points de prélèvements, elle est de 14,9°C.

Le pH est le principal paramètre qui contrôle le processus de fermentation. Il permet de mettre en évidence les molécules présentes dans l'eau (acide, neutre ou basique). Selon Rodier et *al.* (2005), c'est un élément très important pour définir le caractère agressif ou incrustant d'une eau. Il intervient dans des phénomènes complexes avec d'autres paramètres comme la dureté, le dioxyde de carbone, l'alcalinité et la température. Effectivement, Paliwal et *al.* (1998) ont mentionné que les rejets urbains domestiques sont généralement alcalins. C'est le cas des eaux usées de Oued El Gourzi pour les différents points de prélèvement effectués. Aussi, Neal et *al.* (2000) ont noté que la diminution du pH de l'eau est à l'origine de la décomposition de la matière organique.

La CE est influencée par les différentes activités humaines (agricoles, industrielles ou domestiques), dont les rejets contiennent des sels, contribuant ainsi à l'accroissement de la CE (Bremond et Vuichard, 1973). Selon Silva et Sacomani (2001), l'augmentation de la CE est fortement liée à l'élévation de la température, et qui sera accélérée par la diminution du débit de l'eau en faveur de la prédominance des rejets fortement minéralisées. Alors que la diminution de la CE après épuration par la STEP est probablement due à l'activité des microorganismes. Les valeurs enregistrées justifient l'influence que peuvent avoir les activités anthropiques sur la variation de la conductivité des eaux de l'oued. Cependant, des modifications importantes de la CE peuvent intervenir rapidement au cours de la journée (Rodier et *al.*, 2005).

Les mesures des MES donnent une première indication sur la teneur en matière colloïdale d'origine minérale ou organique. La diminution enregistrée est importante (18,66 %), ce qui donne une idée sur le pouvoir auto-épuration de ce cours d'eau. Selon Russell and *al.* (2000), la variation des MES des cours d'eau est en fonction de la morphologie du lit, des berges et des occupations du sol.

Selon Painchaud (1997), la forte présence de matières organiques dans un plan d'eau par exemple, permet aux microorganismes de se développer tout en consommant de l'oxygène. Cependant, l'augmentation des teneurs en DBO_5 en période sèche peut être expliquée par l'instauration des conditions de dégradation de la matière organique par les microorganismes dont l'activité s'intensifie avec la diminution de la vitesse d'écoulement et avec le réchauffement des eaux. Cette activité consommatrice d'oxygène est selon Bremond et Perrodon (1979), à l'origine de l'autoépuration des eaux. En effet, Servais et *al.* (1995) considèrent que dans les cours, la DBO_5 a tendance à diminuer avec la distance parcourue par les eaux.

La DCO représente la quantité d'oxygène consommée par les matières oxydables chimiquement contenues dans l'eau du cours d'eau. Elle est représentative de la majeure partie des matières dissoutes dans l'eau ou en suspension. Ces matières sont représentées par des composés organiques et aussi des sels minéraux oxydables (sulfures, chlorures, etc.). Les taux enregistrés de la DCO sont importants dans tous les points de prélèvement. Ils dépassent largement les normes de la DCO dans les eaux naturelles (40 mg d' O_2/l).

Pour mieux apprécier la dégradabilité des matières dissoutes ou en suspension le rapport DBO_5/DCO permet d'indiquer une dégradabilité théorique après 5 jours. Ce rapport donne aussi des indications très intéressantes dans le cas des eaux polluées, sur l'origine de la pollution et les possibilités de traitement. Pour les eaux usées domestiques non traitées, le rapport DBO_5/DCO est de l'ordre de 0,7. Dans notre cas, ce rapport est en moyenne de l'ordre de 0,62. Cette valeur est relativement élevée vu l'importance des apports pas le biais des rejets domestiques et/ou industriels. Par conséquent, la charge organique rend ces eaux assez instables, *i.e.*, qu'elles évolueront vite vers des formes "digérées" avec le risque de dégagement d'odeurs.

II.4. Possibilité d'utilisation des eaux de Oued El Gourzi pour l'irrigation

Les moyennes de pH enregistrées dans les eaux usées au niveau des différents points de prélèvement sont incluses dans la plage normale pour une eau d'irrigation, à savoir 6,5 à 8,5 (FAO, 1985). Selon Bremond et Vuichard (1973), les eaux dont la CE dépasse 1500 S/cm sont difficilement utilisables pour l'irrigation. Les résultats de la CE dépassent cette limite dans toutes les stations étudiées. Les normes de rejet des eaux usées en milieu naturel, sont selon l'OMS (1989) de l'ordre de 30 mg/l pour les MES, 30 mg d' O_2/l pour la DBO_5 et 120

mg d'O₂/l pour la DCO. Cependant, les valeurs de MES, la DBO₅ et la DCO sont largement dépassées. Cette situation rend l'utilisation des eaux de Oued El-Gourzi non acceptable et présente de grands risques pour les milieux aquatiques, les sols et l'environnement.

L'utilisation de ces eaux en irrigation est qualifiée d'inadmissible en agriculture car leur qualité ne répond pas aux recommandations de la FAO. La prise en charge sérieuse de la collecte et de l'épuration des eaux usées serait une solution alternative pour combler le besoin accru en eau d'irrigation. Cette épuration serait nécessaire pour améliorer la qualité des eaux de l'oued qui deviennent ainsi une ressource qui mérite d'être valorisée.

II.5. Caractérisation des boues résiduairees de la STEP et la possibilité de leur utilisation

Pour une caractérisation de boues résiduairees utilisées par les agriculteurs de la région à l'état frais, comme engrais pour leurs cultures, en l'absence de tout contrôle ou règlement autorisant son usage, nous avons utilisé celles produites au mois de février 2015. Trois prélèvements d'une façon aléatoire sont effectués dans cinq bassins de séchage de la STEP. Les analyses de ces boues ont été effectuées au niveau des laboratoires de l'ADE de Batna.

Les valeurs moyennes de nos résultats (tab II.3) enregistrés ont pu qualifier ces types de boue de légèrement acide, non salinisantes. Leurs teneurs moyennes en matières organique est près de 8,66 mg/l. Cette matière organique est un paramètre qui revêt une grande importance en agriculture, puisqu'elle améliore la porosité et le pouvoir de rétention de l'eau des sols. Elle favorise ainsi l'enracinement des plantes cultivées, leur approvisionnement en eau et en éléments nutritifs tout en apportant une source de nutriments à la pédofaune et la microflore utile (N'Dayegamiye et *al.*, 2004).

L'azote est l'élément fertilisant qui influence le plus la productivité végétale (Hébert et *al.*, 2003). Les teneurs en azote des boues de la STEP de Batna dépassent celles du fumier de bovins. Elles sont assez riches en azote (9,35 mg/l d'NTK). Ceci peut être expliqué par le fait que les boues subissent peu de pertes de cet élément (par nitrification/ dénitrification et solubilisation). Seule une fraction de l'azote total des boues sera disponible aux plantes, il s'agit de l'azote ammoniacal et de l'azote organique facilement minéralisable. Ainsi, le ratio N-NH₄ / N-NTK est plutôt faible (0,26 en moyenne). Toutefois, ce ratio pourrait s'accroître lors du stockage des boues au champ (Hébert, 2005).

Le phosphore est un autre élément très important pour la croissance des plantes. Les boues analysées possèdent des teneurs en phosphore acceptables, ce qui rend leur utilisation avantageuse.

Tableau II.3 : Caractérisation des boues d'épuration de la STEP de Batna (Résultats fournis par la STEP, 2015)

| Paramètres | Résultats |
|--------------------------------------|-----------|
| pH | 6,62 |
| CE ($\mu\text{S/cm}$) | 83,5 |
| Turbidité (NTU) | 9,02 |
| TAC | 2,52 |
| TH | 3,1 |
| TDS (mg/l) | 40 |
| DCO (mg/l) | 48 |
| DBO ₅ (mg/l) | 21 |
| MS (g/kg) | 587,9 |
| MO (mg/l) | 8,66 |
| NtK (mg/l) | 9,35 |
| Mg ²⁺ (mg/l) | 1,92 |
| Ca ²⁺ (mg/l) | 9,27 |
| Cl (mg/l) | 14,34 |
| SO ₄ ²⁻ (mg/l) | 18,11 |
| Cd ($\mu\text{g/g}$) | < 10 |
| Co ($\mu\text{g/g}$) | < 34 |
| Cr ($\mu\text{g/g}$) | 54 |
| Cu ($\mu\text{g/g}$) | 429 |
| Mn ($\mu\text{g/g}$) | 172 |
| Ni ($\mu\text{g/g}$) | 24 |
| Pb ($\mu\text{g/g}$) | 225 |
| Zn ($\mu\text{g/g}$) | 681 |

Les ETM présents dans les boues urbaines sont considérés comme étant des oligo-éléments pour les plantes ou les animaux tant que leurs teneurs ne dépassent pas les valeurs prescrites dans les standards. Les boues prélevées dans la STEP de Batna possèdent des teneurs faibles en ces éléments qui ne dépassent pas les teneurs maximales dans les boues. Selon les normes Belges (1995) (annexe 4, tab 1), ces résultats montrent que ces boues ne

présentent, actuellement, aucun risque pour l'environnement et la santé humaine. Leur valorisation s'avère donc faisable et sécuritaire, y compris pour leurs teneurs en ETM.

II.6. Conclusion

Les eaux de Oued El Gourzi présentent les caractéristiques physicochimiques suivantes :

- ✓ des pH à tendance alcalines sans dépassés les normes;
- ✓ des valeurs élevées de la conductivité électrique, traduisant une minéralisation excessive et salinité importante ;
- ✓ des taux importants de MES révélant une charge organique marquée ;
- ✓ des fortes demandes en oxygène expliquant le pouvoir de dégradabilité des matières organiques par des processus biochimiques et chimiques ;
- ✓ des rapports DBO₅/DCO assez élevées.

Cependant, ces caractéristiques semblent être moins atténuées vers l'aval du cours d'eau sous l'effet du phénomène d'autoépuration. L'utilisation de ces eaux, surtout en amont, est qualifiée d'inadmissible en agriculture, car leur qualité ne répond pas aux recommandations de la FAO concernant les eaux destinées à l'irrigation.

Quant aux boues solides, celles-ci s'avèrent légèrement acides, mais pas salinisantes. Cela permettra aux boues de séjourner plus longtemps dans les bassins sans avoir une reprise de la putrescibilité des boues. Leurs taux des matières sèches dépassent en moyenne 50 % (boue pâteuse). Ce taux est assez élevé et qui se traduit par une turbidité élevée. Pour la matière organique, les boues de la station contiennent en moyenne près de 8,66 mg/l. Cette matière organique est un paramètre qui revêt une grande importance en agriculture.

En ce qui concerne le rapport entre la DBO₅ et la DCO qui peut donner une idée sur la teneur en matières organiques oxydables (biodégradabilité), la moyenne est égale à 0,42 mg d'O₂/l, ce qui montre que ces boues sont facilement biodégradables. De plus, leur contenu en azote et en phosphore leur confère même des propriétés d'engrais organiques. Elles peuvent donc constituer un substitut ou un complément aux engrais minéraux de synthèse.

Les ETM dans les boues prélevées de la STEP de Batna possèdent des teneurs faibles qui ne dépassent pas les normes maximales. Actuellement, il n'y a aucun risque pour l'environnement et la santé humaine. Leur valorisation s'avère donc faisable et sécuritaire. Il serait judicieux d'approfondir les études sur ce thème d'actualité en essayant une réalisation sur des périodes plus longues toute en utilisant des doses variables et des apports espacés dans le temps.

Chapitre III : Etude de l'effet des eaux
résiduelles sur les caractéristiques
chimiques et biologiques (lombrics) des
sols des terrains cultivés

III.1. Introduction

Les effluents industriels et domestiques sont utilisés ou éliminés sur terre à des fins d'irrigation, ce qui crée à la fois des opportunités et des problèmes (Yadav et *al.*, 2002). Horswell et *al.*(2003) et Liu et Xu (2002) indiquent que les opportunités de l'irrigation au eaux usées sont, qu'elle fournit une élimination pratique des déchets et qu'elle a des aspects bénéfiques de l'ajout de nutriments végétaux précieux et de matière organique au sol. D'autre part, l'utilisation à long terme de cette eau pour l'irrigation peut entraîner des effets néfastes durables sur la qualité du sol (Liu et *al.*, 2005).

Parmi la macrofaune du sol (c'est-à-dire les invertébrés du sol de plus de 2 mm), les vers de terre sont communément appelés ingénieurs du sol en raison de leur grande population et de leurs activités dans les écosystèmes tempérés et tropicaux (Jones et *al.*, 1997; Lavelle, 1997; Jouquet et *al.*, 2006). Les vers de terre sont probablement les acteurs les plus importants dans la formation des sols, dans le maintien de la structure et de la fertilité des sols (Freitas, 2012). Curry (1994) et Brown et *al.* (2000) ont indiqué que les vers de terre, grâce à leur activité d'enfouissement, jouent un rôle majeur dans les processus physiques, chimiques et biologiques des écosystèmes du sol. Les lombrics améliorent l'infiltration de l'eau, le stockage de l'eau et l'échange gazeux (Beven et Germann, 1982), et sont des voies préférentielles des solutés sur les couches profondes du sol (Kung et *al.*, 2000) même si l'adsorption des solutés se produit sur les murs du terrier (Allaire-Leung et *al.*, 2000, Jensen et *al.*, 2002, Weiler et Naef, 2003a). Les vers de terre relocalisent la matière organique de la surface aux couches profondes du sol (Shuster et *al.*, 2001), produisent des moulages avec des propriétés organo-minérales spécifiques (Zhang et Hendrix, 1995; Decaenes et *al.*, 1999; Wilcox et *al.*, 2002), et aussi stimulent et dispersent les microorganismes en creusant dans le sol (Whalen et *al.*, 1999; Tinuov et Scheu, 1999; Scheu et *al.*, 2002). Les vers de terre participent ainsi à l'hétérogénéité structurale et fonctionnelle des sols. Une cartographie précise du modèle spatio-temporel des systèmes de terriers de vers de terre permet d'associer les terriers de vers de terre à la répartition spatiale des fonctions du sol (Bastardie et *al.*, 2005). En Algérie, les travaux sur la biodiversité des vers de terre restent insuffisants. Les études sur ce sujet sont difficiles, d'une part, l'identification et la classification de ces organismes restent difficiles en raison du manque de taxonomistes qualifiés (Rougerie et *al.*, 2009) et d'autre part, l'étude des vers de terre n'est pas évidente en raison de plusieurs contraintes liées à la nature du sol et à la complexité de ces organismes (Decaëns, 2010).

En ce contexte très complexe, nous allons dans ce chapitre se focaliser sur les propriétés physico-chimiques et les caractéristiques de la communauté des vers de terre dans la région d'El Madher, où les sols sont cultivés, irrigués par les eaux partiellement traitées de l'effluent d'El Gourzi et qui sont en extension incessante. Nous avons choisi la zone de Ouled Si Slimane comme une région témoin, où les irrigations se font exclusivement par l'eau provenant d'une source naturelle.

III.2. Matériel et méthodes

III.2.1. Sélection et description des sites d'échantillonnage

Nous avons choisis dans notre première zone d'étude, six différents sites avec différentes particularités de végétation, de pratique agricole et une irrigation par les eaux usées provenant de l'effluent El Gourzi depuis plus de 15 ans. Ces sites ont une différence de topographie (de l'amont vers aval), ils sont répartis le long de l'effluent à partir de 924 m d'altitude en amont à 868 m en aval, sur une distance d'environ 25 km. Nous avons choisis trois autres sites dans la deuxième zone étudiée : Ouled Si Slimane, irriguée avec des eaux naturelles et saines de la source Kochbi et ne diffèrent que par les conditions de végétation et de pratiques culturales. Ces sites sont répartis dans deux localités de Guerza et Theniet El-Abed, à une altitude oscillant entre 780 et 849 m, sur une distance d'environ 20 km. Les sols des sites choisis pour l'étude sont de type Calcisols et Fluvisols selon la classification WRB (2006) à textures fine (tab III.1). Ces sites sont caractérisés par des cultures céréalières et arboricoles fruitières. Nous avons choisis comme témoins non cultivés d'autres sites localisés à la limite des deux effluents, sous une végétation naturelle et sans aucune pratique. Ils sont influencés par leur proximité aux effluents, et humectés par l'ascension capillaire. Nous avons effectué 5 points d'échantillonnage du sol et des vers de terre pour chaque site. Au total, 45 points ont donc été sujets à notre étude, durant les mois printaniers (mars, avril et mai) des années 2014, 2015 et 2016 (tab III.2). Cette période est la plus appropriée pour l'échantillonnage des vers de terre car le sol est humide et les températures du printemps favorisent l'activité lombricienne.

Tableau III.1: Classification texturale des sols des sites d'échantillonnage dans les régions d'El Madher et Ouled Si Slimane

| Sites | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 |
|-----------------------|----------|--------------|---------------|--------------|--------|-------|-------|-------|-------|
| % Sable | 14,20 | 19,96 | 45,77 | 32,63 | 29,82 | 32,93 | 46,24 | 20,58 | 15,44 |
| % Limon | 33,02 | 42,28 | 15,05 | 35,12 | 30,75 | 42,11 | 32,05 | 65,73 | 67,07 |
| % Argile | 52,78 | 37,76 | 39,19 | 32,25 | 39,42 | 24,96 | 21,71 | 13,69 | 17,49 |
| Textural class | Argileux | Argilo-limon | Limono-argile | Argile-limon | Argile | Limon | Limon | limon | limon |

Tableau III.2: Caractéristiques des pratiques culturelles des sites choisis dans les régions étudiées d'El Madher et Ouled Si Slimane

| Station | Pratique culturelle | Topographie | Altitude moyenne (m) | Qualité d'eau d'irrigation | Année de l'étude |
|---------|---------------------------------|-------------|----------------------|----------------------------|------------------|
| S1 | Bords de Oued El Gourzi | Aval | 864,0 | Eau usée | 2016 |
| S2 | Arboriculture (olivier) | Aval | 862,4 | Eau usée | 2016 |
| S3 | Céréaliculture (Orge/ Mais/Blé) | Aval | 853,8 | Eau usée | 2016 |
| S4 | Bords de Oued El Gourzi | Amont | 874,8 | Eau usée | 2015 |
| S5 | Céréaliculture (Blé / Luzerne) | Amont | 903,4 | Eau usée | 2015 |
| S6 | maraichage /céréaliculture | Amont | 923,4 | Eau usée | 2015 |
| S7 | Bords de l'effluent El Kochbi | Aval | 808,4 | Eau naturelle | 2014 |
| S8 | Arboriculture (olivier) | Amont | 786 | Eau naturelle | 2014 |
| S9 | Céréaliculture (Blé/ Orge) | Aval | 779,4 | Eau naturelle | 2014 |

III.2.2. Méthodes d'échantillonnage

La méthode utilisée est le triage manuel (Bouché, 1972 ; Bachelier, 1978 ; Lee, 1985). C'est une méthode physique d'extraction des vers de terre. Chaque point d'échantillonnage consiste en un seul échantillon à l'aide d'une pelle avec un volume de sol de 30 × 30 × 30 cm. Les vers recueillis en même temps que le sol sont stockés dans des flacons avec du formol à 4%. L'échantillonnage du sol a été effectué après avoir prélevé les vers de terre et déposer dans des sacs en polyéthylène étiquetés et numérotés et transportés au laboratoire.

III.2.3. Méthodes d'analyse des propriétés chimiques du sol

Le pH et la conductivité électrique (CE) ont été mesurés par lecture directe sur un pH-mètre et un conductimètre dans une suspension avec un rapport sol/eau de 1: 2,5 et 1: 5 respectivement (Baize, 1988). La détermination de la teneur en matière organique (MO%) est faite à l'aide de la méthode Walkley et Black, qui repose sur l'oxydation du carbone avec du dichromate de potassium dans un milieu fortement acide (Duchaufour, 1977). Le CaCO₃% total a été déterminé par la méthode volumétrique du "Calcimètre Bernard". Cependant, le CaCO₃% actif a été déterminé en contact avec un réactif d'extraction spécifique "Oxalate d'ammonium" à 0,2 N (Duchaufour, 1977).

III.2.4. Méthodes d'étude des vers de terre

La détermination des taxons concerne uniquement les vers adultes. Dans cette étude, nous avons essayé d'utiliser beaucoup plus de caractères externes des vers recueillis en utilisant des caractéristiques anatomiques internes pour certains taxons à fin de déterminer les espèces en question. Les caractères externes et internes utilisés, sont ceux expliqués par Bouché (1972) et Bachelier (1978). La clé choisie pour la détermination des taxons est modifiée par Blakemore (2007). Pour la classification des catégories écologiques, nous avons conservé celle de Bouché (1972) et Bouché (1977) qui a été utilisé par Bazri (2015) dans son étude de la population des vers de terre du Nord Algérien.

L'abondance est exprimée ponctuellement, c'est-à-dire le nombre total de vers de terre présent dans un point d'échantillonnage, et calculée au moyen du nombre d'individus par m².

La biomasse des vers de terre est exprimée en biomasse de population prélevée et calculée à partir de la biomasse individuelle (poids de chaque ver) et la biomasse totale en un point d'échantillonnage.

III.3. Résultats et discussion

III.3.1. Caractéristiques chimiques du sol

Le pH (fig. III. 1, A) montre une alcalinité modérée dans les sites irrigués avec des eaux naturelles, ainsi que les sites irrigués par les eaux usées de l'amont de Oued El Gourzi. Les pH sont plus alcalins dans les sites en aval de l'effluent d'eaux usées que les sites de l'amont. Les écarts types entre les valeurs de pH dans les points d'échantillonnage des sites souvent irrigués par les eaux usées en amont sont beaucoup plus élevés. Schipper et *al.* (1996) indiquent que le pH du sol augmente en raison d'une longue période d'irrigation avec les eaux usées. Ils attribuent cette augmentation à la composition chimique des effluents par les cations tels que Na, Ca et Mg. Le pH du sol irrigué avec les eaux usées diminue à la suite de l'oxydation des composés organiques et de la nitrification de l'ammonium (Mohammad and Mazahreh, 2003 ; Vazquez and *al.*,1996 ; Hayes and *al.*, 1990).

Les valeurs de CE (fig III. 1, B) sont plus faibles aux points de prélèvement du site S5, caractérisés par une irrigation avec des eaux usées en amont de l'effluent El Gourzi. Les écart-type sont beaucoup plus élevées aux points d'échantillonnage du site S1. Contrairement aux résultats mentionnés dans les travaux de Maalem et Ghanem (2016) sur les valeurs des eaux usées de l'effluent El Gourzi, qui sont plus élevées en amont qu'en aval, le sol a des valeurs de CE plus élevées en aval qu'en amont. Cela pourrait être dû à la matière organique, qui sert de tampon. D'une manière générale, selon les normes présentées par DIAEA/DRHA/SEEN in El Oumlouki et *al.* (2014), les valeurs de CE restent faibles dans les différents sites de notre étude.

Le taux de matière organique (fig III. 1, C) a été plus faible dans le site S8 irrigué par des eaux naturelles sous une arboriculture. Il a été le plus élevé en S4 aux bords et en amont de l'effluent d'El Gourzi. En effet, Tamrabet et *al.* (2003) ont rapporté qu'il y a un effet très important sur l'amélioration de la MO lors d'une comparaison entre les moyennes d'un sol témoin et des sols irrigués par les eaux usées. Cependant, de nombreuses autres études ont montré une augmentation de la MO% après une irrigation avec des eaux usées traitées. Ceci est le cas dans notre étude. En outre, la teneur élevée en argile du sol peut protéger physiquement la MO de la décomposition (Gharaibeh, 2007 ; Vogeler, 2009 ; Galavi, 2010).

Le taux moyen de $\text{CaCO}_3\%$ total (fig. III. 1, D) a été plus faible au site S3 en aval de l'effluent El Gourzi. Il été le plus élevé au bord de l'effluent d'eau naturelle d'El Kochbi. Ces valeurs sont généralement très fortement calcaires selon l'échelle de classement proposée par GEPPA dans Baize (1988). Les niveaux de calcaire semblent être liés au pH du sol. Ces résultats restent très peu argumentés, car très peu de travaux sont réalisés sur cet axe.

L'ANOVA (tab III.3) révèle au moyen du test post-hoc de Newman-Keuls au seuil de 5%, un effet très significatif des différentes pratiques d'irrigation et pratiques culturales sur les paramètres physico-chimiques étudiés du sol (MO, CE, CaCO_3tot , CaCO_3act et le pH). En effet, les propriétés physiques du sol sont associées à la disponibilité en éléments nutritifs des sols, des mouvements de soluté et de polluants, de l'activité microbienne et de la stabilisation de la matière organique des sols (Sahin, 2008).

Tableau III.3 : Résultats de l'analyse statistique des caractéristiques chimiques dans les différents sites de l'étude

| Région | Variables Sites | | MO % ^{xxx} | C.E dS/m ^x | CaCO ₃ % tot ^{xxx} | CaCO ₃ % act ^{xxx} | pH ^{xxx} |
|--|-----------------|----|---------------------|-----------------------|--|--|-------------------|
| El Madher (Sites irrigués par les eaux usées en aval de l'effluent El Gourzi) | S1 | M | 2,73 | 0,71 | 26,46 | 9,90 | 8,49 |
| | | Et | 1,225 | 0,611 | 2,962 | 4,129 | 0,162 |
| | S2 | M | 1,74 | 0,60 | 43,38 | 12,65 | 8,44 |
| | | Et | 0,830 | 0,294 | 6,118 | 4,072 | 0,134 |
| | S3 | M | 3,66 | 0,53 | 23,53 | 12,45 | 8,55 |
| | | Et | 0,563 | 0,175 | 2,407 | 0,371 | 0,049 |
| | S4 | M | 6,43 | 0,28 | 36,91 | 24,92 | 7,68 |
| | | Et | 2,065 | 0,039 | 9,423 | 5,450 | 0,216 |
| | S5 | M | 5,12 | 0,20 | 31,31 | 20,32 | 7,96 |
| | | Et | 0,980 | 0,081 | 3,387 | 2,803 | 0,206 |
| | S6 | M | 6,28 | 0,36 | 29,10 | 35,60 | 7,93 |
| | | Et | 1,492 | 0,159 | 5,266 | 5,265 | 0,335 |
| Ouled Si Slimane (Sites irrigués par les eaux naturelles de l'effluent El Kochbi) | S7 | M | 2,49 | 0,26 | 58,23 | 11,80 | 7,83 |
| | | Et | 0,493 | 0,034 | 3,984 | 4,712 | 0,055 |
| | S8 | M | 1,72 | 0,21 | 53,69 | 15,70 | 7,75 |
| | | Et | 0,433 | 0,036 | 6,468 | 2,683 | 0,031 |
| | S9 | M | 2,12 | 0,59 | 51,82 | 18,00 | 7,92 |
| | | Et | 0,461 | 0,291 | 15,05 | 4,077 | 0,073 |
| Valeurs limites/site | Max | | S4 | S1 | S7 | S6 | S3 |
| | Min | | S8 | S5 | S3 | S1 | S8 |
| Résultats de l'ANOVA | ddl | | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| | F | | 15.19 | 2.75 | 16.07 | 20.62 | 19.68 |
| | P | | 0.000 | 0.017 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

^{xxx} : hautement significatif; ^x : significatif; NS: non significatif, M: moyenne; Et: Ecart type; F: nombre de Fischer ; P: seuil de probabilité, ddl : degré de liberté.

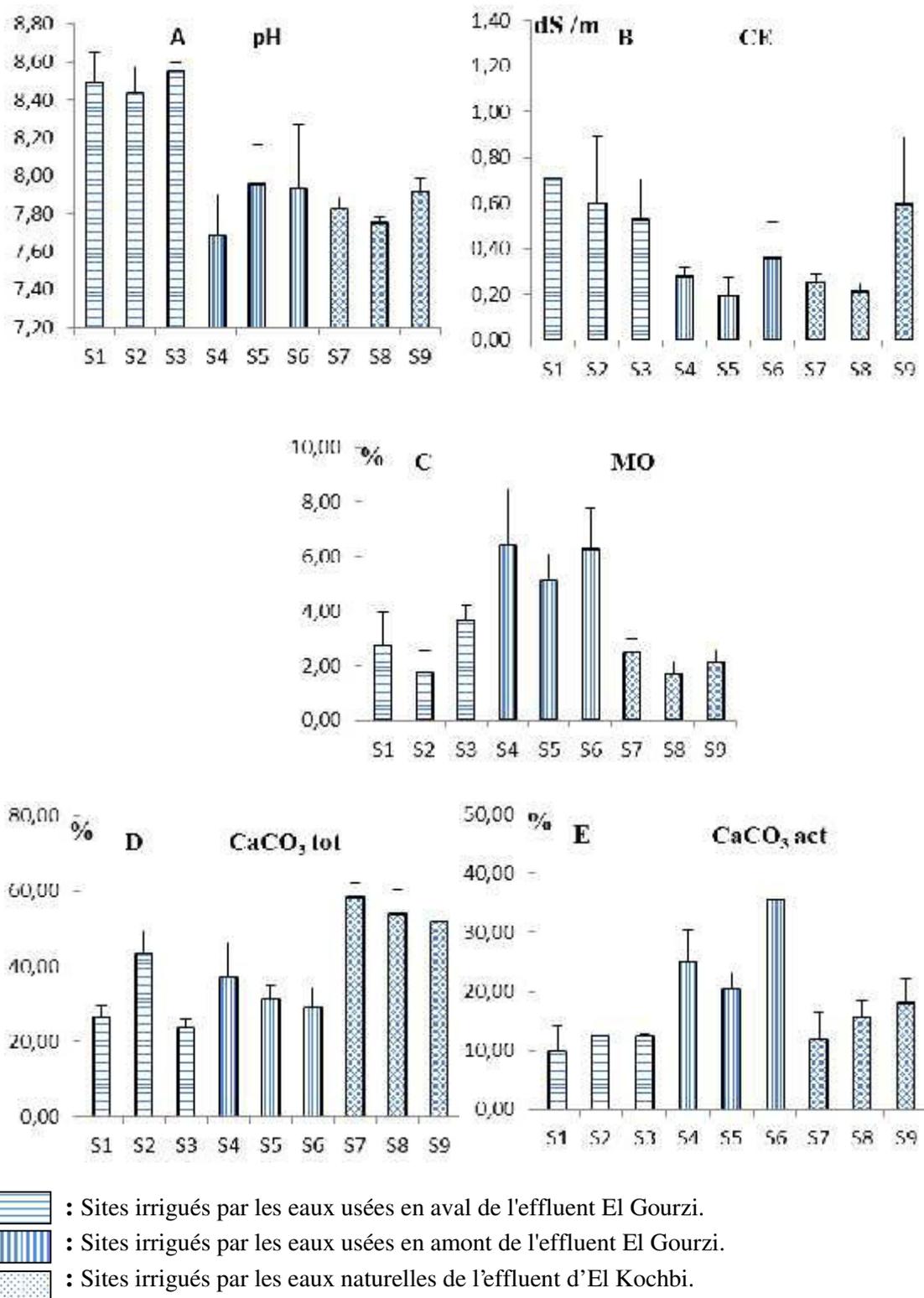


Figure III.1: Histogrammes des valeurs moyennes des caractéristiques chimiques des sols dans les différents sites de l'étude (A ; pH, B ; CE, C ; MO, D ; CaCO₃tot, E. CaCO₃act)

III.3.2. Caractéristiques biologiques de la communauté lombricienne

L'abondance totale et la moyenne de la biomasse des vers de terre dans les différents points d'échantillonnage (tab III.4) ont été plus faibles au site S9 caractérisé par une irrigation avec des eaux naturelles sous céréaliculture. Elles étaient plus élevées en S5 avec l'irrigation par les eaux usées en amont sous céréaliculture (fig III.2). Cette abondance a été représentée par 54% d'adultes et 46% de vers juvéniles (fig III.3). Nos résultats expliquent un effet négatif du labour sur l'abondance et la biomasse des vers de terre. Au contraire, l'irrigation avec les eaux usées améliore considérablement leur abondance et leur biomasse. Dans l'étude de Bazri et *al.* (2013), la densité de vers de terre dans l'Est de l'Algérie, et des régions côtières jusqu'au désert, était respectivement de $6,00 \pm 1,41$, à $29,60 \pm 11,83$ individus.m⁻² et $0,28 \pm 0,39$ à $13,13 \pm 7,94$ g.m⁻². Ces résultats sont presque similaires à ceux d'Omodeo et Martinucci (1987) dans le Nord de l'Algérie, qui ont trouvé des densités de vers de terre allant de 11,0 à 12,7 individus.m⁻² et une biomasse allant de 1,25 à 3,0 g.m⁻². Edwards et Bohlen (1996) ont expliqué que les sols à faible teneur en matières organiques ne supportent généralement pas de fortes densités de vers de terre. Les valeurs les plus élevées se retrouvent généralement dans les pâturages fertilisés et les valeurs les plus faibles dans les sols acides ou arides (Lee, 1985 ; Lavelle and Spain, 2001).

L'étude taxonomique a été réalisée sur un total de 594 vers adultes. La clé taxonomique et la nomenclature citée par Blakemore (2007) ont permis de classer 7 espèces de Lumbricidae : *Aporrectodea trapezoïdes* (Dugés, 1828), *Aporrectodea rosea* (Savigny, 1826), *Aporrectodea caliginosa* (Savigny, 1826). *Allolobophora molleri* (Rosa, 1889); genre Eophila. *Octodrilus complanatus* (Dugés, 1828). *Eiseniella tetraedra tetraedra* (Savigny, 1826). *Proctodrilus antipai antipai* (Michaelsen, 1891). Le pourcentage de l'abondance spécifique globale montre la dominance de *Aporrectodea trapezoides*, suivi par *Aporrectodea rosea* (Fig III.4).

Tableau III.4 : Résultats de l'analyse statistique des caractéristiques des vers de terre dans les différents sites de l'étude

| Région | Variables Sites | | Abd tot ^{xxx} (Ind/m ²) | Abd adt ^{xxx} (Ind/m ²) | Abd juv ^{xxx} (Ind/m ²) | Abd end ^{xxx} (Ind/m ²) | Abd epig ^{NS} (Ind/m ²) | Abd ane ^{xxx} (Ind/m ²) | Bio end ^{xxx} (g/m ²) | Bio epig ^{NS} (g/m ²) | Bio ane ^{xxx} (g/m ²) | Bio tot ^{xxx} (g/m ²) | |
|---|---|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-------|
| El Madher (Sites irrigués par les eaux usées de Oued El Gourzi.) | S1 | M | 16,60 | 5,20 | 11,40 | 3,00 | 0,40 | 1,80 | 1,84 | 0,16 | 5,08 | 0,80 | |
| | | Et | 13,939 | 3,493 | 10,455 | 0,707 | 0,548 | 2,490 | 0,689 | 0,230 | 3,513 | 1,131 | |
| | S2 | M | 19,40 | 11,20 | 9,20 | 4,60 | 0,00 | 6,60 | 2,07 | 0,00 | 10,35 | 6,51 | |
| | | Et | 3,647 | 2,950 | 3,899 | 2,074 | 0,000 | 2,191 | 1,324 | 0,000 | 1,041 | 2,063 | |
| | S3 | M | 9,80 | 3,00 | 7,00 | 2,40 | 0,00 | 0,80 | 3,59 | 0,00 | 5,65 | 0,66 | |
| | | Et | 1,643 | 1,000 | 0,707 | 1,140 | 0,000 | 0,447 | 2,086 | 0,000 | 1,832 | 0,521 | |
| | S4 | M | 43,80 | 34,40 | 9,00 | 28,00 | 2,00 | 5,20 | 10,56 | 1,37 | 20,04 | 7,52 | |
| | | Et | 13,755 | 16,165 | 3,536 | 21,319 | 3,464 | 5,541 | 8,248 | 2,614 | 5,726 | 7,712 | |
| | S5 | M | 49,60 | 26,80 | 22,80 | 19,80 | 0,00 | 7,00 | 18,86 | 0,00 | 37,56 | 9,38 | |
| | | Et | 7,162 | 6,496 | 11,167 | 7,014 | 0,000 | 3,082 | 6,887 | 0,000 | 6,361 | 3,190 | |
| | S6 | M | 38,60 | 21,40 | 17,20 | 15,40 | 0,80 | 5,40 | 6,40 | 0,12 | 19,22 | 6,33 | |
| | | Et | 22,041 | 9,813 | 13,498 | 5,320 | 1,789 | 3,507 | 1,620 | 0,264 | 8,450 | 3,985 | |
| | Ouled Si Slimane (Sites irrigués par les eaux naturelles de l'effluent Kochbi) | S7 | M | 34,40 | 15,20 | 18,40 | 0,60 | 0,00 | 14,60 | 0,17 | 0,00 | 21,05 | 14,11 |
| | | | Et | 6,229 | 5,586 | 9,099 | 0,894 | 0,000 | 5,639 | 0,244 | 0,000 | 7,948 | 7,175 |
| S8 | | M | 7,00 | 1,20 | 5,80 | 0,60 | 0,00 | 0,60 | 0,52 | 0,00 | 2,89 | 0,47 | |
| | | Et | 4,416 | 1,789 | 3,962 | 1,342 | 0,000 | 0,894 | 1,167 | 0,000 | 2,627 | 0,663 | |
| S9 | | M | 2,60 | 0,40 | 2,20 | 0,00 | 0,20 | 0,20 | 0,00 | 0,19 | 2,21 | 0,19 | |
| | | Et | 2,793 | 0,548 | 2,683 | 0,000 | 0,447 | 0,447 | 0,000 | 0,434 | 2,308 | 0,420 | |
| Valeurs limites /site | Max | | S5 | S4 | S5 | S4 | S4 | S7 | S5 | S4 | S7 | S5 | |
| | Min | | S9 | S9 | S9 | S9 | S9 | S9 | S9 | S8/S2/S3/S5/S7/S8 | S9 | S9 | |
| Résultats de l'ANOVA | Ddl | | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | |
| | F | | 13.40 | 14,61 | 3,66 | 8,68 | 1,27 | 9,81 | 14,00 | 1,24 | 7,55 | 25,95 | |
| | P | | 0.000 | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.287 | 0.000 | 0.000 | 0.301 | 0.000 | 0.000 | |

^{xxx} : hautement significatif; ^x : significatif; NS: non significatif, M: moyenne; Et: Ecart type; F: nombre de Fischer ; P: seuil de probabilité; Ind/m²: Individual /m².

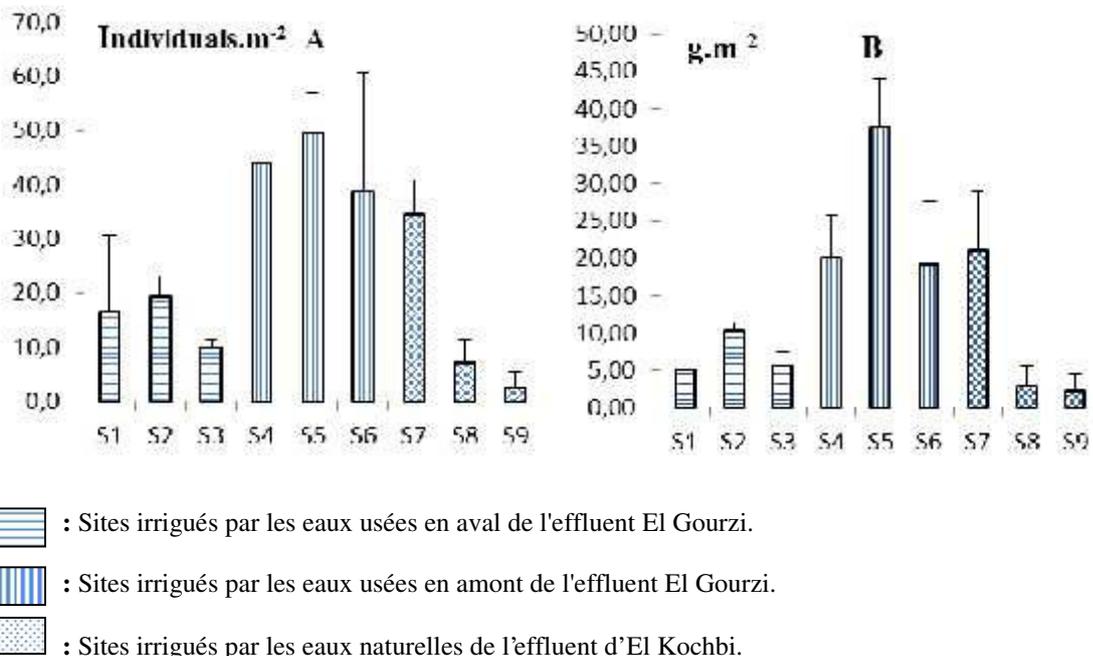


Figure III.2 : Histogrammes de l'abondance et de biomasse des vers de terre dans les sols des différents sites de l'étude

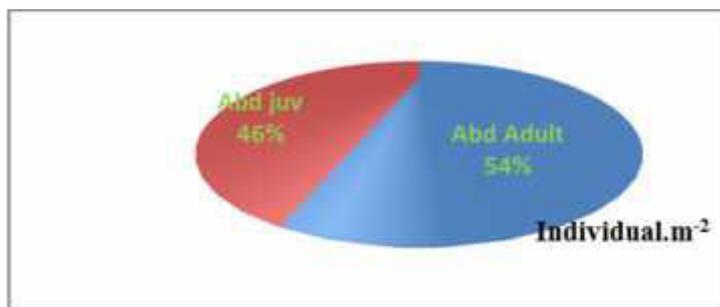


Figure III.3 : Pourcentage de l'abondance de vers de terre dans les sols des sites d'étude

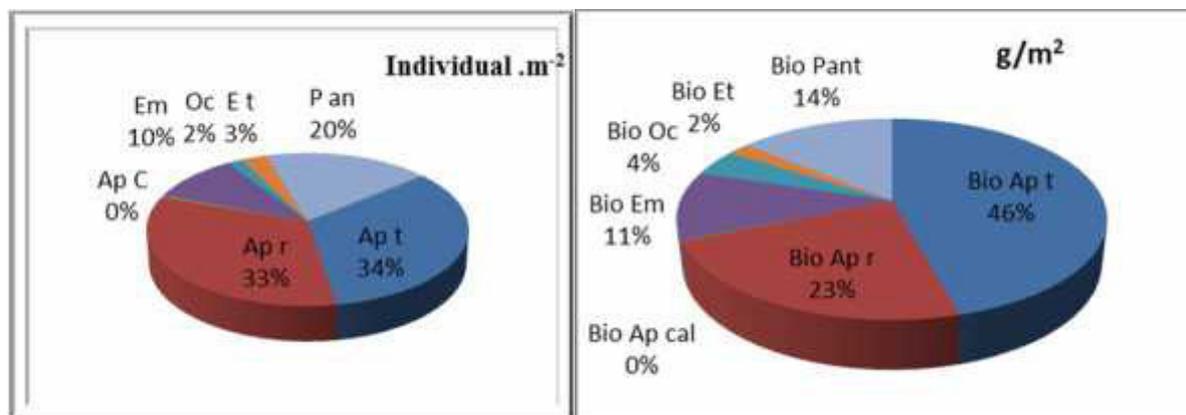


Figure III.4 : Pourcentage global de l'abondance et la biomasse spécifique des vers de terre

Parmi les 7 espèces inventoriées (fig III.5), les espèces endogées représentaient 62% (*Ap. rosea*, *A. molleri*, *Pt. antipae* et *Ap. caliginosa*), 3% épigées (*Ei. tetraedra*) et 22% anéciques (*Oc. complanatus* et *Ap. trapezoides*), ces dernières peuvent être considérées comme anécique, endogée ou endo-anécique car elles varient selon la souche.

Bouché (1972) a classé les vers de terre en trois catégories, en fonction des caractéristiques morphologiques et comportementales. Les espèces épigées sont ceux qui vivent et se nourrissent des litières sur la surface du sol. Les vers de terre anéciques vivent dans des terriers verticaux permanents dans le sol et peuvent émerger pour se nourrir de la litière de surface, les espèces endogées vivent dans des terriers horizontaux temporaires et se nourrissent du sol.

La figure III.6 montre que l'abondance des endogées est beaucoup plus élevée dans le site S4 aux bordures et en amont de l'effluent El Gourzi, sans pratiques culturales. Cependant, le site S7 aux bords de l'effluent El Kochbi et sans pratiques culturales, est mieux représenté par une population anécique. La population épigée n'est importante que dans le site S4 et S6 en amont de l'effluent d'eaux usées.

Sur les paramètres biologiques de l'abondance, l'ANOVA a révélé un effet significatif des différents sites de l'étude à l'exception de l'abondance des espèces *Ap. caliginosa* et *Ei. tetraedra tetraedra*. L'effet significatif des sites a été bien révélé sur l'abondance des endogées et des anéciques. Cependant, il n'y a pas d'effet significatif des différentes pratiques d'irrigation et de culture sur l'abondance des épigées (tab III.4).

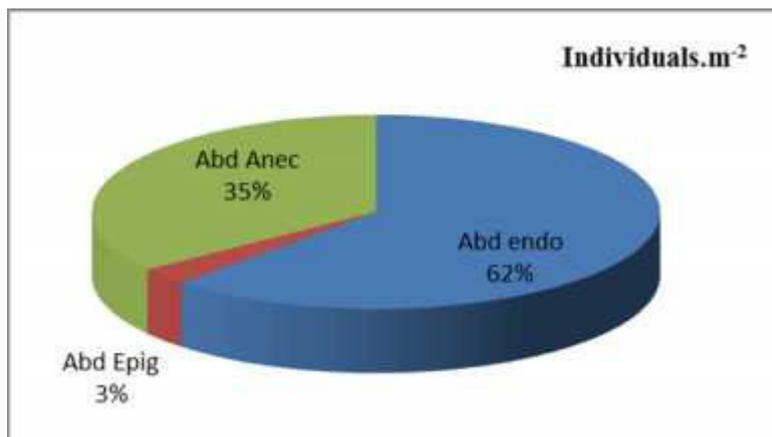


Figure III.5: Moyenne de l'abondance des catégories écologiques de vers de terre dans les différents sites de l'étude

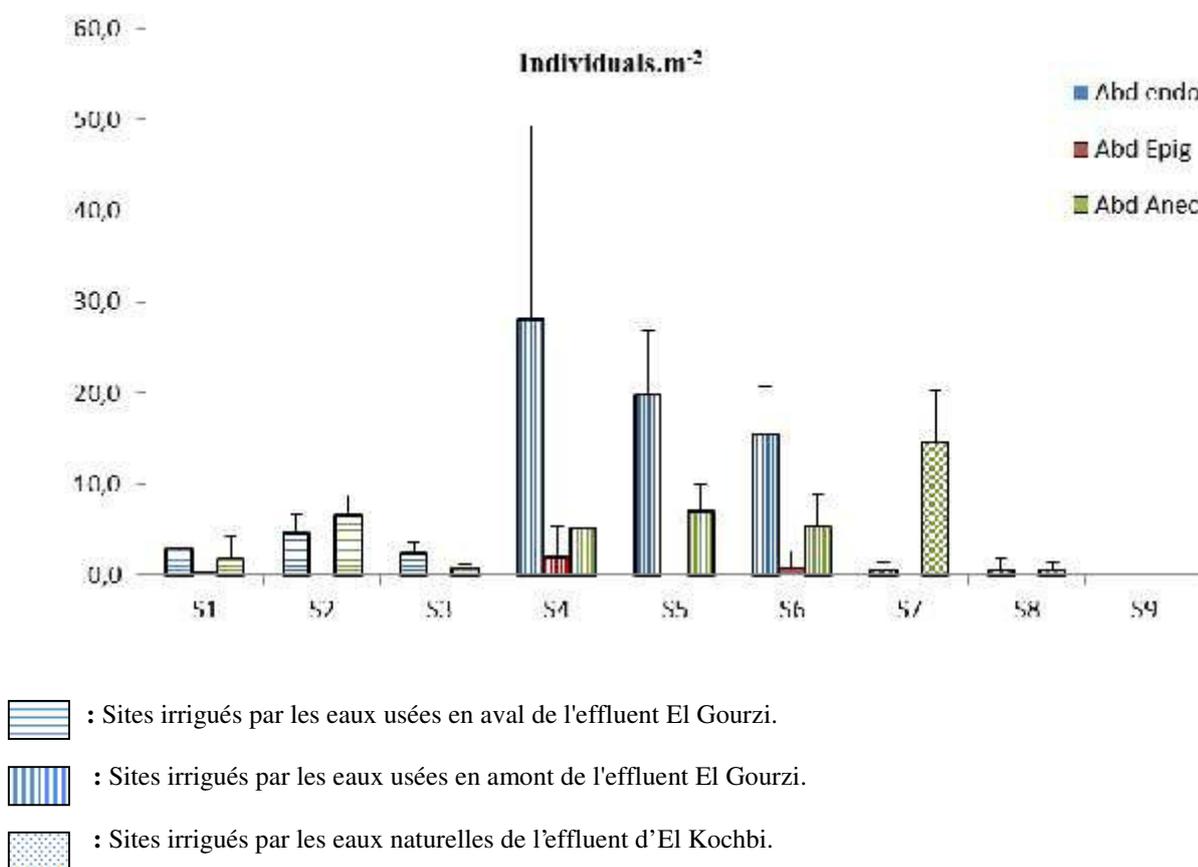


Figure III.6: Abondance des catégories écologiques des vers de terre dans les sites des sols étudiés

III.4. Conclusion

Notre étude a pu révéler des niveaux de pH plus alcalins dans les sites en aval que les sites en amont des effluents d'eaux usées. Le pH des sols irrigués avec les eaux usées diminue à la suite de l'oxydation des composés organiques et de la nitrification de l'ammonium. Les valeurs de conductivité électrique sont plus faibles dans les sites à irrigation avec les eaux usées en amont de l'effluent. Cela pourrait être dû au niveau de matière organique qui agit comme un tampon.

La matière organique est plus élevée dans le site localisé en amont des bords de l'effluent caractérisé par une végétation naturelle, qui s'explique certainement par une importante charge de matière organique provenant des eaux usées ainsi que la teneur élevée en argile du sol, pouvant physiquement protéger la matière organique de la décomposition.

Le taux moyen du $\text{CaCO}_3\%$ total est plus élevé au bord de l'effluent de l'eau naturelle. Cependant, le taux de $\text{CaCO}_3\%$ actif est plus bas au site de l'aval de l'effluent d'eaux usées. Toutefois, il présente les valeurs plus élevées dans le site à irrigation par les eaux usées en amont de l'effluent. Ce résultat semble être lié au pH du sol.

L'abondance totale et la moyenne de la biomasse des vers de terre sont plus faibles au site irrigué par les eaux naturelles sous céréales. Au contraire, ils sont les plus élevés dans le site en amont irrigué par les eaux usées et caractérisé par une céréaliculture. Ce résultat explique que l'abondance et la biomasse des vers de terre sont liées à l'irrigation avec des eaux usées. Les vers de terre sont beaucoup plus présents où l'eau d'irrigation est fortement chargée en matières organiques.

L'étude taxonomique a permis de classer 7 espèces de Lumbricidae. Le pourcentage d'abondance spécifique globale montre la dominance de *Aporrectodea trapezoides*, suivie par *Aporrectodea rosea*. Ce résultat explique que les eaux usées ont un effet important sur le développement de la biodiversité des vers de terre. Parmi les 7 espèces inventoriées, les endogées sont majoritaires. L'abondance des endogés est beaucoup plus élevée dans le site en amont aux bordures de l'effluent El Gourzi, sans pratiques culturales. Cependant, le site aux bords de l'effluent d'El Kochbi à eaux naturelles, sans pratiques culturales, est mieux représenté par une population anécique.

Chapitre IV : Impact des eaux usées sur
les caractéristiques physiques et
hydrodynamiques du sol

IV.1. Introduction

La structure du sol est un facteur clé dans le bon fonctionnement de nombreux processus du sol, comme le stockage de l'eau et l'infiltration, le recyclage de l'azote et du phosphore et la réduction des gaz à effet de serre (Bronick and Lal, 2005). Il est généralement admis que l'augmentation du contenu en matière organique contribue à la stabilité des agrégats et de la structure du sol (Kemper and Koch, 1966; Le Bissonnais et Arrouays, 1997). Levy et *al.* (2014) ont signalé que l'irrigation avec les eaux usées traitées a entraîné une diminution de la teneur en matière organique en suspension par rapport à l'irrigation avec des eaux douces, et cela est peut-être dû à l'activité microbienne améliorée des eaux usées traitées et de la minéralisation de la matière organique incorporée et native.

Les propriétés physiques du sol (densité apparente, densité des particules, porosité totale, distribution de la taille des pores et stabilité des agrégats) et les propriétés hydrauliques (rétention d'eau et infiltration) peuvent être considérablement affectées par l'irrigation aux eaux usées. En outre, les conditions environnementales peuvent changer l'ampleur de ces effets (Tunc et Sahin, 2015). Par ailleurs, Beven and Germann (1982) décrivent les macropores comme étant de grands vides du sol, souvent distincts d'une manière ou d'une autre de la matrice du sol, permettent d'obtenir un flux préférentiel d'eau et de contaminants dans le sol. Ils sont influencés par une variété de processus météorologiques et biologiques, et sont une caractéristique importante dans les systèmes hydrologiques car ils affectent le taux et la profondeur de l'infiltration, les relations pluviométrique-écoulement et le transport des contaminants vers les eaux souterraines.

Dans ce chapitre nous allons étudier les caractéristiques physiques du sol sous une irrigation aux eaux usées et naturelles, dans les différents sites choisis en deux régions d'El Maadher et Ouled Si Slimane, aux bordures des deux effluents El Gourzi et El Kochbi.

IV.2. Méthodes d'échantillonnage du sol

Après avoir extrait les vers de terre à partir des différents points d'échantillonnage, nous avons procédé à des prélèvements juste à côté, pour une détermination des caractéristiques physiques du sol (la densité apparente, l'indice de stabilité structurale, et la conductivité hydraulique du sol à différentes pressions d'eau). Pour l'échantillonnage d'un bloc de sol à structure conservée, dans le but d'une analyse d'image macro et mésoporale, nous avons procédé à un découpage avec un couteau à partir de la partie supérieure de l'horizon cultivé (10-30 cm). Le bloc (16/9/7 cm) est soigneusement enlevé et placé dans une boîte en carton de même taille (Photo VI.1). Ils ont été bien plastifiés pour éviter toute perturbation pendant le transport. Au laboratoire, l'imprégnation des échantillons a été effectuée après séchage à l'air dans un mélange de résines de polyester et d'acétone contenant un pigment fluorescent Uvitex O.B. (Ringrose-Voase, 1996). Ceci permet de visualiser la phase porale sous la lumière UV. Pour chaque site, le bloc de sol a été poli et coupé en 4 sections (tab VI.1).



Photo VI.1 : Echantillonnage d'un bloc de sol à structure conservée

Tableau IV.1 : Échantillonnage des blocs prélevés pour les images analysées à partir des sols dans les deux régions (Ouled Si Slimane et El Madher)

| Région | Site | Nombre de sections | Nombre d'images/section/face | |
|---|---------------|--------------------|------------------------------|-----------------------------|
| | | | Echelle 1 (macroporosité) | Echelle 2 (Mésoporosité) |
| El Madher (Sites irrigués par les eaux usées de Oued El Gourzi) | S1 Amont(S6) | 4 | 16 | 32 |
| | S2 Milieu(S5) | 4 | 16 | 32 |
| | S3 Aval(S2) | 4 | 16 | 32 |
| Ouled Si Slimane (Sites irrigués par les eaux naturelles de l'effluent El Kochbi) | S4 Milieu(S7) | 4 | 16 | 32 |
| Total | 4 | 16 | 32 | 128 |

IV.3. Méthodes d'analyses des caractéristiques physiques du sol

L'indice d'instabilité structurale (**Is**) par la méthode de Hénin selon Musy et Soutter (1991) est par définition, proportionnel aux phénomènes de sensibilité du sol à l'éclatement d'une part, et de gonflement-dispersion d'autre part. Trois échantillons de 10 g d'un de sol de 300 g sont prélevés sans destruction de la matière organique, préalablement tamisé à sec à 2 mm. Deux d'entre eux sont traités respectivement avec 5 cm³ d'alcool à 95° et 5 cm³ de benzène. Après 5 minutes d'imbibitions, les trois échantillons sont brusquement immergés dans l'eau puis après une demi-heure de contact, tamisé à 0,2 mm, ce qui permet de déterminer les termes AgA, AgB et AgE. Is est exprimé par la relation suivante:

$$Is = \frac{\text{Fraction } \varnothing \text{ } 0,2 \text{ mm (max)}}{\frac{AgA + AgB + AgE}{3} - 0,9 Sg}$$

Où AgA; AgB et AgE: fractions par poids d'éléments de diamètre > 0,2 mm subsistants après immersion respectivement (l'alcool, benzène et eau). Sg: Fraction de sable grossier dans ces fractions.

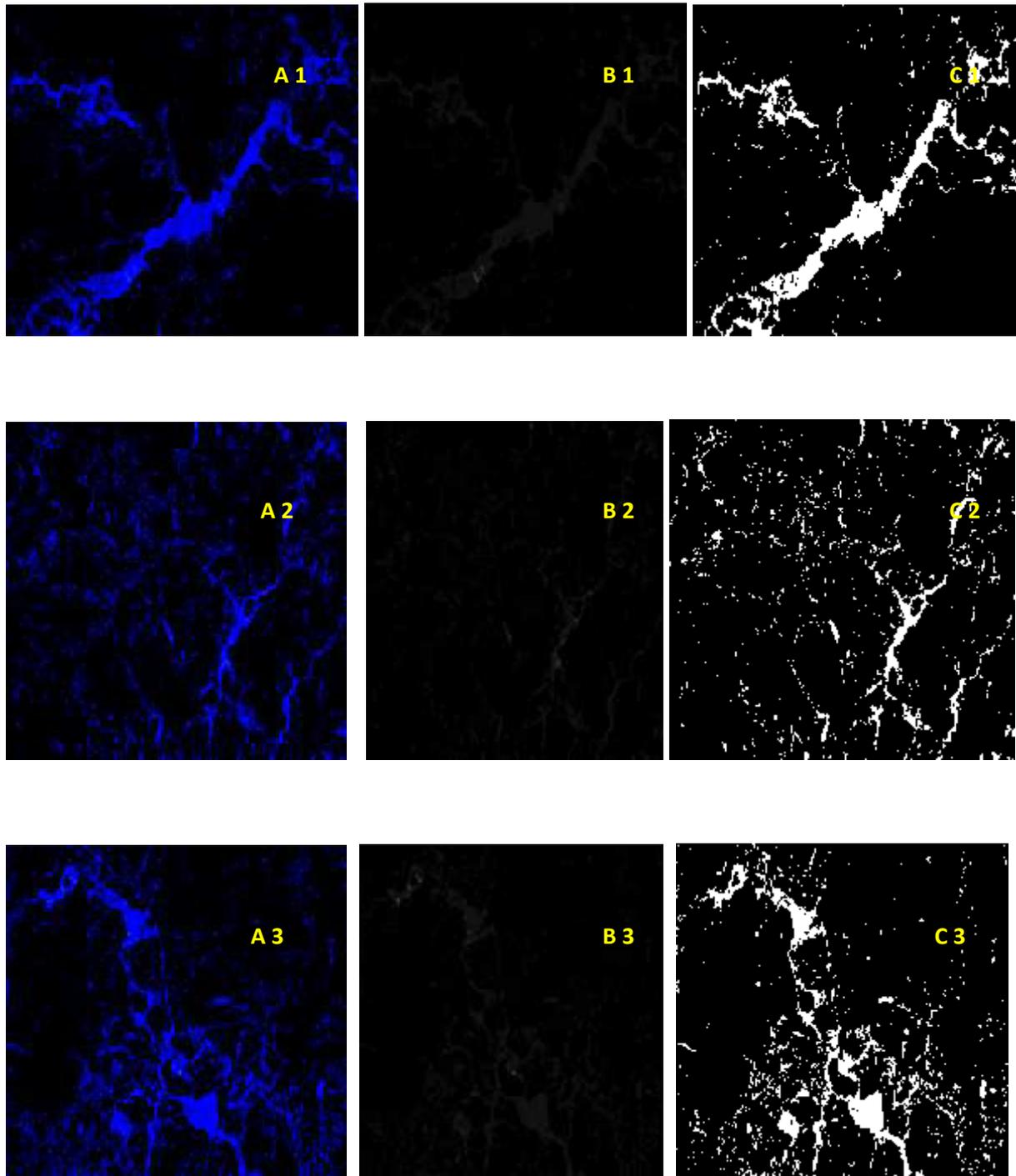
La méthode de détermination de la densité apparente du sol (D_a g/cm³) consistait à utiliser des cylindres métalliques de volume connu (126,60 cm³). La porosité totale ($P\%$) a été calculée par mesure de densité apparente et densité réelle de 2,65 g/cm³.

L'analyse d'image est utilisée pour quantifier la structure de l'espace poral (Jongerius et al., 1972; Murphy et al., 1977; Pagliai et al., 1984; Ringrose-Voase et Nys, 1990; Hallaire 1994; Bruand et al., 1996, Hallaire et al., 1998; Kribaa et al., 2001). Grâce à son approche morphologique de l'espace poral, l'analyse d'image permet des mesures mono- ou bidimensionnelles de la morphologie des vides. La porosité surfacique a été étudiée par analyse d'image à l'aide du logiciel Visilog. Les images ont été capturées sous une lumière ultraviolette réfléchie sur chaque section avec la caméra Olympus Soft Imaging Solution, modèle LC20. La taille de l'image est de 1600 × 1200 pixels (Photo IV.2). La résolution spatiale utilisée est de 30 μm correspondant à 48 × 36 mm² pour la macroporosité et 4,5 μm pour la mésoporosité correspondant à 7,2 × 5,4 mm². Cette dernière a été réalisée à l'aide d'un binoculaire Wild type 355 110 Heerbrugg Swidzerland.

Les images grises ont été ensuite binarisées. Nous avons quantifié la porosité sur les images binaires en utilisant: (i) la porosité de surface spécifique qui relie la proportion de pixels appartenant aux pores et (ii) la typologie de la forme des pores en classant la porosité en différents groupes. La taille du pore est la zone de sa section dans l'image (par pixel en mm²). Sa forme peut être estimée par plusieurs indices, nous avons conservé l'indice d'élongation e (Coster et Chermant, 1985) mesuré à partir de sa zone et son périmètre :

$$e = (\text{périmètre})^2 / 4\pi$$

Cet indice est parfaitement circulaire à sa valeur minimale de 1. Il devient allongé lorsque cette valeur est supérieure. Les paramètres de taille et de forme combinés pour établir une typologie morphologique des pores (Hallaire et Cointepas, 1993). De même, les pores sont classés selon leurs formes (arrondies, allongées et complexes). La classe morphologique des pores arrondis ($e \leq 5$) correspond à la catégorie des pores tubulaires, des cavités et des canaux. La forme allongée ($5 < e \leq 10$) correspond aux fissures; la forme complexe ($e > 10$) correspond aux pores d'assemblage d'agrégats. Cela permet de classer les macropores et les mésopores en 12 types morphologiques (tab IV.2).



Acquisition d'image → Traitement GIP → Traitement Visilog

Photo IV.2. Acquisition d'images à partir des blocs du sol du site S1 (A1, A2, A3) et leurs traitement avec le logiciel GIP (B1, B2, B3) pour binarisation, puis avec le logiciel Visilog (C1, C2, C3) pour étude de la porosité

Tableau IV.2 : Classes de catégories morphologiques des macro et mésopores

| Typologie des pores | Résolution (pixel) | diamètre équivalent () μm | Echelle d'observation | Forme classes/ indice d'élongation | | |
|---------------------|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| | | | | (A) Tubulaire $e \leq 5$ | (B) Fissurale $5 < e \leq 10$ | (C) Assemblage $e > 10$ |
| Macropores | 30 m (900 m^2) | $0,5 \times 10^6$ | $(48 \times 36 \text{ mm}^2)$ | A1 | B1 | C1 |
| | | $0,5-1,5 \times 10^6$ | | A2 | B2 | C2 |
| | | $1,5-6,0 \times 10^6$ | | A3 | B3 | C3 |
| | | $> 6,0 \times 10^6$ | | A4 | B4 | C4 |
| Mésopores | 4.5 m (20,25 m^2) | 74 | $(7.2 \times 5.4 \text{ mm}^2)$ | A1 | B1 | C1 |
| | | 74-222 | | A2 | B2 | C2 |
| | | 222-890 | | A3 | B3 | C3 |
| | | > 890 | | A4 | B4 | C4 |

IV.4. Méthodes d'analyses des caractéristiques hydrauliques du sol

La conductivité hydraulique à la saturation K_{sat} a été estimée au sens de Darcy par la méthode d'un sol maintenu en un flux d'eau permanent. Un tube en PVC ouvert aux deux extrémités dont un diamètre de 9 cm et une hauteur de 40 cm, a été délicatement enfoncé dans la couche du sol, et retiré soigneusement sans être perturber. Un bout de tulle est mis à l'aide d'un élastique en bas du tube. L'eau s'infiltrant du sol dans un béccher, est recueilli chaque 5mn dans une éprouvette pour déterminer le volume. Ceci est pendant 1 heure de temps, jusqu'à ce qu'un volume constant est atteint. K_{sat} (mm/h) a été déterminé pour les hauteurs d'eau 0,05, 0,3, 0,6 et 1 kPa et calculé par l'équation de la loi de Darcy citée par Musy et Soutter (1991).

$$K_{\text{mm/heure}} = E.V/H.S$$

Où E : hauteur de la colonne de terre en mm ; V : eau percolée pendant 1 heure d'infiltration en mm^3 ; H : hauteur de la colonne de l'eau en mm ; S : section intérieure du tube en mm^2 .

IV.5. Résultats et discussion

IV.5.1. Caractéristiques physiques du sol

IV.5.1.1. La stabilité structurale

La stabilité structurale a été plus importante dans le sol du site S6 caractérisé par une irrigation avec les eaux usées en amont de Oued El Gourzi. Elle a enregistré de faibles valeurs dans le site S8, irrigué par les eaux naturelles sous arboriculture (fig IV.1, A). En effet, Kirkham (1974) a noté que les intrants de boues dans les 4 années successives ont augmenté la teneur en matière organique du sol, celle-ci en présence des ions calciques jouant un rôle favorable sur la stabilité des ciments, ce qui provoque une amélioration des particules du sol. Ce même auteur a souligné une amélioration des structures défavorables pour les sols argileux suite à l'application des boues. Gharaibeh et *al.* (2016) ont remarqué que les résultats de la stabilité globale montrent que l'irrigation avec les eaux usées traitées augmentait significativement le pourcentage d'agrégats de sols stables par rapport au témoin. Miller et Kemper (1962) ont observé une augmentation des agrégats stables dans l'eau au moins pour une saison de croissance suite à l'incorporation de la luzerne. Ils ont attribué cette augmentation à la production de substances cimentantes grâce à une activité microbienne par mycélium fongique et actinomycète qui fournit des substrats pour stabiliser les agrégats de sol. Cependant, Vogeler (2009) a noté une valeur plus élevée de stabilité, lorsque la teneur en carbone total du sol est plus élevée dans les zones irriguées pendant de longues périodes avec les eaux usées traitées par rapport au témoin.

IV.5.1.2. La porosité totale

La porosité totale enregistrée, a été plus élevée au site S2 caractérisé par des irrigations avec les eaux usées en aval sous cultures céréalières. Alors, qu'elle a été plus faible au site S7 aux bords de l'effluent d'eau naturelle Kochbi (fig IV.1, B). Effectivement, Gharaibeh et *al.* (2016) ont noté que l'irrigation avec des eaux usées traitées pendant une longue période a entraîné une légère diminution de la densité apparente par rapport au témoin. Beaucoup de recherches ont obtenu une densité apparente plus faible, ou des valeurs de porosité plus élevées en irrigation avec des eaux usées (Mojiri, 2011 ; Mojidi, 2013 ; Vogeler, 2009). Cependant, Tarchitzky and Chen (2002) ont signalé que l'élévation de la matière organique dissoute dans les eaux usées traitées provoque une augmentation de la dispersion de l'argile en réduisant sa viscosité, et en diminuant les forces d'attraction entre les particules d'argile. Wang et *al.* (2003) ont indiqué que l'irrigation avec des eaux usées provoquait une légère augmentation du compactage du sol.

La concentration particulièrement élevée en solutés dans les eaux usées peut augmenter la densité apparente, alors que les concentrations plus faibles peuvent ne pas l'affecter de manière significative (Kunhikrishnan, 2012). Les valeurs enregistrées reflètent un effet moins favorable de l'accumulation de matière organique dans les sols situés en amont de l'effluent.

L'analyse statistique ANOVA, au moyen du test de comparaison post-hoc de Newman Keuls à $P \leq 0,05\%$ (tab IV.3) a révélé un effet très significatif des différentes pratiques d'irrigation et pratiques culturales sur les paramètres physiques du sol (Is, et P% totale). La variabilité spatiale des propriétés physiques du sol à l'intérieur des terrains agricoles est liée aux facteurs de formation du sol en raison de la nature géologique et pédologique, mais une partie de la variabilité, peut être induite par le travail du sol et d'autres pratiques de gestion. Ces facteurs interagissent entre eux sur des échelles spatio-temporelles et ils sont encore modifiés localement par des processus d'érosion et de dépôt (Iqbal and *al.*, 2005). Par conséquent, les impacts de l'irrigation des eaux usées sur les propriétés du sol dans les zones agricoles dans ces conditions climatiques peuvent être principalement différents.

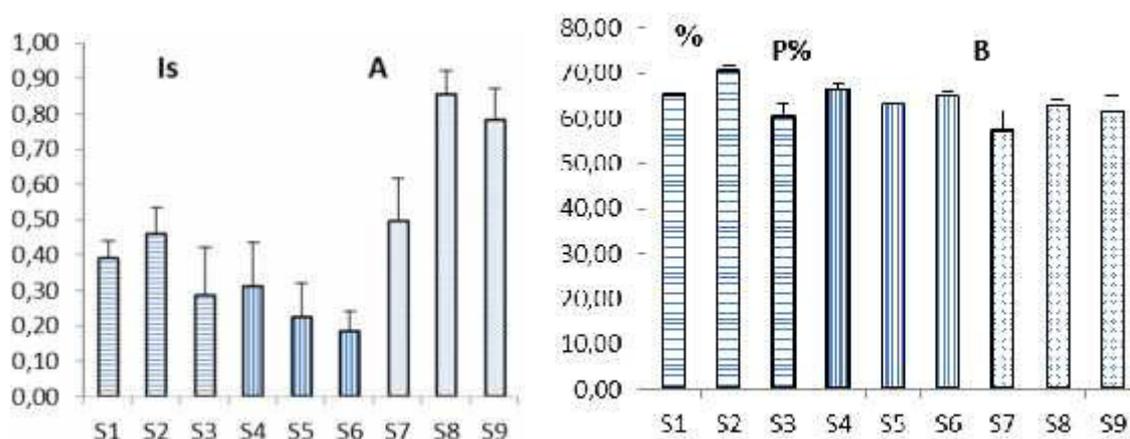
IV.5.1.3. La macroporosité

Le taux le plus élevé de macrospores total a été enregistré au site S4 ($20,13 \pm 1,87\%$) caractérisé par une irrigation naturelle de l'eau (fig IV.2, A). Le taux le plus faible ($9,98 \pm 1,71\%$) a été observé dans le sol du site S1 irrigué par les eaux usées, en aval de l'effluent d'El Guourzi. Les résultats de la figure IV.2, B, montrent que dans le site S4 (irrigué avec l'eau naturelle) et le site S3 (irrigué avec des eaux usées en amont de l'effluent d'El Guourzi), le pourcentage de macroporosité du type C (agrégats d'assemblage) est le plus élevé, suivi du pourcentage de macroporosité tubulaire. Le pourcentage de macropores allongés est le plus faible. Dans les sites S1 et S2 (irrigués par les eaux usées et situés au milieu et en aval de l'effluent El Guourzi), la macroporosité du type tubulaire est la plus élevée suivie de la porosité du type d'assemblage. La figure IV.3 montre que dans le site S4, le pourcentage de macropores de type C3 est le plus élevé, suivi du pourcentage de macropores de type A2. Dans le site S3, le pourcentage de pores de type C4 et B4 est plus élevé. Les sites S2 et S1 ont des taux plus élevés de macroporosité de type A1, A2 et C3.

Tableau IV.3 : Résultats de l'analyse statistique des caractéristiques physiques dans les sols des différents sites de l'étude

| Région | Variables Sites | | Is ^{xxx} | Da (g/cm ³) ^{xxx} | P% ^{xxx} |
|--|-----------------|----|-------------------|--|-------------------|
| El Madher (Sites irrigués par les eaux usées de Oued El Gourzi) | S1 | M | 0,39 | 0,87 | 65,13 |
| | | Et | 0,051 | 0,092 | 3,475 |
| | S2 | M | 0,46 | 0,73 | 70,49 |
| | | Et | 0,072 | 0,031 | 1,175 |
| | S3 | M | 0,29 | 1,00 | 60,30 |
| | | Et | 0,137 | 0,079 | 2,964 |
| | S4 | M | 0,31 | 0,84 | 66,28 |
| | | Et | 0,125 | 0,039 | 1,466 |
| | S5 | M | 0,23 | 0,92 | 63,30 |
| | | Et | 0,094 | 0,015 | 0,551 |
| | S6 | M | 0,19 | 0,88 | 64,94 |
| | | Et | 0,056 | 0,024 | 0,907 |
| Ouled Si Slimane (Sites irrigués par les eaux naturelles de l'effluent El Kochbi) | S7 | M | 0,50 | 1,08 | 57,34 |
| | | Et | 0,122 | 0,113 | 4,282 |
| | S8 | M | 0,86 | 0,93 | 63,08 |
| | | Et | 0,066 | 0,032 | 1,207 |
| | S9 | M | 0,78 | 0,97 | 61,55 |
| | | Et | 0,089 | 0,091 | 3,442 |
| Limites des valeurs /site | Max | | S8 | S7 | S2 |
| | Min | | S6 | S2 | S7 |
| Résultats de l'ANOVA | ddl | | 8 | 8 | 8 |
| | F | | 30,86 | 11,38 | 11,17 |
| | P | | 0,000 | 0,000 | 0,000 |

^{xxx} : hautement significatif; M: moyenne; Et: Ecart type; F: nombre de Fischer ; P: seuil de probabilité ; ddl : degré de liberté.



- : Sites irrigués par les eaux usées en amont de l'effluent El Gourzi.
- : Sites irrigués par les eaux usées en aval de l'effluent El Gourzi.
- : Sites irrigués par les eaux naturelles de l'effluent d'El Kochbi.

Figure IV.1: Histogrammes des caractéristiques physiques (P%) totale et Is dans les sols des différents sites de l'étude

L'analyse statistique (ANOVA) avec le test de comparaison multiple post-hoc de Newman Keuls à $P \leq 0,05\%$ (tab IV.4) a révélé une différence très significative entre les sites étudiés pour la macroporosité totale, la porosité tubulaire (A), la porosité fissurale (B) et la porosité d'assemblage (C). Ces résultats suggèrent que l'irrigation avec les eaux usées entraîne une réduction considérable de la macroporosité totale, tubulaire, fissurale et d'assemblage. En effet, la diminution du taux total de macroporosité peut atteindre 49,58%. Ces irrigations ont entraîné une réduction de la macroporosité de l'assemblage atteignant 37,11%. La macroporosité fissurale est affectée par les eaux usées jusqu'à 48,98%. Alors que les macropores tubulaires diminuent à 52,47% de leur totalité.

La macroporosité totale est réduite de 20,22% dans le site en aval (S1) par rapport au S3 situé en amont des effluents d'eaux usées. Effectivement, Superserg (1977) a constaté que les applications annuelles des boues liquides entraînent une augmentation de la compacité d'un sol lourd par colmatage et une diminution du volume des pores. Sahin (2008) a signalé que dans les régions à climat frais, les sols sont exposés aux cycles de gel-dégel, en particulier pendant la période du printemps. L'agrégation et, par conséquent, la structure du sol peut être positivement ou négativement affectée par les cycles de gel-dégel. Par conséquent, les impacts de l'irrigation des eaux usées sur les propriétés principales du sol dans les zones agricoles peuvent être différents.

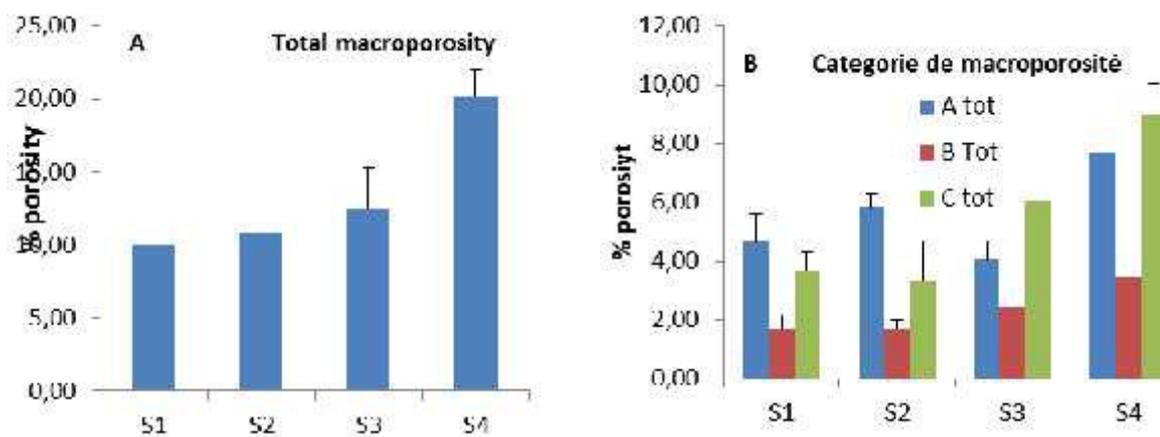


Figure IV.2 : Moyennes de la macroporosité dans les sols des sites étudiés

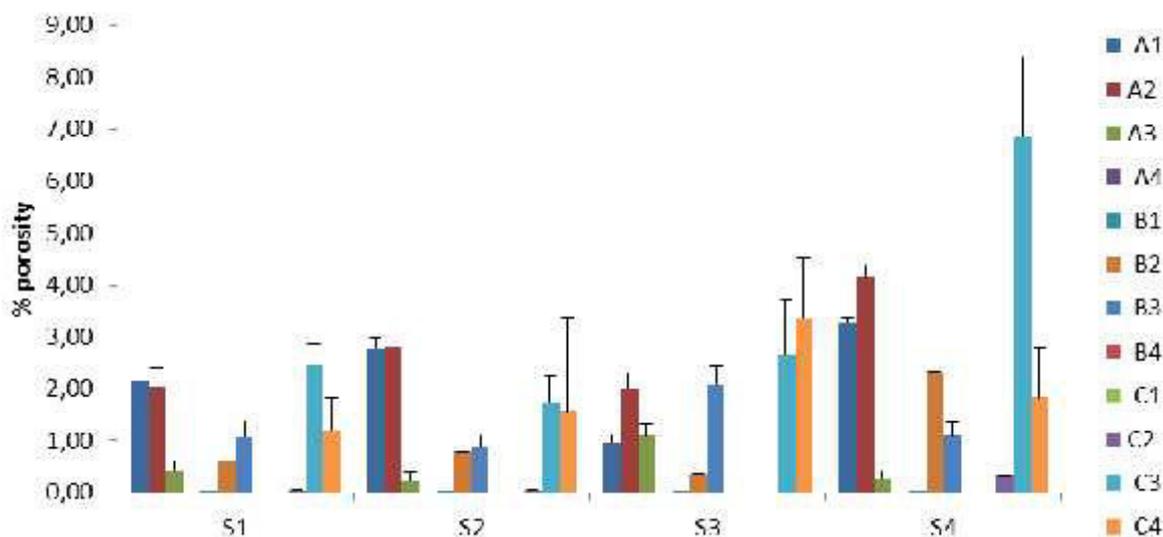


Figure IV.3 : Répartition des trois catégories de classes des macropores dans les sols des sites étudiés

IV.5.1.4. La mésoporosité

Le taux moyen maximal de mésoporosité a été enregistré au site S4 ($29,43 \pm 4,06\%$) caractérisé par une irrigation à l'eau naturelle (fig IV.4, A). Le taux le plus bas ($11,78 \pm 4,41\%$) est observé au site S1 en aval de l'effluent El Guourzi. Les résultats montrent qu'au site S4 (irrigation à l'eau naturelle), le pourcentage de mésopores C (d'assemblage) est le plus élevé, suivi du pourcentage de mésoporosité tubulaire (fig IV.4, A). Le pourcentage de mesopores allongés est le plus bas. Dans les sites irrigués par les eaux usées en amont et en aval des effluents S1, S2 et S3 d'El Guourzi, la mésoporosité de type d'assemblage est réduite. La figure IV.5 montre que le site S4, présente un pourcentage de mésopores C4 le plus élevé, suivi du pourcentage de mesopores de type A3. Dans le site S3, les mésopores de type C4 sont les plus importants. La mésoporosité totale est plus élevée dans le site en amont qu'en aval de l'effluent d'eaux usées.

L'ANOVA (tab IV.5) a révélée une différence très significative entre les sites étudiés de la mésoporosité totale et des mésoporosité de la catégorie d'assemblage (C). La mesoporosité tubulaire totale (A) et la mesoporosité totale du type fissural (B) n'ont pas montré de différence significative entre les sites étudiés. Cependant, les différentes catégories de classes mésoporales A3 et C4 ont montré une différence très significative. Alors que les mesopores A1, A2 et B3 représentaient une différence très significative. Les catégories de classes mésoporales A4 et B3 ont révélé une différence significative entre les sites de l'étude.

Ces résultats permettent de conclure que l'irrigation avec les eaux usées affecte la totalité des mésopores du sol. Cela affecte précisément la mésoporosité d'assemblage. Cette diminution peut atteindre 40,03% de la porosité totale et 18,49% des mésopores d'assemblage. La porosité totale est réduite de 37,77% en aval par rapport au site en amont des effluents des eaux usées.

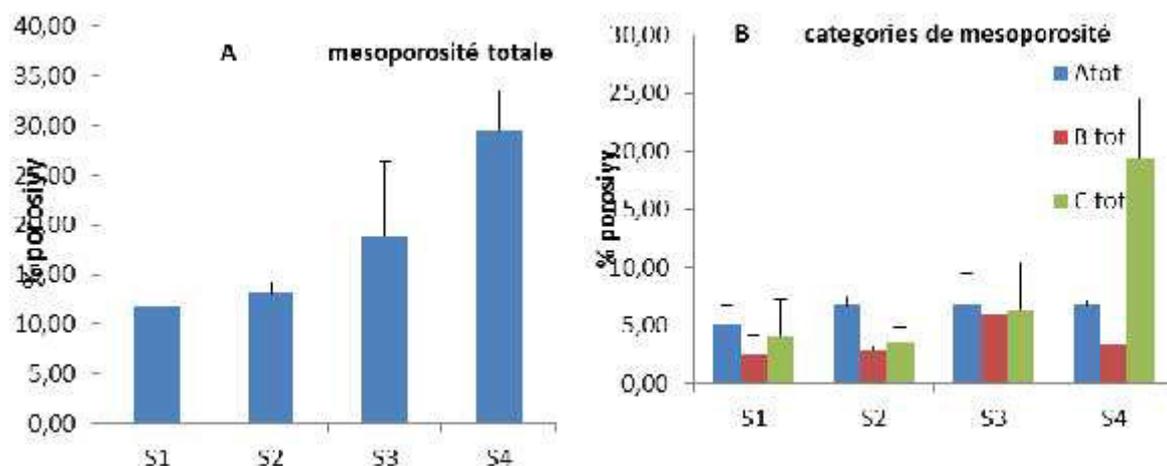


Figure IV.4 : Moyennes de méso porosité dans les sols des sites étudiés

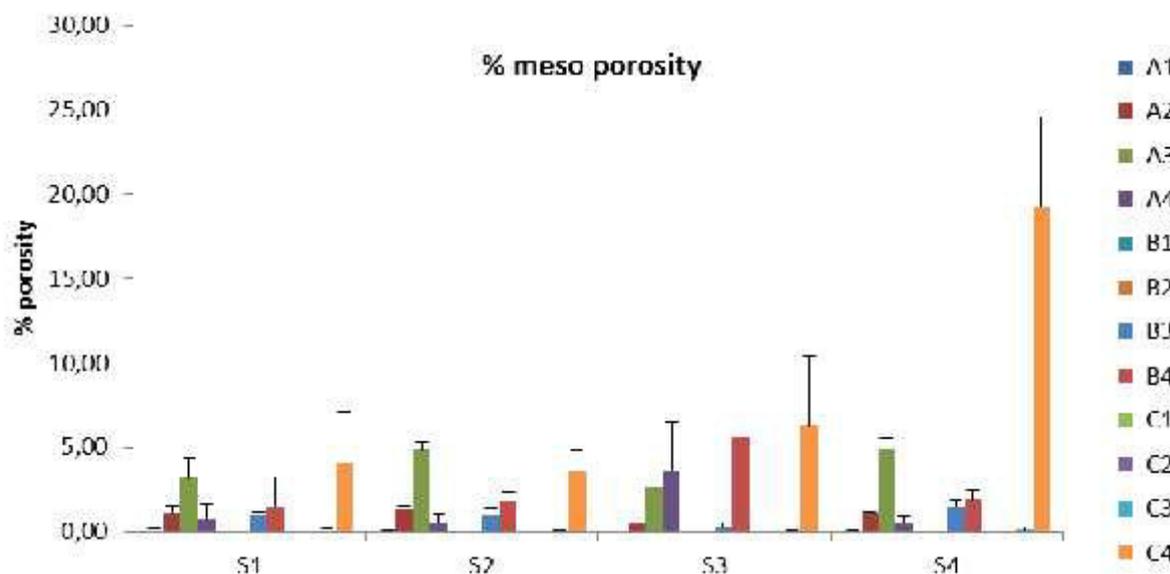


Figure IV.5 : Répartition des trois classes de catégorie de méso porosité dans les sols des sites étudiés

Tableau IV.4 : Résultats des différentes catégories de classes des macropores % dans les sols des sites de l'étude. Mcp : Macropores ; tot : total ; P : porosité; M: Moyenne; Et: Ecart type; ddl: degré de liberté; CM: Carré des moyenne; *,**,***: significatif respectivement à P=0,05; 0,01; 0,001. NS : Non significatif ; A, B, C: macropores Category; A1,.....C4: macropores category class.

| % Mcp Sites | | A1 | A2 | A3 | A4 | B1 | B2 | B3 | B4 | C1 | C2 | C3 | C4 | A tot | B tot | C tot | P tot |
|-------------|----|----------|---------|---------|------|------|--------------------|---------|------|------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|----------|
| S1 | M | 2,16 | 2,05 | 0,43 | 0,00 | 0,00 | 0,60 | 1,07 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 2,44 | 1,19 | 4,64 | 1,68 | 3,67 | 9,98 |
| | Et | 0,44 | 0,36 | 0,20 | 0,00 | 0,00 | 0,24 | 0,30 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,42 | 0,63 | 0,94 | 0,48 | 0,62 | 1,71 |
| S2 | M | 2,78 | 2,82 | 0,22 | 0,00 | 0,00 | 0,79 | 0,88 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 1,73 | 1,56 | 5,81 | 1,68 | 3,34 | 10,83 |
| | Et | 0,20 | 0,26 | 0,17 | 0,00 | 0,00 | 0,11 | 0,23 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,51 | 1,80 | 0,46 | 0,32 | 1,34 | 1,32 |
| S3 | M | 0,97 | 1,98 | 1,09 | 0,00 | 0,00 | 0,35 | 2,08 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 2,66 | 3,37 | 4,04 | 2,44 | 6,03 | 12,51 |
| | Et | 0,13 | 0,33 | 0,23 | 0,00 | 0,00 | 0,08 | 0,35 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,04 | 1,17 | 0,62 | 0,41 | 1,98 | 2,74 |
| S4 | M | 3,27 | 4,14 | 0,29 | 0,00 | 0,00 | 2,33 | 1,09 | 0,00 | 0,00 | 0,32 | 6,85 | 1,83 | 7,70 | 3,43 | 9,00 | 20,13 |
| | Et | 0,12 | 0,25 | 0,13 | 0,00 | 0,00 | 0,45 | 0,25 | 0,00 | 0,00 | 0,12 | 1,56 | 0,95 | 0,34 | 0,62 | 1,03 | 1,87 |
| ddl | | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| CM | | 3,95 *** | 4,03*** | 0,63*** | / | / | 0,00 ^{NS} | 3,20*** | / | / | 0,09*** | 21,53*** | 3,65*** | 10,40*** | 2,76*** | 27,36*** | 85,71*** |

Tableau IV.5 : Résultats des différentes catégories de classes des méso pores % dans les sols des sites de l'étude. Msp : Meso pores ; tot : total ; P : porosité; M: Moyenne; Et: Ecart type; ddl: degré de liberté; CM: Carré des moyenne; *,**,***: significatif respectivement à P=0,05; 0,01; 0,001 ; NS : Non significatif A, B, C: méso pores Category; A1,.....C4: méso pores category class.

| % Msp Sites | | A1 | A2 | A3 | A4 | B1 | B2 | B3 | B4 | C1 | C2 | C3 | C4 | A tot | B tot | C tot | P tot |
|-------------|----|--------|--------|---------|-------|------|------|--------|--------|------|------|--------------------|-----------|--------------------|--------------------|-----------|-----------|
| S1 | M | 0,12 | 1,07 | 3,17 | 0,79 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 1,49 | 0,00 | 0,00 | 0,07 | 4,08 | 5,15 | 2,49 | 4,14 | 11,78 |
| | Et | 0,04 | 0,45 | 1,22 | 0,88 | 0,00 | 0,00 | 0,18 | 1,71 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | 3,04 | 1,51 | 1,73 | 3,14 | 4,41 |
| S2 | M | 0,12 | 1,29 | 4,84 | 0,50 | 0,00 | 0,00 | 1,02 | 1,82 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 3,55 | 6,74 | 2,84 | 3,58 | 13,16 |
| | Et | 0,03 | 0,17 | 0,41 | 0,56 | 0,00 | 0,00 | 0,41 | 0,49 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 1,26 | 0,75 | 0,38 | 1,31 | 1,06 |
| S3 | M | 0,03 | 0,49 | 2,61 | 3,61 | 0,00 | 0,00 | 0,29 | 5,55 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 6,29 | 6,75 | 5,84 | 6,34 | 18,93 |
| | Et | 0,01 | 0,04 | 0,13 | 2,87 | 0,00 | 0,00 | 0,22 | 3,36 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 4,06 | 2,75 | 3,23 | 4,09 | 7,52 |
| S4 | M | 0,11 | 1,12 | 4,96 | 0,54 | 0,00 | 0,00 | 1,46 | 1,89 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | 19,23 | 6,72 | 3,35 | 19,36 | 29,43 |
| | Et | 0,02 | 0,09 | 0,55 | 0,42 | 0,00 | 0,00 | 0,38 | 0,62 | 0,00 | 0,00 | 0,17 | 5,32 | 0,43 | 0,75 | 5,16 | 4,06 |
| ddl | | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| CM | | 0,01** | 0,48** | 5,58*** | 9,11* | / | / | 0,94** | 14,72* | / | / | 0,01 ^{NS} | 218,74*** | 2,52 ^{NS} | 9,16 ^{NS} | 220,99*** | 257,62*** |

IV.5.2. Caractéristiques hydrodynamiques du sol

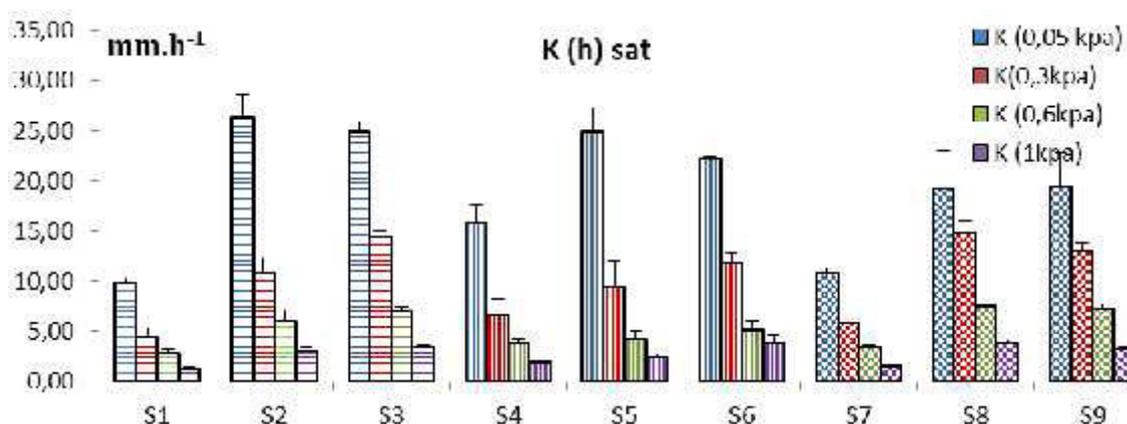
Les taux d'infiltration à saturation K_{sat} (fig IV.6), pour une pression de 0,05 kPa, ont été les meilleurs dans les sites S2 et S3 caractérisés par des irrigations en eaux usées en aval de l'effluent El Gourzi. Mais globalement pour cette pression, K_{sat} est plus importante dans les sols irrigués en eaux usées. Pour les autres pressions, la différence est moins remarquable. La capacité d'infiltration rapide d'un sol est estimée par la macroporosité. Rabbi et *al.* (2014) mentionnent que les pourcentages d'argile, de densité apparente et de porosité ont une forte influence sur les K_{sat} . Ces résultats sont en accord avec Bardhan et *al.* (2016) qui ont signalé une diminution du taux d'infiltration due au colmatage des pores du sol par les matières en suspension présentes dans les eaux usées traitées. Des études antérieures avec une texture du sol similaire (argile) de l'étude actuelle ont abouti à la même conclusion que l'application des eaux usées a entraîné un colmatage des pores, ce qui a entraîné une réduction de la porosité du sol et une diminution de l'infiltration du sol (Viviani and Iovino, 2004). Bien que Morel et *al.* (1978) ont montré que la perméabilité d'un sol augmente de façon significative dans les parcelles enrichies en boues, car la richesse en matière organique des boues améliore le bilan hydrique et augmente la réserve d'eau utile; cela favorise les processus de stabilisation des agrégats de sols et, en particulier, donne au sol une meilleure perméabilité par rapport à une structure moins stable. Il existe une relation étroite entre la distribution de la taille des pores et la teneur en eau du sol en raison du fait que les macropores contrôlent l'aération et le drainage, les mésopores contrôlent la conductivité de l'eau, les micropores contrôlent la rétention d'eau disponible pour les plantes et les ultra micropores contrôlent la rétention d'eau principalement indisponible pour les plantes (Sahin and *al.*, 2002).

L'analyse statistique avec le test de comparaison post-hoc de Newman Keuls à $P \leq 0,05\%$ (tab IV.6) a révélé un effet très significatif des différentes pratiques d'irrigation et pratiques culturales sur les paramètres hydriques du sol ($K_{0.05}$, $K_{0.3}$, $K_{0.6}$ et K_1). La conductivité hydraulique est parmi les propriétés hydrauliques du sol affectée par la porosité du sol et la distribution de la taille des pores (Gonçalves and *al.*, 2010 ; Wang and *al.*, 2003).

Tableau IV.6 : Résultats de l'analyse statistique des caractéristiques hydriques dans les sols des différents sites de l'étude

| Région | Variables Sites | | K 0.05 kPa ^{xxx} | K 0.3 kPa ^{xxx} | K 0.6 kPa ^{xxx} | K 1 kPa ^{xxx} |
|--|-----------------|----|---------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|
| El Madher (Sites irrigués par les eaux usées de Oued El Gourzi) | S1 | M | 9,81 | 4,53 | 2,78 | 1,29 |
| | | Et | 0,473 | 0,839 | 0,422 | 0,134 |
| | S2 | M | 26,36 | 10,89 | 6,06 | 3,10 |
| | | Et | 2,231 | 1,401 | 1,091 | 0,299 |
| | S3 | M | 24,91 | 14,44 | 7,07 | 3,41 |
| | | Et | 1,000 | 0,610 | 0,358 | 0,172 |
| | S4 | M | 15,89 | 6,67 | 3,83 | 1,91 |
| | | Et | 1,649 | 1,536 | 0,477 | 0,191 |
| | S5 | M | 25,85 | 9,46 | 4,20 | 2,43 |
| | | Et | 2,346 | 2,642 | 0,919 | 0,274 |
| | S6 | M | 22,28 | 11,83 | 5,18 | 3,90 |
| | | Et | 1,822 | 1,006 | 0,917 | 0,826 |
| Ouled Si Slimane (Sites irrigués par les eaux naturelles de l'effluent El Kochbi) | S7 | M | 10,80 | 5,89 | 3,46 | 1,57 |
| | | Et | 0,489 | 0,495 | 0,200 | 0,111 |
| | S8 | M | 19,18 | 14,89 | 7,51 | 3,81 |
| | | Et | 3,878 | 1,134 | 0,593 | 0,360 |
| | S9 | M | 19,47 | 13,06 | 7,24 | 3,19 |
| | | Et | 3,274 | 0,806 | 0,501 | 0,212 |
| Valeurs limites /site | Max | | S2 | S8 | S8 | S6 |
| | Min | | S1 | S1 | S1 | S1 |
| Résultats de l'ANOVA | ddl | | 8 | 8 | 8 | 8 |
| | F | | 39,44 | 41,53 | 35,31 | 38,02 |
| | P | | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |

^{xxx} : hautement significatif; M: moyenne; Et: Ecart type; F: nombre de Fischer ; P: seuil de probabilité ; ddl : degré de liberté.



-  : Sites irrigués par les eaux usées en aval de l'effluent El Gourzi.
-  : Sites irrigués par les eaux usées en amont de l'effluent El Gourzi.
-  : Sites irrigués par les eaux naturelles de l'effluent d'El Kochbi.

Figure IV.6 : Histogrammes des caractéristiques hydrodynamiques des sols (K sat) dans les différents sites de l'étude

IV.6. Conclusion

La stabilité structurale a été meilleure dans le site caractérisé par l'irrigation avec les eaux usées en amont de l'effluents El Gourzi sous céréaliculture. Ceci est dû, d'une part, à l'apport de matière organique et d'ions calcium qui jouent un rôle de ciments provoquant l'amélioration de l'agrégation des particules du sol selon Kirkham (1974). D'autre part, à la culture des céréales qui affecte l'augmentation de la production de substances cimentantes par l'activité microbienne par mycélium fongique et actinomycète et qui fournit des substrats pour stabiliser les agrégats de sol selon Miller et Kemper (1962).

Le taux le plus élevé de macropores total a été enregistré dans le site caractérisé par une irrigation avec l'eau naturelle comparée aux sites irrigués par les eaux usées aux bords de l'effluent El Guourzi. La macroporosité fissurale peut atteindre une réduction jusqu'à 48,98%. Alors que la macroporosité tubulaire diminue à 52,47% dans les sites irrigués par les eaux usées par rapport à ceux irrigués à l'eau naturelle.

Le taux moyen maximal de mésoporosité totale a été enregistré sur le site caractérisé par l'irrigation avec des eaux naturelles. La diminution du taux de mésopores peut atteindre 40,03% dans les sites à irrigations aux eaux usées.

Toutefois, les taux d'infiltration à saturation sont plus élevés dans les sites caractérisés par l'irrigation aux eaux usées en aval des effluents. Ceci a été expliqué par le colmatage des pores dû aux fortes charges en matières organiques dans les eaux usées en amont de Oued El Gourzi.

Chapitre V : Interactions entre les
caractéristiques du sol sous les
conditions d'irrigation par les eaux usées

V.1. Introduction

Bien que les mécanismes contrôlant le comportement du flux dans les sédiments macroporaux saturés soient assez bien compris (McKay et *al.*, 1993; Hinsby et *al.*, 1996; Jorgensen et *al.*, 2002), les phénomènes de flux dans des conditions partiellement saturées dans le domaine des macropores n'ont pas été bien caractérisés. Plusieurs processus physiques jouent un rôle important dans le flux macroporal et ceux-ci sont décrits par Jarvis (2007). Beaucoup de processus de flux se produisent à l'échelle des pores, mais ont des conséquences importantes pour le flux et le transport à l'échelle du champ. L'humidité des sols, la détermination des macropores et l'interaction macropore-matrice sont inter reliées et ont été identifiées comme des mécanismes importants pour contrôler l'étendue du flux macroporal (Shipitalo et *al.*, 1990; Heppell et *al.*, 2002; Weiler and Naef, 2003a ; Weiler and Naef 2003b ; Tallon et *al.*, 2007 ; Cey, 2009).

En raison de leur activité de creusement et bioturbation, les vers de terre sont très impliqués dans la création de la macroporosité du sol (Bottinelli et *al.*, 2010; Ehlers, 1975). L'activité de la minéralogie produit des changements à différentes échelles de porosité du sol, y compris la mésoporose (entre 1.000 et 30 μ m Dia.) (Lamandé et *al.*, 2003).

V.2. ACP paramétrique des résultats obtenus

Afin d'étudier l'interaction entre les paramètres physicochimiques des sols et les communautés de vers de terre des sites étudiés, l'analyse en composantes principales (ACP) a été utilisée. Cette procédure permet de regrouper ou de répartir les sites d'échantillonnage autour des axes principaux en fonction des paramètres physico-chimiques et biologiques de vers de terre, ce qui facilite l'observation des liens possibles entre les variables et les endroits où ils sont le plus représentés (fig V.1).

La contribution des axes principaux à la variation totale est de 41,90% pour l'axe 1 et de 19,96% pour l'axe 2, ce qui représente un total de 61,86%, ce qui est bien acceptable. Sur le graphique de distribution des variables, les deux axes; 1 et 2 opposent deux groupes de variables: les paramètres biologiques des vers de terre (biomasse totale, abondance totale, abondance de vers adultes) et paramètres d'infiltration physique (infiltration à saturation, K 0,05 kPa, K 0,3 kPa, K 0,6 kPa et K1 kPa). Le premier groupe de variables biologiques est représenté par le site S5, caractérisé par des irrigations avec des eaux usées en amont de Oued

El Ghourzi sous cultures céréalières (blé/luzerne). Le deuxième groupe de caractéristiques d'infiltration est représenté par les sites S2 et S3. Ces sites sont irrigués avec des eaux usées en aval sous cultures céréalières et arboricoles.

Ce groupe inclut les caractéristiques chimiques; pH et CE. L'axe 1 est fortement corrélé avec l'indice de stabilité structurale. Il divise les caractéristiques des vers de terre étudiées en deux sous-groupes. L'un d'entre eux est bien représenté par S4 et S6 avec l'irrigation par les eaux usées en amont. Ce groupe comprend la MO et le CaCO₃ actif.

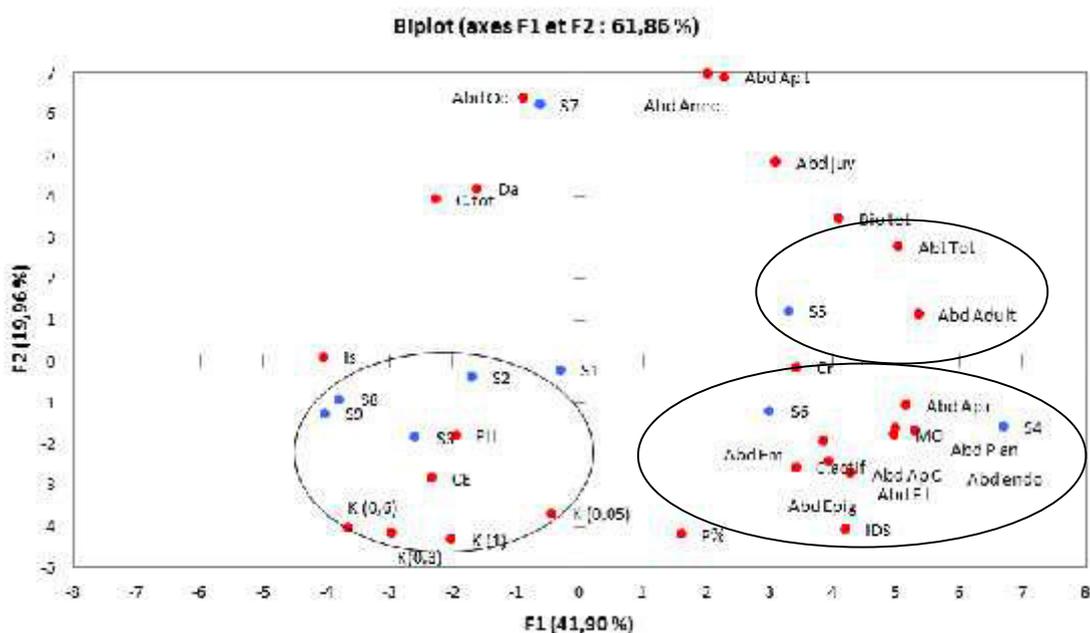


Figure V.1 : ACP de l'interaction entre les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol

V. 3. Corrélation entre les caractéristiques des vers de terre et la porosité %

La matrice de corrélation de Pearson au seuil de 5% (tab V.1 ; V.2) montre une corrélation significative positive entre la biomasse des vers de terre et le pourcentage de macroporosité (tubulaire). Pour les mésopores, une corrélation significative positive est enregistrée pour les classes A4 et B4.

Ces résultats permettent de supposer que l'effet de la matière organique est fortement dominant sur l'obturation des macropores A1, A2, B2, C2, C3 et la macroporosité totale. D'autre part, la biomasse des vers de terre peut entraîner une évolution, et par conséquent une

amélioration de la macroporosité tubulaire. Toutefois, cette amélioration peut également affecter les mesopores de catégorie A4 et B4. Ces derniers types de porosité sont certainement affectés par les vers de terre à leur stade juvénile. Effectivement, les vers de terre peuvent contribuer à la régénération des zones compactées par creusement (Capowiez *et al.*, 2009).

Ghanem *et al.* (2017) ont noté qu'au moment de l'échantillonnage, les vers juvéniles représentent 46% de l'abondance totale. Ceux-ci peuvent régénérer au cours de leur croissance une gamme importante de macro et mésopores (Photo V.1).

Table V.1 : Valeurs représentatives de corrélation de Pearson à un niveau de signification alpha = 0,05 entre les paramètres de macroporosité% et les caractéristiques des vers de terre

| Paramètres de porosité% / Earthworms | A1 | A2 | A tot | B2 | C2 | C3 | Tot mcp |
|---------------------------------------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|---------|
| Abondance (individu.m ⁻²) | -0,69 | -0,62 | -0,66 | -0,71 | -0,70 | -0,67 | -0,52 |
| Biomasse (g.m ⁻²) | -0,73 | -0,58 | 0,60 | -0,63 | -0,65 | -0,58 | -0,44 |

Table V.2 : Valeurs représentatives de corrélation de Pearson à un niveau de signification alpha = 0,05 entre les paramètres de mésoporosité% et les caractéristiques des vers de terre

| Paramètres de porosité% / Earthworms | A1 | A2 | A4 | B3 | B4 | C4 | C tot | Tot mes |
|---------------------------------------|-------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------|---------|
| Abondance (individu.m ⁻²) | -0,50 | -0,34 | 0,49 | -0,67 | 0,43 | -0,63 | -0,63 | -0,42 |
| Biomasse (g.m ⁻²) | -0,63 | -0,50 | 0,65 | -0,75 | 0,53 | -0,55 | -0,55 | -0,32 |

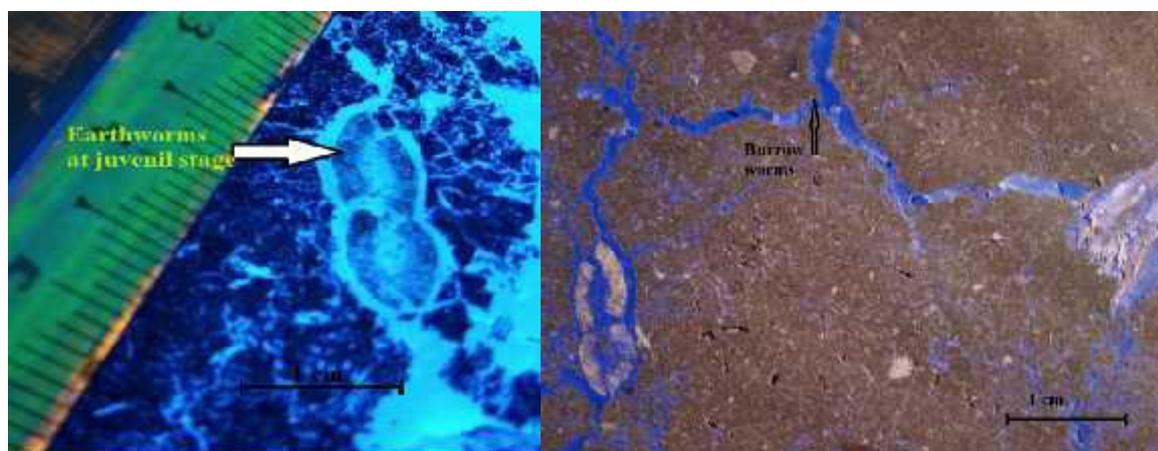
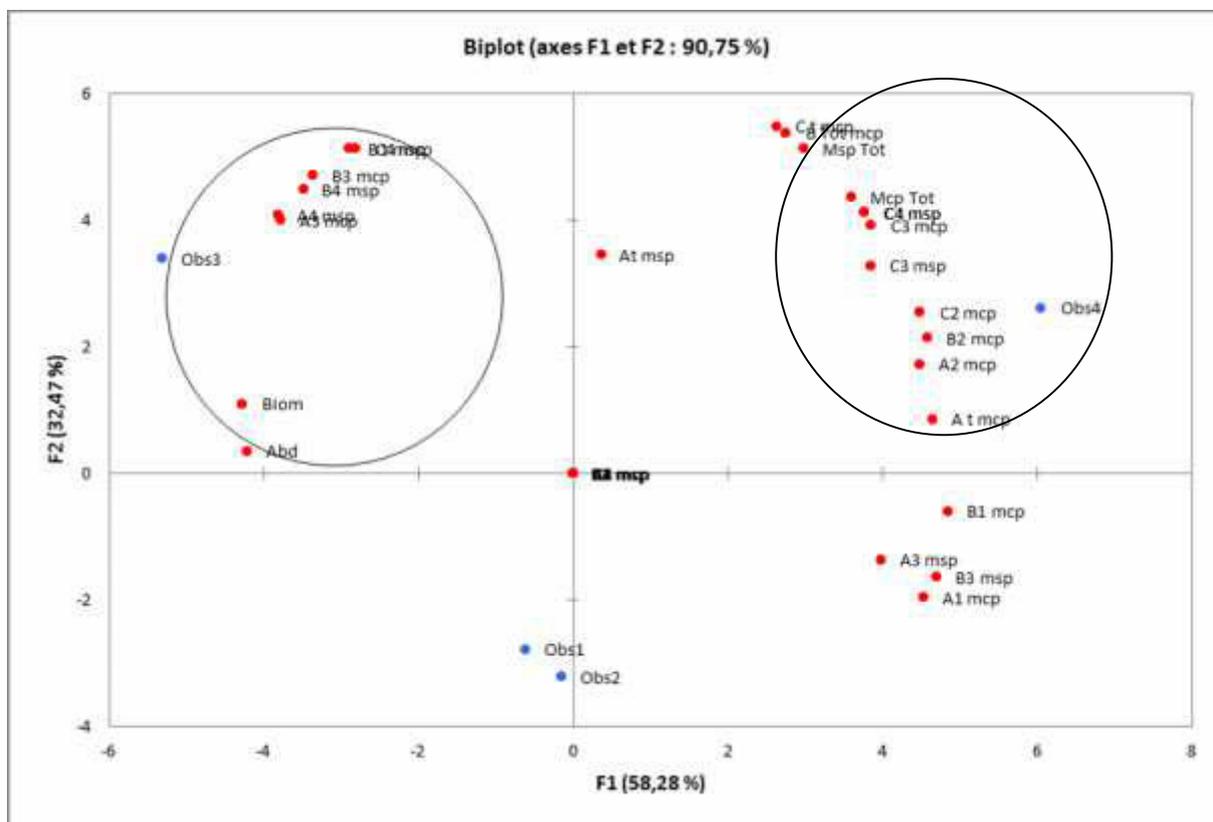


Photo V.1 : Galeries occupées par les vers de terre juvéniles dans le sol du site S2

V. 4. ACP des paramètres de porosité et des vers de terre

Afin d'étudier la relation entre les paramètres macro et mesoporosités mesurés à partir de l'analyse d'image et des caractéristiques des vers de terre des différents sites d'étude, l'Analyse en composantes principales (ACP) a été utilisée (Fig.V.2). La contribution des axes principaux à la variation totale est de 58,28% pour l'axe 1 et de 32,47% pour l'axe 2, ce qui représente un total de 90,75%, ce qui est très favorable. Sur le graphique de distribution des variables, les deux axes; 1 et 2 contrastent deux groupes de variables. Le premier groupe comprend la macroporosité totale, la mésoporosité totale, la plupart des macropores quantifiés (A2, B2, C2, C3), ainsi que les mésopores (C3 et C4). Le deuxième groupe inclut les macropores de type (A3 et B3) et les mésopores de type (A4 et B4). Le premier groupe de pores quantifiés est représenté par le site S4, caractérisé par l'irrigation avec les eaux naturelles de l'effluent El Kochbi. Le deuxième groupe est représenté par le site S3 et les caractéristiques des vers de terre. Ce dernier site est irrigué avec des eaux usées, situé en amont, et caractérisé par la plus grande valeur d'abondance et de biomasse de vers de terre.

Effectivement, Hallaire et *al.* (2000) ont observés que l'activité des vers de terre de type *P. corethrurus* provoque un compactage de sol, et produit des CAST ou moulage qui se coalesce et donc obstrue la plupart de la porosité du sol près de la surface. Cependant, selon Bottinelli et *al.* (2010), le compactage du sol à la suite de la dissolution des CAST, pourrait être compensé par la forte activité de l'espèce *M. Posthuma*. De ce fait, la porosité structurale des sols dépendrait de l'équilibre entre la production et la dégradation du CAST, et les caractéristiques du sol s'amélioreront lorsque la production prédomine. Nos résultats nous permettent de supposer que la matière organique résultant des intrants successifs des eaux usées a un grand effet sur le l'obturation de la macro et la mésoporosité du sol. Cette matière organique joue un rôle considérable sur la prolifération des vers de terre dans les sols cultivés et irrigués par les eaux usées. Leur activité entraîne une modification dans certaines catégories de classes porales et peut améliorer d'autres.



Obs1 : S1 ; Obs2 : S2; Obs3 : S3; Obs4 : S4.; t: tot.

Figure V.2 : Dispersion des individus dans le plan ACP 1-2 effectuée sur des paramètres de porosité quantifiés par analyse d'image et les caractéristiques de vers de terre

Chapitre VI : Essai expérimentale (in vitro)
des effets des boues résiduaires sur les
caractéristiques du sol en présence d'une
culture

VI.1. Introduction

Le concept de « drilosphère », introduit par Bouché (1975) désigne le volume de sol qui est sous influence des vers de terre, délimitant ainsi leurs domaines fonctionnels. Cette zone, concerne toute région de sol ayant été en contact avec des composés excrétés par les vers ou en contact direct avec le vers de terre, que ce soit à sa surface, ayant été ingéré (entrant en contact avec l'appareil digestif) ou encore, toutes les structures laissées par le vers de terre après son passage (turricules et galeries). La drilosphère va pouvoir interagir avec d'autres domaines fonctionnels du sol (Brown *et al.*, 2000; Lavelle, 2002). De cette interaction va résulter un effet significatif sur : (1) le volume de la litière, (2) l'agrégation et la porosité du sol et enfin (3) la croissance de la plante en interagissant via sa rhizosphère qui représente la région de sol influencée par les racines et les microorganismes associés. Tous ces changements physiques, chimiques et biochimiques relèvent également de l'activité bactérienne à l'intérieur de la drilosphère, elle-même stimulée par la présence de vers de terre.

Par la complexité de toutes ces notions, nous allons dans ce chapitre, mettre en évidence par des essais expérimentaux *in vitro* l'impact des eaux usées et des boues issus de la station d'épuration de la ville de Batna, sur les vers de terre (lombric) et sur quelques propriétés physiques du sol, sous des conditions contrôlées au laboratoire en présence d'une culture.

VI.2.1. Matériels et méthodes

Le substratum utilisé dans notre essai est un sol reconstitué comprenant 1/3 de sol ; 1/3 de sable ; et 1/3 de fumier. Nous avons utilisé dans notre expérimentation la variété végétale Waha du blé. Le Blé est un terme générique qui désigne plusieurs céréales appartenant au genre *Triticum*.

Le plan de l'essai consiste en un plan factoriel avec répétition. Dans chaque pot, environ 5 kg du mélange sol-fumier-sable. Ils ont été bien mélangés et déposés sur une couche de 5 cm de gravier pour faciliter le drainage. Nous avons semé dans chaque pots 10 graines de blé de la variété (Waha) préalablement misent en germination dans du coton imbibé d'eau dans des boîtes de pétries.

Le premier facteur testé est celui des vers de terre ; nous avons donc mis dans les pots en 3 blocs de 4 répétitions 10 vers de terre prélevés à partir des points d'échantillonnage des sites d'El Madher (S3 en amont de Oued El Gourzi), soit une densité de 31,4 individus/m². La communauté prélevée est constituée principalement de l'espèce *Ap. trapézoïdes*. 03 autres blocs de 04 répétitions sont laissés sans vers de terre.

Tableau VI.1 : Caractéristiques physico-chimiques du sol utilisé

| Paramètre | Valeur |
|-------------------------|----------|
| pH | 7.97 |
| CE | 0.59ds/m |
| MO | 1.83% |
| CaCO ₃ % act | 20% |
| CaCO ₃ % tot | 15.8% |
| H sat | 40.3% |
| Argile % | 38% |
| Limon % | 41% |
| Sable % | 21% |

Le type d'eaux d'irrigation été le deuxième facteur testé afin de déterminer son effet sur le matériel végétal et sur les vers de terre. Dans cet essai, nous avons choisis 3 types d'irrigation ; l'eau naturelle ou de robinet, eaux usées traitée par la STEP, eaux usées brutes de l'oued. En fin de l'expérimentation, qui a duré 30 jours, les analyses du sol sont effectuées sur : la densité apparente **Dapp** (g/cm³), la porosité **P%**, l'indice de stabilité **Is** et la conductivité hydraulique à saturation **Ksat (h)**, avec les méthodes expliquées dans le chapitre III. Pour le matériel végétal nous avons procédé à faire des mesures de :

- la longueur de la partie aérienne de la plante au moyen d'une règle ;
- la longueur de la partie souterraine
- la longueur de la 3^{ème} feuille.

VI.2.2. Dispositif expérimentale

Le dispositif a été placé comme suite :

- 04 pots avec vers de terre irrigués avec eau de robinet ; (ER. AV)
- 04 pots avec vers de terre irrigués avec eau usée de l'Oued El Guourzi ; (ENT. AV)
- 04 pots avec vers de terre irrigués avec eau usée traitée par la STEP ; (ET. AV)
- 04 pots sans vers de terre irrigués avec eau de robinet ; (ER. SV)
- 04 pots sans vers de terre irrigués avec eau usée de l'Oued El Guourzi ; (ENT. SV)
- 04 pots sans vers de terre irrigués avec eau usée traitée par la STEP ; (ET. SV)

Au total 24 pots ont été placés en essai. Ces pots ont été enveloppés dans des sachets noirs pour y maintenir l'obscurité, favorisant l'activité lombricienne.



Photo VI.1 : Dispositif de l'essai expérimentale mis en place

VI.3. Résultats et discussion

VI.3.1. Compartiment sol

Exprimée par la masse totale d'un sol par unité de volume, la densité apparente conditionne la croissance des plantes (Webber, 1984). La moyenne de la densité apparente des sols de notre expérimentation montre une différence allant de 1,21 g/cm³ du sol du traitement irrigué par l'eau non traitée de Oued El Guourzi sans présence de vers de terre (ENT. SV.), à 1,45 g/cm³ dans le traitement en eau de robinet et sans vers de terre (ER. SV) après 30 jours de la mise en place du dispositif (fig VI.1.A). Cependant, la comparaison effectuée pour les valeurs de densité apparente des sols dans les pots irrigués par de différents types d'eaux (fig VI.1.B), nous a permis de constater que la porosité est plus élevée dans les pots irrigués avec l'eau de robinet. Cependant Karoun (2008), a pu montrer que la densité apparente est proportionnelle aux doses des boues, elle est de 0,92g/cm³ pour le témoin et augmente avec l'apport des boues jusqu'à atteindre 1,11g/cm³ pour le substrat traité par 30% des boues résiduaires.

La figure VI.1.C, montre la moyenne des valeurs de la stabilité structurale des 6 traitements étudiés. La valeur la plus élevée a été marquée dans le traitement avec eau de robinet sans vers de terre. Cependant la valeur la plus faible a été enregistrée dans le sol irrigué avec des eaux traitées par la station d'épuration et avec vers de terre. L'histogramme de la figure VI.1.D, montre que la stabilité structurale est meilleure dans les pots contenant les vers de terre que ceux sans vers. Effectivement, la stabilité structurale d'un sol peut présenter le degré de résistance vis-à-vis des actions dégradantes (eau, pluie, destruction des ciments organiques...). La boue considérée comme un substrat susceptible de contribuer au maintien du stock humique des sols et par conséquent d'améliorer leur stabilité structurale (Gomez et Just, 1984). La teneur en matière organique d'un sol est un des éléments-clé participant à la stabilité de la structure et contribuant à limiter les risques d'érosion des sols, en particulier dans les sols à textures limoneuse (Ifen, 1998). Aussi, Kirkham (1974), note que les apports des boues résiduaires au cours de 4-années successives ont élevé la teneur en matière organique du sol des 15 premiers cm de 1,2 à 2,4%. En effet, l'apport de la matière organique et des ions calciques jouent un rôle favorable sur la stabilité des ciments qui provoquent l'amélioration des particules du sol.

La figure VI.2 montre la moyenne des valeurs de la conductivité hydraulique à saturation à une pression de 0,3 , 0,6 et 1 kPa dans les sols à différents traitements de notre

expérimentation. La moyenne la plus élevée pour la pression de 0,3 kPa a été enregistrée dans le sol des pots à irrigation avec l'eau non traitée et avec vers de terre. Pour la même pression la conductivité hydraulique à saturation a été plus faible dans les sols irrigués par l'eau de robinet et sans vers de terre. Pour une pression de 0,6 kPa la moyenne la plus élevée a été aussi enregistrée dans les pots irrigués par les eaux non traitées et avec vers. La figure VI.3, montre que la moyenne de conductivité hydraulique à saturation pour les différentes pressions appliquées, sont nettement plus élevées dans le sol des pots contenant des vers de terre.

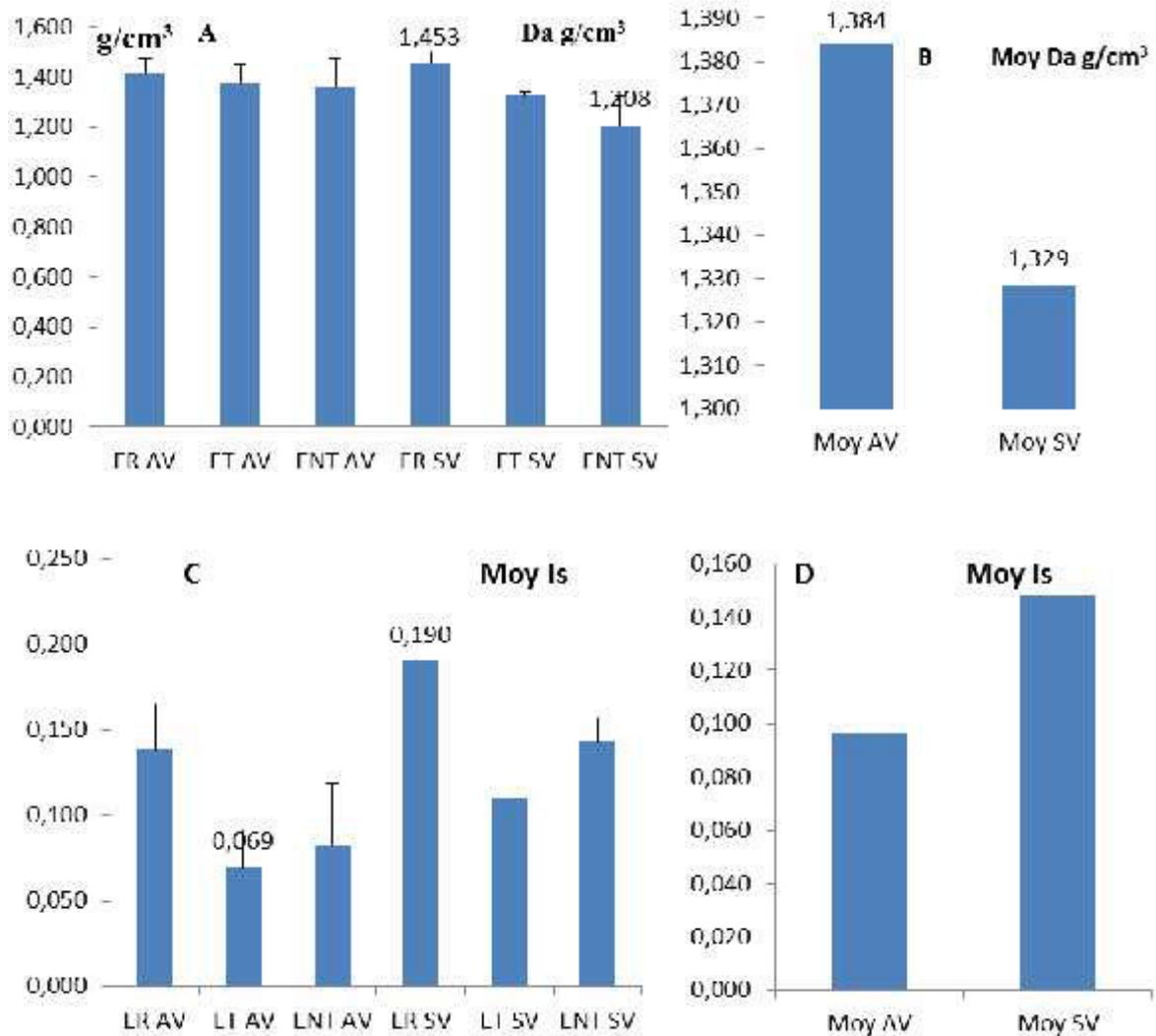
L'ANOVA d'une randomisation totale à un seul facteur, par le test post hoc de Newman Keuls au seuil de 5% (tab VI.2) nous permet d'enregistrer une différence très hautement significative entre les 06 différents traitements pour la conductivité hydraulique à saturation à la pression 0,3 kPa ainsi que pour l'indice de stabilité. La différence est hautement significative pour la densité apparente et la porosité. Cependant il n'y a pas d'effet significatif entre les différents traitements testés sur la conductivité hydraulique à saturation aux pressions 0,6 et 1 kPa.

Tableau VI.2 : ANOVA des caractéristiques physiques du sol des 06 différents traitements de l'essai

| Variable | dl effet | MC effet | dl erreur | MC erreur | F | P |
|------------------|----------|----------|-----------|-----------|----------|-------------------------|
| K 0,3 kPa | 5 | 3,589086 | 18 | 0,276651 | 12,97333 | 0,000019 ^{THS} |
| K0,6 kPa | 5 | 0,446472 | 18 | 0,298840 | 1,494016 | 0,240829 ^{NS} |
| K1 kPa | 5 | 0,147531 | 18 | 0,186117 | 0,792680 | 0,568760 ^{NS} |
| Dapp | 5 | 0,028564 | 18 | 0,006210 | 4,599911 | 0,007043 ^{HS} |
| p | 5 | 42,62271 | 18 | 9,086981 | 4,690525 | 0,006448 ^{HS} |
| Is | 5 | 0,007916 | 18 | 0,001299 | 6,095974 | 0,001799 ^{THS} |

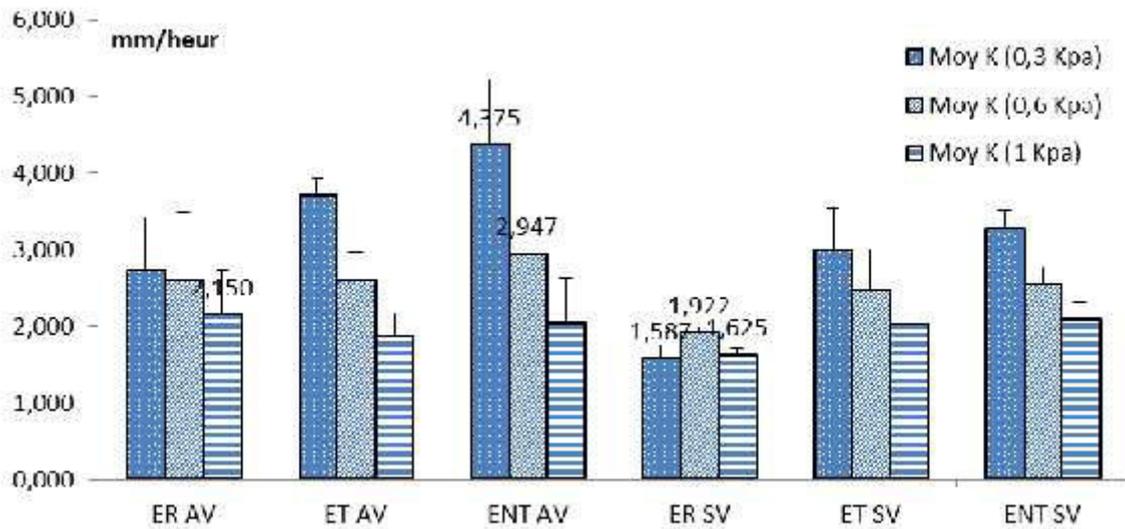
dl : degré de liberté (effet) ; MC : Moyenne des carrés ; F :Fisher ; P :probabilité.

NS : non significatif ; S : significatif ; HS : hautement significatif ; THS : très hautement significatif



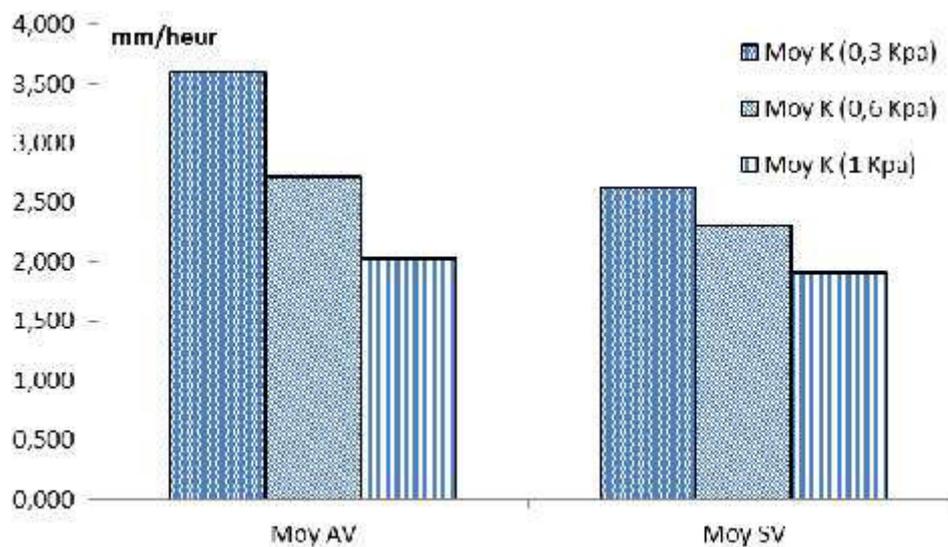
ER : Eau naturelle de robinet ; ET : eau traitée ; ENT : eau non traitée ; AV : Avec vers de terre ; SV : Sans vers de terre.

Figure VI. 1: Valeurs de D_{app} (g/cm^3) et de Is du sol des pots avec et sans vers de terre à différents traitements d'irrigation



ER : Eau naturelle de robinet ; ET : eau traitée ; ENT : eau non traitée ; AV : Avec vers de terre ; SV : Sans vers de terre.

Figure VI. 2: Valeurs moyennes de conductivité hydraulique à saturation à différentes pression d'eau dans le sol des pots avec et sans vers de terre à différents traitements d'irrigation



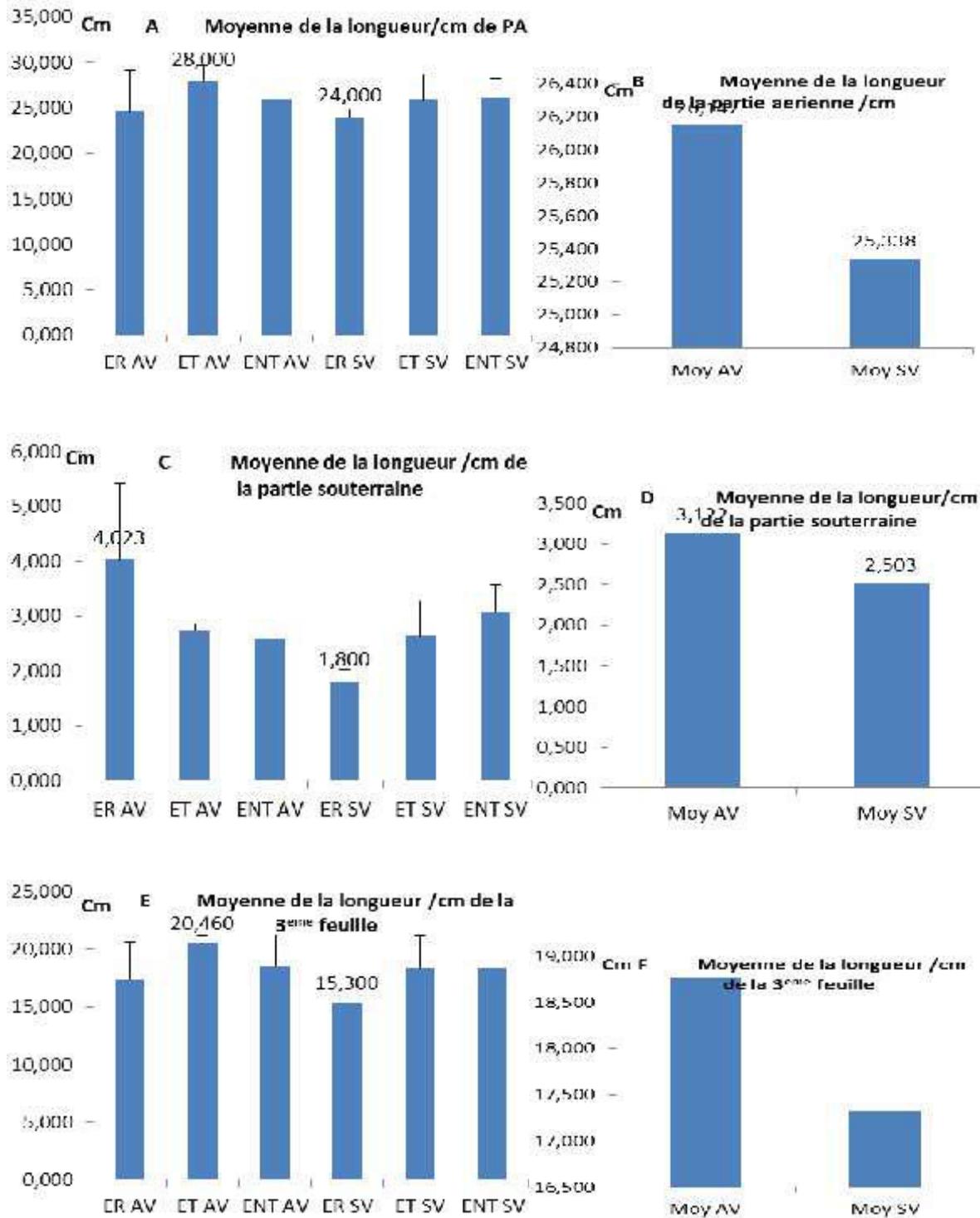
AV : Avec vers de terre ; SV : Sans vers de terre.

Figure VI.3: Valeurs moyennes de conductivité hydraulique à saturation à différentes pressions d'eau dans le sol des pots avec et sans vers de terre

VI.3.2. Compartiment végétal

La longueur de la partie aérienne a été mesurée après 30 jours depuis la mise en place de notre essai expérimental, dans les 06 différents blocs à traitement avec vers de terre et sans vers de terre, et irrigués par l'eau de robinet, eau traitée et eau non traitée. La figure VI.4.A, nous a permis de constater que la moyenne la plus élevée a été enregistrée dans les pots irrigués par l'eau traitée et avec vers. La figure VI.4.B, nous a permis d'enregistrer une moyenne beaucoup plus élevée de la longueur de la partie aérienne du blé dans les pots contenant des vers de terre. Selon Al-Nakshabandi *et al.* (1997), l'utilisation d'eaux usées sur plusieurs sites agricoles a des effets bénéfiques tels que l'amélioration des rendements des cultures qui est aisément appréciable à une échelle de temps relativement courte. Aussi, de nombreuses études ont confirmé l'impact positif des nutriments contenus dans les eaux usées (azote, phosphore et potassium) sur les rendements des cultures irriguées (Aiello *et al.* (2007); Al-Nakshabandi *et al.* (1997); Da Fonseca *et al.* (2007); Wang et Huang (2008)). La croissance des végétaux nécessite un approvisionnement en macronutriments (azote, phosphore et potassium). Notamment, Tamrabet *et al.* (2007) ont prouvé une amélioration notable des céréales irriguées par les eaux usées. Oweis *et al.* (1998) mentionnent que la production est positivement corrélée aux quantités d'eau apportées tout le long du cycle de la culture, ces quantités peuvent être réduites de 36 à 56 % par souci d'économie d'eau dans les environnements semi-arides, tout en obtenant un rendement de 12% plus faible que le maximum permis, lorsque l'irrigation est conduite pour satisfaire les besoins de la plante.

Tous de même, beaucoup d'études mettent en évidence un effet positif des vers de terre sur la croissance des plantes avec un effet positif sur la biomasse aérienne dans 75% des cas pour les vers de terres tropicaux et 79% des cas pour les vers de terre tempérés. Ces études se sont intéressées tout particulièrement à l'effet des vers de terre sur des espèces de plantes d'intérêt agronomique (Scheu, 2003; Brown *et al.*, 2004). Dès que le sol rentre en contact avec le tube digestif du vers de terre, il va subir de profonds changements physico-chimiques et biologiques qui affectent l'ensemble du profil du sol. Ces changements sont les facteurs déterminants pour expliquer l'effet des vers de terre sur les plantes et sont fortement dépendants de la classe écologique du vers de terre étudié. De l'interaction entre les vers de terre, les microorganismes du sol et la plante va résulter des bénéfices mutualistes pour chacun des organismes (Scheu, 2003; Brown *et al.*, 2004).



ER : Eau naturelle de robinet ; ET : eau traitée ; ENT : eau non traitée ; AV : Avec vers de terre ; SV : Sans vers de terre.

Figure VI. 4: Moyennes de la longueur de la partie aérienne, de la partie souterraine ainsi que la 3^{ème} feuille du blé après 30 jours dans les pots avec et sans vers de terre à différents traitements d'irrigation

La moyenne de la longueur de la partie souterraine du blé a présenté une plus grande valeur dans les pots irrigués par l'eau de robinet et contenant des vers de terre (fig VI.4.C). Cependant, (figure VI.4.D) ils ont présenté de plus grandes valeurs dans les pots contenant les vers de terre. Effectivement, Muday *et al.* (2012) ont noté que l'Auxine et l'éthylène peuvent avoir un effet antagoniste sur l'initiation de la racine latérale et un effet synergique sur l'allongement de la racine, avec des effets réciproques sur la synthèse et la signalisation. En conséquence, l'ajustement de la croissance et du développement des plantes en présence de vers de terre peut être dû à l'auxine, à l'éthylène ou à l'équilibre entre ces hormones (Freitas, 2012).

La moyenne de la longueur de la 3^{ème} feuille du blé des pots irrigués par l'eau traitée et contenant les vers de terre a enregistré une plus grande valeur. La figure VI.4.F, nous montre que la 3^{ème} feuille de la plante du blé a été plus longue dans les pots contenant des vers de terre.

L'étude statistique par l'analyse de variance, nous a permis de révéler un effet significatif des traitements utilisés dans notre expérimentation sur la longueur de la partie souterraine (tab VI.3). Alors qu'il n'y a pas d'effet significatif sur la longueur de la parties aérienne ni celle de la 3^{ème} feuille. Notamment, Brown *et al.* (2004) mentionnent que l'effet des vers de terre sur la plante a souvent été attribué à un mécanisme trophique ou encore à une modification physique de l'environnement. Cependant, ces deux mécanismes ne permettent pas d'expliquer à eux seuls l'effet observé des vers de terre lors de certaines études (Blouin *et al.*, 2006; Blouin *et al.*, 2007 ; Laossi *et al.*, 2010). Une hypothèse afin d'expliquer ces effets, serait l'implication de molécules signal dans les sols semble modulée par les vers de terre (Tomati *et al.*, 1988; Muscolo *et al.*, 1998; Canellas *et al.*, 2002).

Tableau VI.3 : ANOVA des caractéristiques végétales du blé dans les 06 différents traitements de l'essai

| Variable | dl effet | MC effet | dl erreur | MC erreur | F | P |
|----------------------|----------|----------|-----------|-----------|----------|------------------------|
| L Pa | 5 | 7,686870 | 18 | 7,284261 | 1,055271 | 0,416736 ^{NS} |
| L Ps | 5 | 2,120780 | 18 | 0,570019 | 3,720540 | 0,017308 ^S |
| L 3 ^{ème} f | 5 | 11,37902 | 18 | 5,064843 | 2,246667 | 0,093952 ^{NS} |

L : longueur ; dl : degré de liberté (effet) ; MC : Moyenne des carrés ; F :Fisher ; P :probabilité.

NS : non significatif ; S : significatif ; HS : hautement significatif ; THS : très hautement significatif

VI.3.3. Analyse en composantes principales

À partir de 09 variables (5 variables physiques du sol ; 03 variables biologiques du végétal) mesurées et une variable conditionnelle (type d'irrigation, présence de vers de terre), une analyse en composante principale (ACP) a été effectuée (fig VI.5). Les axes principaux seront choisis selon leurs contributions dans la variabilité ainsi que leurs valeurs propres. Les deux premiers axes de notre analyse expliquent 78,30% de la tendance d'inertie totale du nuage. Le plan d'axes (1,2) nous a permis de sélectionner 02 groupes de variables. L'axe 1 divise les variables en deux groupes. Un groupe de variables (porosité, K (1 kPa) et longueur de la partie souterraine), expliqué positivement par l'axe 1 renfermant à lui seul 58,84% de l'inertie totale. Cependant un deuxième groupe de variables (K (0,6 kPa), K (0,3 kPa), longueur de la 3^{ème} feuille et la longueur de la partie aérienne) est corrélée négativement à cet axe. L'axe 2 sépare deux variables. La première est l'indice de stabilité du sol, et la deuxième, corrélée négativement à l'axe 2 expliquant 19,45 % de la variance et qui est la densité apparente.

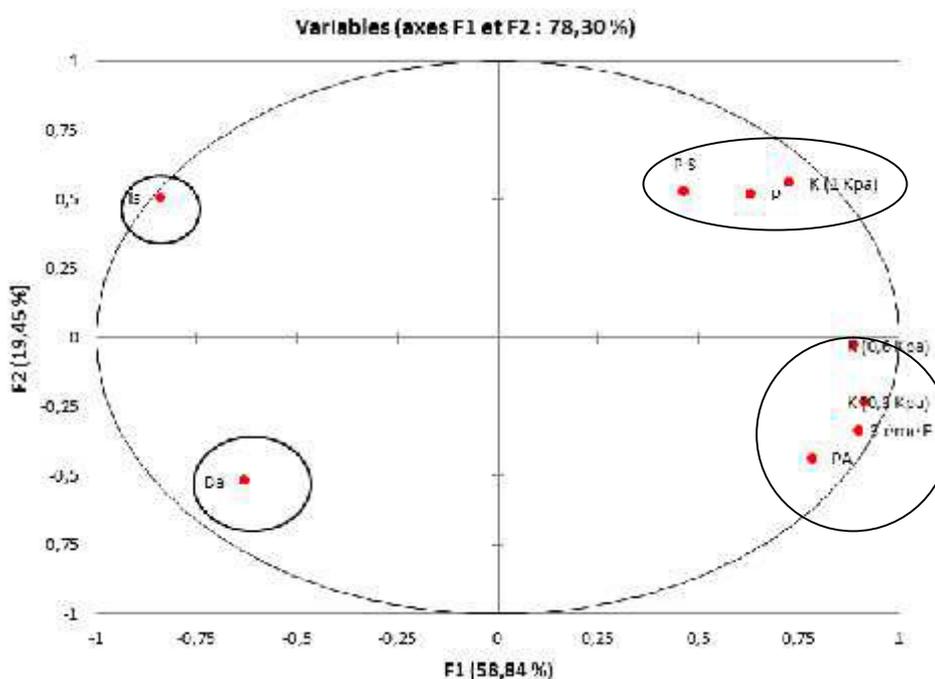


Figure VI.5: Plan principal de l'ACP effectuée sur l'ensemble des variables mesurées de l'essai expérimental

VI.4. Conclusion

Les résultats obtenus des caractéristiques physiques du sol nous ont permis de ressortir les points suivants :

- ❖ La densité apparente a marqué des valeurs plus élevées dans les sols des pots avec vers de terre.
- ❖ Les moyennes de conductivité hydraulique à saturation pour les différentes pressions appliquées sont nettement plus élevées dans le sol des pots contenant des vers de terre. Elles ont pour autant signalé d'importantes valeurs dans les pots irrigués par l'eau traitée.
- ❖ La stabilité structurale a été meilleure en fin de l'expérimentation dans les pots contenant les vers de terre que ceux sans vers.

Pour les caractéristiques du végétale nous avons pu remarquer ceci :

- ❖ La moyenne de la longueur de la partie aérienne du blé dans les pots contenant des vers est beaucoup plus élevée que les pots sans vers.
- ❖ La longueur de la partie souterraine a présenté de plus grandes valeurs dans les pots contenant les vers.
- ❖ La 3^{ème} feuille de la plante du blé a été plus longue dans les pots contenant des vers de terre.

L'analyse en composantes principales nous a permis de mettre en évidence 4 groupes de variables. L'axe 1 divise les variables en deux groupes. Un groupe de variables (porosité, K (1kPa) et longueur de la partie souterraine) et un deuxième groupe de variables (K (0,6 kPa), K (0,3 kPa), longueur de la 3^{ème} feuille et la longueur de la partie aérienne). L'axe 2 sépare deux variables. La première est l'indice de stabilité du sol, et la deuxième c'est la densité apparente.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'Algérie comme tous les pays du sud méditerranéen, est confronté au problème de la rareté de l'eau, causée principalement par les baisses croissantes de précipitations, l'expansion de la population urbaine avec un mode de vie moderne, l'amplification des activités industrielles et agricoles, ainsi que l'augmentation de l'évaporation. Cette pénurie d'eau touche beaucoup plus les régions arides et semi-arides, caractérisées par des sols carbonatés à faible taux de matière organique. Devant une telle situation, le recours à l'utilisation des ressources non conventionnelles (eaux usées et boues résiduaires) devient inévitable pour faire face au problème de stress hydrique et organique.

La présente étude s'est déroulée dans deux régions s'étalant dans la wilaya de Batna. Ces deux régions se caractérisent par l'originalité du substratum géologique ce qui a permis une pédogénèse assez rapprochée, donnant naissance à des Fluvisol de texture fine. Le climat des deux régions est semi-aride avec un hiver frais et un été chaud.

Oued El-Gourzi collecte, en plus des rejets urbains, tous les rejets des unités industrielles installées dans la zone industrielle de Batna. Les analyses des eaux de l'oued ont mis en évidence la charge organique et minérale de ces eaux du fait de l'importance des rejets domestiques et industriels conjugués aux faibles débits du cours d'eau.

En moyenne, les eaux de l'oued présentent des taux élevés de pH, de conductivité électrique, de salinité, de MES et du rapport DBO_5/DCO . Cependant, ces caractéristiques semblent être moins atténuées vers l'aval du cours d'eau sous l'effet du phénomène d'auto-épuration. L'utilisation de ces eaux est qualifiée d'inadmissible en agriculture car leur qualité ne répond pas aux recommandations de la FAO concernant les eaux destinées à l'irrigation.

Les boues solides issues de la station d'épuration de Batna s'avèrent légèrement acides, mais pas salinisantes. Elles possèdent des teneurs faibles en ETM qui ne dépassent pas les normes maximales. Cette matière organique est un paramètre qui revêt une grande importance en agriculture. Leur valorisation s'avère donc faisable et sécuritaire avec aucun risque pour l'environnement et la santé humaine. Il serait judicieux d'approfondir les études sur ce thème d'actualité en essayant une réalisation sur des périodes plus longues tout en utilisant des doses variables et des apports espacés dans le temps.

Concernant les sols irrigués avec les eaux usées nous avons pu enregistrer à travers cette étude, que leurs pH diminuent à la suite de l'oxydation des composés organiques et de la nitrification de l'ammonium. Dans ces sols situés en amont et recevant une eau usée plus chargée, les valeurs de conductivité électrique sont plus faibles. Ceci a été expliqué par l'effet tampon de la matière organique. Cette dernière qui se présente en plus grandes valeurs dans ces sites est certainement protégée physiquement de la décomposition, par la présence de teneur élevée en argile du sol. Toutefois, les taux moyens du $\text{CaCO}_3\%$ total et actif semblent être liés au pH du sol.

L'abondance totale et la moyenne de la biomasse des vers de terre dans les sols subissant une irrigation par les eaux naturelles sont très faibles par rapport à ceux irrigués par des eaux chargées. En effet, les vers de terre sont beaucoup plus présents où l'eau d'irrigation est fortement chargée en matières organiques.

L'étude taxonomique a permis de classer 7 espèces de Lumbricidae. Une dominance remarquable de l'espèce *Aporrectodea trapezoides*, suivie de *Aporrectodea rosea*. Parmi les 7 espèces inventoriées, les endogées sont majoritaires. L'abondance des endogées est beaucoup plus élevée dans les sols recevant une eau usée très chargée en matières organiques. Cependant, les sols recevant des eaux naturelles sont mieux représentés par une population anécique.

L'ANOVA a révélé un effet très significatif des différents types d'eau d'irrigation ainsi que les différentes pratiques de culture sur toutes les propriétés chimiques du sol étudiées ainsi que sur la population endogée et anécique. Ce qui n'a pas été le cas pour la population épigée.

La porosité et les taux d'infiltration à saturation sont notablement plus élevés dans les sols recevant une eau usée faiblement chargée en matières organiques. Ceci a été expliqué par le colmatage des pores du sol dû aux matériaux en suspension présents dans les eaux usées à charge trop élevée.

Cependant, la stabilité structurale est meilleure dans le sol sous irrigation aux eaux usées à charge élevée. Selon Kirkham(1974), ceci est dû d'une part, à l'apport de matière

organique et d'ions calcium qui joue un rôle de ciments provoquant l'amélioration de l'agrégation des particules du sol.

D'autre part, cela est dû selon Miller et Kemper (1962), à la culture des céréales qui affectent l'augmentation de la production de substances cimentantes par l'activité microbienne par mycélium fongique et actinomycètes et qui fournissent des substrats pour stabiliser les agrégats de sol.

Le taux le plus élevé de macropores total quantifié par une analyse d'image a été enregistré dans le sol sous irrigation avec l'eau naturelle, comparativement aux sols irrigués aux eaux usées. Cette macroporosité est fortement représentée par des macropores d'assemblage, suivi de macropores de type tubulaire. L'ANOVA a révélé une différence très significative entre les sites étudiés pour la macroporosité totale, la porosité tubulaire (A), la porosité fissurée (B) et la porosité de l'assemblage (C). Ces résultats suggèrent que l'irrigation avec les eaux usées entraîne une réduction considérable de la macroporosité totale, tubulaire, fissurale et d'assemblage. La diminution du taux de macroporosité totale peut atteindre 49,58% dans les sols irrigués par des eaux usées à forte charge de l'amont de l'Oued.

Aussi, le taux moyen maximal de mésopores est détenu par le sol à irrigation à l'eau naturelle. Dans ce sol, les mésopores de type allongé sont à faible taux. L'ANOVA a révélé une différence très hautement significative entre les sites étudiés, de la mésoporosité totale et de la catégorie d'assemblage. La diminution des mésopores totaux dans les sols irrigués aux eaux usées peut atteindre 40,03% et 18,49% des mésopores de type d'assemblage.

Les résultats obtenus à partir de l'essai nous ont permis de noter que la densité apparente des sols contenant des vers de terre est plus importante. Cependant, les moyennes de conductivité hydraulique à saturation pour les différentes pressions appliquées sont nettement plus élevées dans le sol des pots contenant des vers de terre. La stabilité structurale a présenté aussi une élévation en fin de l'expérimentation dans les pots contenant les vers de terre. L'analyse de la variance nous a permis de déduire un effet hautement significatif entre les 6 différents traitements de notre étude sur la conductivité hydraulique à saturation pour la pression de 0,3 kPa et pour l'indice de stabilité structural de Henin.

L'analyse en composantes principales (ACP) nous a permis de mettre en évidence 4 groupes. Un groupe de variables (porosité, K (1 kPa) et longueur de la partie souterraine) et un deuxième groupe de variables (K (0,6 kPa), K (0,3 kPa), longueur de la 3^{ème} feuille et la longueur de la partie aérienne). L'axe 2 sépare deux variables. La première est l'indice de stabilité du sol, et la deuxième c'est la densité apparente.

Ces importants résultats nous permettent d'entamer de nouvelles perspectives mettant en relief la composition physico-chimique et biochimique au niveau moléculaire de la drisophyle. Celle-ci stimulée par les vers de terre pouvant nous procurer d'importantes informations sur le développement des végétaux subissant des pratiques différentes d'irrigation et de cultures. Sans oublier de mieux cerner le risque encouru par les pratiques anarchiques d'irrigation par les eaux usées.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. Aiello R., Cirelli, G.L., Consoli S., 2007. Effects of reclaimed wastewater irrigation on soil and tomato fruits: a case study in Sicily (Italy). *Agric. Water Manage.* 93, pp. 65–72.
2. Allaire-Leung, S.E., Gupta, S.C., Moncrief, J.F., 2000. Water and solute movement in soil as influenced by macropore characteristics.1. Macropore continuity. *J. Contam. Hydrol.* 41, 283–301.
3. Al-Nakshabandi, G. A., Saqqar, M. M., Shatanawi, M. R., Faygad, M., & Al-Horani, H. (1997). Some environmental problems associated with the use of treated waste water for irrigation in Jordan. *Agricultural Water Management*, 34, pp. 81–94.
4. Alouini, Z., 1994. Flux de la charge parasitologique dans les stations d'épuration. *Revue de l'eau. Canada.* Issue 6. 453-462.
5. Anonyme, 2006. Journal de suivi du fonctionnement de la STEP de la ville de Batna. Laboratoire d'analyses physicochimiques des eaux usées de la STEP de la ville de Batna.
6. Anonyme, 2011. L'étude monographique de la commune d'ELMadher. Les services de l'agriculture de la commune. Entretien avec Mr.Mellah Djamel subdivisionnaire de l'agriculture de la Daïra d'El-madher.
7. Arora, B. R., Azad, A. S., Bijay, S., Sekhon, G. S., 1985. Pollution potential of municipal waste waters of Ludhiana, Punjab. *Indian J. Ecol.*, 12, 1-7.
8. Bachelier, G., 1978. Les vers annelés. *In: La faune du sol.* IDT n°38, ORSTOM, Paris. 127-183.
9. Baize, D., 1988. Guide des analyses courantes en pédologie. INRR. 172p.
10. Bardhan, G., Russo, D., Goldstein D., Levy, G.J., 2016. Changes in the hydraulic properties of a clay soil under long-term irrigation with treated wastewater. *Geoderma* 264. 1-9.
11. Bastardie, F., Capowize, Y., Cluzeau, D., 2005. 3D characterisation of earthworm burrow systems in natural soil cores collected from a 12-year-old pasture. *Applied Soil Ecology* 30(1):34–46.
12. Baziz, N., 2008. Etude sur la qualité de l'eau potable et risques potentiels sur la santé cas de la ville de Batna. Mém de Magistère. Université de Batna. 144p
13. Bazri, K., 2015. Etude de la biodiversité des lombriciens et leurs relations avec les propriétés du sol dans différents étages bioclimatiques, dans l'Est Algérien. Thèse doctorat. Constantine University, 188 p.

14. Bazri, K., Ouahrani, G., Gheribi-Aoulmi, Z., Diaz Cosin, D. J., 2013. La diversité des lombriciens dans l'Est algérien depuis la côte jusqu'au désert. *Ecologia Mediterranea*. Vol. 39 (2). 5-17.
15. Belouanas., H., 2012. In fluence du comportement des argiles sur les écoulements souterrains au sein des formations du recouvrement de la zone de Fesdis – plaine d'El Madher (Nord -Est Algérien). Mém. Mag en Géologie du génie civil et des milieux aquifères. 149p.
16. Beven, K., Germann, P., 1982. Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research* 18: 1311–1325.
17. Blakemore, B., 2007. *Cosmopolitan Earthworms. An Eco-Taxonomic Guide to the Peregrine Species of the World*, 2nd Ed., 656 p.
18. Blouin M., Lavelle P. & Laffray D., 2007. Drought stress in rice (*Oryza sativa* L.) is enhanced in the presence of the compacting earthworm *Millsonia anomala*. *Env. Exp. Bot.*, 60, pp. 352–359.
19. Blouin, M., Barot, S., Lavelle, P., 2006. Earthworms (*Millsonia anomala*, Megascolecidae) do not increase rice growth through enhanced nitrogen mineralization. *Soil Biol. Biochem.*, 38, pp. 2063-2068.
20. BNEDER, 1985. Etude de la classification des terres.
21. Bottinelli, N., Hallaire, V., Menasserri A. C., Le Guillou, S. Cluzeau C.D., 2010. Abundance and stability of belowground earthworm casts influenced by tillage intensity and depth. *Soil & Tillage Research* 106, 263–267.
22. Bouché, M.B. (1975) Action de la faune sur les états de la matière organique dans les écosystèmes. In Kilbertius, G., Reisinger, O., Mourey , A., Cancela da Fonseca, J.A. (eds) *Humification et biodégradation*. Pierron, Sarreguemines, France, pp. 157-168.
23. Bouché, M.B., 1972. Lombriciens de France: Ecologie et Systématique. INRA.Publication 72-2. Institut national de la recherche agronomique. Paris. 671p.
24. Bouché, M.B., 1977. Stratégies Lombriciennes”. In: Lohm, U., Persson, T., (Eds.). *Soil organism as components of ecosystems*. Proc. 6th Int. Coll. Soil Zool. Ecol. Bull. Stockholm. 122-132.
25. Bournaud, M., Amoros, C., 1984. Des indicateurs biologiques aux descripteurs de fonctionnement : Quelques exemples dans le système fluvial. *Bull. Ecol.* 15(1). 57-66.
26. Bremond, R., Vuichard, R., 1973. Paramètres de la qualité des eaux. Ministère de la Protection de la Nature et de l'Environnement (France), SPEPE, Paris, 179 p.

27. Bremond, R., Perrodon, C., 1979. Paramètres de la qualité des eaux. Ministère de l'environnement et cadre de vie. Prévention des pollutions. 2ème ed: 259 p.
28. Bronick, C.J., Lal, R., 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124, 3–22.
29. Brown G.G., Edwards C.A. & Brussaard L., 2004. How earthworms affect plant growth: burrowing into the mechanisms. In Edwards, C.A. (ed) *Earthworm ecology*. RC Press, Boca Raton, USA, pp. 13-49.
30. Brown, G.G., Barois, I., Lavelle, P., 2000. Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactions with other edaphic functional domains. *Eur. J. Soil Biol.* 36, 177–198.
31. Bruand A., Cousin I., Nicoullaud, B., Duval O., et Begon J. C., 1996. Backscattered electron scanning images of soil porosity for analysing soil compaction around roots. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 895-901.
32. Canellas L.P., Olivares, F.L., Okorokova-Facanha A.L., Facanha A.R., 2002. Humic acids isolated from earthworm compost enhance root elongation, lateral root emergence, and plasma membrane H⁺-ATPase activity in maize roots. *Plant Physiol*, 130, pp. 1951-1957.
33. Capowiez, Y., Cadoux, S., Bouchand, P., Roger-Estrade, J., Richard, G., Boizard, H., 2009. Estimating the role of earthworms in regenerating compacted soils: field observations and semi-field experimental study. *Soil Biology & Biochemistry* 41, 711-717.
34. Cey E.E., Rudolph, D. L., 2009. Field study of macropore flow processes using tension infiltration of a dye tracer in partially saturated soils. *Hydrol. Process.* 23, 1768–1779.
35. Coster M., Chermant J. L., 1985. *Precis d'analyse d'images*. Edition du CNRS, Paris.
36. Curry, J.P., 1994. Grassland invertebrates. In: *Ecology, Influence on Soil Fertility and Effects on Plant Growth*, Chapman and Hall, London, p. 437.
37. Da Fonseca A.F., Herpin U., De Paula A.M., Victoria R.L. et Melfi A.J., 2007. Agricultural use of treated sewage effluents: Agronomic and environmental implications and perspectives for Brazil. *Scientia Agricola*, 64 (2): pp. 194-209.
38. Decaëns, T., 2010. Macro ecological patterns in soil communities. *Global Ecol. Biogeogr.* 19, 3: 287-302.
39. Decaëns, T., Rangel, A.F., Asakawa, N., Thomas, R.J., 1999. Carbon and nitrogen dynamics in ageing earthworm casts in grasslands of the eastern plains of Columbia. *Biol. Fertil. Soils* 30, 20–28.

40. Duchaufour, P., 1977. Pédologie : I. Pédogenèse et classification. Edit. Masson. Paris. 477 p.
41. Eckenfelder., W.W., 1982. Gestion des eaux usées urbaines et industrielles. Ed. Lavoisier. Paris, 503p.
42. Edwards, A., Bohlen, .P.J, 1996. Biology et Ecology of earthworms, vol. 3, Springer Science & business Media, 426 p.
43. Ehlers, W., 1975. Observations on earthworm channels and infiltration on tilled an untilled loess soil. Soil Sci. 119, 242–249.
44. El Oumlouki, K., Moussadek, R., Zouahri, A., Dakak, H., Chati M., El amrani, M., 2014. Study of physic-chemical quality of water and soil in the region Souss Massa (Case perimeter Issen) Morocco. 2365-2374.
45. FAO (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture), 1985. Water quality for agriculture. FAO irrigation and drainage paper 29.Revue 1, FAO. Rome, 33 p.
46. Freitas R., 2012. Effet du ver de terre Aporrectodea caliginosa sur la croissance des plantes, leur développement et leur résistance aux pathogènes : réponse physiologique et moléculaire de la plante a l'émission de molécules-signal; Thèse de doctorat. Université Paris-Est, Français. 159 p.
47. Galavi, M., Jalali, A., Ramroodi, M., Mousavi S., Galavi, H., 2010. Effects of treated municipal wastewater on soil chemical properties and heavy metal uptake by sorghum (*Sorghum bicolor*l.)». J. Agric. Sci. 2 (3). 235-241.
48. Ghanem, N., Kribaa, M., El HadeF El Okki, M., 2017. Interaction between physicochemical soil parameters and earthworm communities in irrigated areas with natural and wastewaters. Applied and Env. Soil Sci. 2017, 5808945, 16p.
49. Gharaibeh, M. A., Ghezzehei, A. T., Albalasmeh A. A., Alghzawi, M. Z., 2016. Alteration of physical and chemical characteristics of clayey soils by irrigation with treated waste water. Geoderma 27(6). 33-40.
50. Gharaibeh, M.A., Eltaif, N.I., Al-Abdullah, B., 2007. Impact of field application of treated wastewater on hydraulic properties of Vertisols. Water Air Soil Pollut. 184 (1-4). 347–353.
51. Gomez A. et Juste. C., 1984. Etude de l'incidence de l'apport des boues de la station d'épuration à des sols sableux sur l'évolution qualitative et de matières organiques de ces sol A.N.R.E.D, fiche 4,6p.
52. Gonçalves, R.A.B., Gloaguen, T.V., Folegatti, M.V., Libardi, P.L., Lucas Y., Montes, C.R., 2010. Pore size distribution in soils irrigated with sodic water and wastewater. R. Bras. Ci. Solo. 34. 701–707.

53. Guerarra, N., 2013. Rovalorisation des Zones d'Habitat Urbaines nouvelles dans le cadre des principes de développement durable (Zhun Batna).Mémoire de Magister. Univer. Batna. 123p.
54. Hallaire V., 1994. Description for microcrack orientation in a clayey soil using image analysis. In A. J Ringrose-Voase and G. S. Humphreys (Eds), Soil micromorphology: Study in management and Genesis. Elsevier. Development in Soil Science, 22, 115-126.
55. Hallaire, V., Cointepas, J.P., 1993. Image analysis of the macroporosity of an orchard soil. *Agronomie* 13, 155-164.
56. Hallaire, V., Curmi, P., Duboisset, A., Lavelle, P., Pashanasi, B., 2000. Soil structure changes induced by the tropical earthworm *Pontoscolex corethrurus* and organic inputs in a Peruvian ultisol. *Eur. J. Soil Biol.* 36 (1), 35–44.
57. Hallaire, V., Hachicha, M., Cheverry, C., 1998. Structural changes of a clayey topsoil under irrigations (Kalaat El Andalous Tunisia). Macropores characterizations using image analysis. *Etude et gestion des sols* 4, 95-114.
58. Hayes, A. R., Mancino C.F., Pepper, I.L., 1990. Irrigation of turfgrass with secondary sewage effluent. I. Soil and leachate water quality, *Agron. J.* 82 .939-943.
59. Hébert, M., 2005. Épandage automnal des MRF. Risques environnementaux et mesures préventives. *Agrosol* 16(1), 61-78.
60. Hébert, M., Rioux, V., Gagnon, E., 2003. Contrôle de qualité indépendant des MRF par le MENV. Partie II : Pathogènes et paramètres agronomiques. *Vecteur environnement* 36 (1), 34-40.
61. Heidarpour, M., Mostafazadeh-Fard, B., Abedi Koupai, J., Malekian, R., 2007. The effects of treated wastewater on soil chemical properties using subsurface and surface irrigation methods. *Agric. Water Manag.* 90 (1–2), 87–94.
62. Heppell, C.M., Worrall, F., Burt, T.P., Williams, R.J., 2002. A classification of drainage and macropore flow in an agricultural catchment. *Hydrological Processes* 16, 27–46.
63. Hinsby, K., McKay, L.D., Jorgensen, P., Lenczewski, M., Gerba, C.P., 1996. Fracture aperture measurements and migration of solutes, viruses, and immiscible creosote in a column of clay-rich till. *Ground Water* 34, 1065–1075.
64. Horswell, J., Speir, T.W., Schaik, A.P., 2003. Bio-indicators to assess impacts of heavy metals in the land-applied sewage sludge. *Soil Biol. Biochem.* 35:1501– 5.
65. Ifen S., 1998. Cartographie de l'aléa « Erosion de sols » en France. *Etudes et Travaux* N°18, 63 p.

66. Iqbal, J., Thomasson, J.A., Jenkins, J.N., Owens, P.R., Whisler, F.D., 2005. Spatial variability analysis of soil physical properties of alluvial soils,” *Soil Science Society of America Journal*, vol.69, no. 4. 1338–1350.
67. Jarvis, N.J., 2007. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality. *European Journal of Soil Science* 58, 523–546.
68. Jensen, M.B., Hansen, H.C.B., Magid, J., 2002. Phosphate sorption to macropore wall materials and bulk soil. *Water Air Soil Pollut.*137, 141–148.
69. Jimenez, B., Asano, T., 2008. Water Reclamation and Reuse around the World. In: Jimenez, B. and Asano, T., Eds., *Water Reuse: An International Survey of Current Practice, Issues and Needs*, IWA Publishing, London, 648.
70. Jones, C.G., Lawton, J.H., Shachak, M., 1997. Positive and negative effects of organisms as physical ecosystem engineers. *Ecology* 78, 1946–1957.
71. Jongerius A., Schoonderbeek, D., Jager, A., Kowalinsky, St., 1972. Electro-optical Soil porosity investigation by means of Quantimet-B equipment. *Geoderma* 7, 177-198.
72. Jorgensen, P.R., Hoffmann, M., Kistrup, J.P., Bryde, C., Bossi, R., Villholth, K.G., 2002. Preferential flow and pesticide transport in a clay-rich till: field, laboratory, and modeling analysis. *Water Resources Research* 38: 1246.
73. Jouquet, P., Dauber, J., Lagerlof, J., Lavelle, P., Lepage, M., 2006. Soil invertebrates as ecosystem engineers: intended and accidental effects on soil and feedback loops. *Appl. Soil Ecol* 32, 153–164.
74. Karoune A., 2008. Effet des boues résiduaires sur le développement des semis de chêne liège (*Quercus suber*). Thèse magistère ; Institut de biologie. Université Mentouri Constantine, pp. 100-121.
75. Kemper, W.D., Koch E.J., 1966. Aggregate Stability of Soils from Western U.S. and Canada, U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin No. 1355. Washington.
76. Kirkham, B. M., (1974). Disposal of sludge on land -effects on soils, plants and ground water *Compost Sci.*, 15, 6-10.
77. Kribaa, M., Hallaire, V., Curmi, P., Lahmar, R., 2001. Effect of various cultivation methods on the structure and hydraulic properties of a soil in semi-arid climate. *Soil Tillage Res.*, 60, 43-53.
78. Kung, K.-J.S., Steenhuis, T.S., Kladivko, E.J., Gish, T.J., Bubenzer, G., Helling, C.S., 2000. Impact of preferential flow on the transport of adsorbing and non-adsorbing tracers. *Soil Sci.Soc. Am. J.* 64, 1290–1296.

79. Kunhikrishnan, A., Bolan, N.S., Müller, K., Laurenson, S., Naidu, R., Kim, W., 2012. Chapter five- the influence of wastewater irrigation on the transformation and bioavailability of heavy metal (loid)s in soil. *Adv. Agron.* 115, 215–297.
80. Lamandé, M., Hallaire, V., Curmi, P., Pérès, G., Cluzeau, D., 2003. Changes of pore morphology, in filtration and earthworm community in a loamy soil under different agricultural managements. *CATENA* 54 (3), 637–649.
81. Laossi, K.R., Ginot, A., Noguera, D., Blouin, M., Barot, S., 2010. Earthworm effects on plant growth do not necessarily decrease with soil fertility. *Plant and Soil*, 328, pp. 109-118.
82. Larsen, W. E., Gilley, J. R., Linden, D. R., 1975. Consequences of waste disposal on land. *Soil Water Cons.*, 2, 68-71.
83. Lavelle P. 2002. Functional domains in soils. *Ecological Research* (2002) 17, 441 – 450.
84. Lavelle, P., 1997. Faunal activities and soil processes: adaptive strategies that determine ecosystem function. *Adv. Ecol. Res.* 27, 93–132.
85. Lavelle, P., Spain, A.V., 2001. *Soil ecology*. Springer Science & Business Media. 654 p.
86. Le Bissonnais, Y., Arrouays, D., 1997. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility. II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *European Journal of Soil Science* 48, 39–48.
87. Lee, K. E., 1985. *Earthworms: their ecology and relationship with soils and land use*. Academic Press. Sydney. p 411.
88. Lehtihet, L., 2005. La réutilisation des eaux usées en Algérie: Situation actuelle et perspectives de développement. *Communication personnelle*. 30 p.
89. Levy, G. J., Lordian, A., Goldstein D., Borisover, M., 2014. Soil structural indices' dependence on irrigation water quality and their association with chromophoric components in dissolved organic matter. *European Journal of Soil Science* 65, 197–205.
90. Liu, Y.T., Xu, J.Z., 2002. Metal contamination of farming soil affected by industry. *China Water Conserv.* 10, 123 – 5.
91. Maalem S., Ghanem, N., 2016. La caractérisation physico-chimiques des eaux usées de Oued El Gourzi”, In *Actes de Colloque National de Biologie de l’université de Batna*.
92. Marschner, H., 1995. *Mineral nutrition of higher plants*. 2nd edition, Academic press, NY, Vol. 78, issue 4. 527-528.

93. McKay, L.D., Cherry, J.A., Gillham, R.W., 1993. Field experiments in a fractured clay till: 1. Hydraulic conductivity and fracture aperture. *Water Resources Research* 29: 1149–1162.
94. Miller D.E., Kemper, W.D., 1962. Water stability of aggregates of two soils as influenced by incorporation of alfalfa. *Agron. J.* 54 (6). 494–496.
95. Mohammad, M., Mazahreh, N., 2003. Changes in soil fertility parameters in response to irrigation of forage crops with secondary treated wastewater. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 34:181-1294.
96. Mojid, M.A., Wyseure, G.C.L., 2013. Implications of municipal wastewater irrigation on soil health from a study in Bangladesh. *Soil Use Manage.* (29). 384–396.
97. Mojiri, A., 2011. Effects of municipal wastewater on physical and chemical properties of saline soil. *J. Biol. Environ. Sci.* 5. 71–76.
98. Morel, J.L. Guikart A., Sedgo, H., 1978. Effet de l'épandage des boues urbaines sur l'état physique des sols communs. XI congrès de l'A.I.S.S. Ed. Mouton. Canada. 12-19.
99. MRE (Ministère des Ressources en Eau), 2001. Le secteur de l'eau en Algérie. Ministère des Ressources en Eau, Algérie.
100. Muday, G.K., Rahman, A. & Binder, B.M. (2012) Auxin and ethylene: collaborators or competitors? *Trends Plant Sci.*, 17, pp. 181-195.
101. Murphy, C.P., Bullock, P., Turner, R.H., 1977. The measurement and characterization of voids in soil thin sections by image analysis. Part I. Principles and techniques. *Journal Soil Sci.*, 28, 498-508.
102. Muscolo, A., Cutrupi, S., Nardi, S., 1998. IAA detection in humic substances. *Soil Biol. Biochem.*, 30, pp. 1199-1201.
103. Mussy A., Soutter, M., 1991. *Physique du sol*. Edit 1. IS.BN. 303 p.
104. N'Dayegamiye, A., Giroux, M., Royer, R., 2004. Épandages d'automne et de printemps de divers fumiers et boues mixtes de papetières : Rendements de maïs-ensilage, coefficient d'efficacité et accumulation de nitrates dans le sol. Rapport de recherche 2001-2003. IRDA. 24 p.
105. Neal, C., Jarvie, H.P., Howarth, S.M., Whitehead, P.G., Williams, R. J., Neal, M., Harrow, M., Wickham, H., 2000. The water quality of the River Kennet: initial observations on a lowland chalk stream impacted by sewage inputs and phosphorus remediation. *Sciences of the Total Environment*, 251/252: 477-495.

106. Omodeo, P., Martinucci, G., 1987. Earthworms of Maghreb. Selected Symposya and Monographs U.Z.I., 2. Mucchi. Modena. 235-250.
107. OMS., 1989. L'utilisation des eaux usées en agriculture et en aquaculture : recommandations à avisées sanitaires. Organisation Mondiale de la Santé. Série de rapports techniques n° 778. OMS. Genève.
108. Oweis, T., Pala, M., Ryan, J., 1998. Stabilizing rain-fed wheat yields with supplemental irrigation and nitrogen in a Mediterranean-type climate. *Agron. J.* 90, pp. 672–681.
109. Pagliai M., La Marca M., Lucamante G., Genovese L., 1984. Effects of zero and conventional tillage on the length and irregularity of elongated pores in a clay loam soil under viticulture. *Soil Tillage Res.* 4, 433-444.
110. Painchaud, J., 1997. La qualité de l'eau des rivières du Québec : Etat et tendances. Thèse Ph.D. (Canada). Direction des écosystèmes aquatiques, 341 p.
111. Paliwal, K., Kurunlchamy, K.S.T.K., Ananthavalli, M., 1998. Effect of sewage water irrigation on growth parameter biomass and nutrient accumulation in *Hardwickia binata* under nursery condition. *Bioresource Technology*, 68: 105-110.
112. Potapov, M., Suhardjono, Y., Hebert, P.D.N., 2009. DNA barcodes for soil animal taxonomy. *Pesquisa Agro pecuaria Brasileira.* 44. 789-801.
113. Rabbi, S. M. F., Roy, B. R. Miah, M. M., Amin, M. S., Khandakar, T., 2014. Spatial variability of physical soil quality index of an agricultural field. Hindawi Publishing Corporation. *App. and Env. Soil Sci.* 10p.
114. Rejesk. F., 2002. Analyse des eaux ; aspects réglementaires et techniques. Centre régional de documentaires techniques pédagogique d'aquitaine. 63.
115. Ringrose-Voase A. J. and Nys C., 1990. One dimensional image of soil structure II. Interpretation of parameters with respect to four forest soil profiles. *J. Soil Sci.* 41, 513-527.
116. Ringrose-Voase, A., 1996. Measurement of soil macropore geometry by image analysis of sections through impregnated soil. *Plant Soil* 183 (1), 27–47.
117. Rodier, J., Legube, B., Merlet, N., 2005. L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, chimie, physico-chimie, microbiologie, biologie, interprétation des résultats. 9^e Ed. Dunod, Paris, 1529 p.
118. Rougerie, R., Decaëns, T., Deharveng, L., Porco, D., James, S.W., Chang, C.H, Richard, B., Russell, M.A., Walling, D.E., Hodgkinson, R.A., 2000. Appraisal of a simple sampling device for collecting time-integrated fluvial suspended sediment samples. *The Role of Erosion and Sediment Transport in Nutrient and Contaminant*

- Transfer (Proceedings of a symposium held at Waterloo, Canada, July 2000). IAHS Publ., N° 263, 119-127.
119. Sahin, U., Anapali O., Ercisli, S., 2002. Physico-chemical and physical properties of some substrates used in horticulture. *Gartenbau wissen schaft* 67. 55-60.
120. Sahin, U., Angin I., Kiziloglu, F.M., 2008. Effect of freezing and thawing processes on some physical properties of saline-sodic soils mixed with sewage sludge or fly ash. *Soil Till. Res.* 99. 254-260.
121. Scheu, S., Schlitt, N., Tinuov, A.V., Newington, J.E., Jones, T.H., 2002. Effects of the presence and community composition of earthworms on microbial community functioning. *Oecologia* 133, 254-260.
122. Schipper, L.A., Williamson, J.C., Kettles H.A., Speir, T.W., 1996. Impact of land-applied tertiary treated effluent on soil biochemical properties”, *J. Environ, Quality*, 25(5). 1073-1077.
123. Servais P., Garnier, J., Demarteau N., Brion N., Billen, G., 1995. Caractérisation des apports de matière organique, nutriments et micro-organismes par les rejets d'eaux usées. PIREN-Seine Report (CNRS) Janvier 1995.
124. Shipitalo, M.J., Edwards, W.M., Dick, W.A., Owens, L.B., 1990. Initial storm effects on macropore transport of surface-applied chemicals in no-till soil. *Soil Science Society of America Journal* 54: 1530-1536.
125. Shuster, W.D., Subler, S., McCoy, E.L., 2001. Deep-burrowing earthworm additions changed the distribution of soil organic carbon in a chisel-tilled soil. *Soil Biol. Biochem.* 33, 983-996.
126. Silva, A.M.M., Sacomani, L.B., 2001. Using chemical and physical parameters to define the quality of pardo river water (Botucatu-Sp-Brasil). Technical Note. *Water Resource*, 35(6): 1609-1616.
127. Supersperg H. (1977). Utilisation de la boue à l'état liquide sur les sols lourds”. *BERICHETE. Der A.TV.*, 28p.
128. Tallon, L.K., Si B.C., Korber, D., Guo, X. 2007. Soil wetting state and preferential transport of *Escherichia coli* in clay soils. *Canadian Journal of Soil Science* 87, 61-72.
129. Tamrabet, L., 2011. Contribution à L'étude de la valorisation des Eaux Usées en Maraichage. Thèse de doctorat .Université Batna. 146p.
130. Tamrabet L., Kribaa M., Hamidi B., Alalata S., Berkani W. et Hamdoudi A., 2007. “Evaluation de l'aptitude des effluents d'Oued El Gourzi (Batna, Nord Est d'Algérie) à l'irrigation et leur impact sur le sol et la qualité des cultures

- marâchères et fourragères». In : Actes du congrès international 'Eau et Déchets'. Université Mohamed I, Oujda, Maroc.
131. Tamrabet, L., Bouzerzour, H., Kribaa M., et Golea, D., 2003. Le devenir des eaux usées traitées: Réponse de deux graminées fourragères, l'orge et l'avoine, aux apports d'eau usée traitée. In: Actes du Colloque international Oasis, Eau et Population. Université Khider, Biskra, Algérie.
132. Tarchitzky, J., Chen, Y., 2002. Rheology of sodium-montmorillonite suspensions. Soil Sci. Soc. Am. J. 66 (2). 406–412.
133. Tinuov, A.V., Scheu, S., 1999. Microbial respiration, biomass, biovolume and nutrient status in burrow walls of *Lumbricus terrestris* L. (Lumbricidae). Soil Biol. Biochem. 31, 2039–2048.
134. Tomati, U., Grappelli, A., Galli, E., 1988. The hormone-like effect of earthworm casts on plant growth. Biol. Fertil. Soils, 5, pp. 288-294.
135. Tunc, T., Sahin U., 2015. The changes in the physical and hydraulic properties of a loamy soil under irrigation with simpler-reclaimed wastewaters. Agricultural Water Management 158, 213–224.
136. Vazquez, M. O., Horan, N.J., Mara, D.D., 1996. Management of domestic wastewater for reuse in irrigation. Water Sci. Technol. 33(10-11). 355-365.
137. Viviani G., Iovino, M., 2004. Wastewater reuse effects on soil hydraulic conductivity. J. Irrig. Drain. Eng. 130 (6). 476-484.
138. Vogeler, I., 2009. Effect of long-term wastewater application on physical soil properties. Water Air Soil Pollut. 196 (1–4). 385–392.
139. Wang X. et Huang G., 2008. Evaluation on the irrigation and fertilization management practices under the application of treated sewage water in Beijing, China. Agricultural Water Management, 95 (9): pp. 1011-1027.
140. Wang, Z., Chang, A.C., Wu L., Crowley, D., 2003. Assessing the soil quality of long-term reclaimed wastewater-irrigated cropland. Geoderma 114. 261–278.
141. Weiler, M., Naef, F., 2003a. Simulating surface and subsurface initiation of macropore flow. Journal of Hydrology 273, 139–154.
142. Weiler, M., Naef, F., 2003b. An experimental tracer study of the role of macropores in infiltration in grassland soils. Hydrological Processes 17, 477–493.
143. Whalen, J.K., Parmelee, R.W., McCartney, D.A., Vanarsdale, J.L., 1999. Movement of N from decomposing earthworm tissue to soil, microbial and plant N pools. Soil Boil. Biochem. 31, 487–492.

144. Wilcox, C.S., Dominguez, J., Parmelee, R.W., McCartney, D.A., 2002. Soil carbon and nitrogen dynamics in *Lumbricus terrestris* do changes in plant species composition matter? *Oecologia* 137, L. middens in four arable, a pasture, and a forest ecosystems. 417–425.
145. Yadav, R.K., Goyal, B., Sharma, R.K., Dubey, S.K., Minhas, P.S., 2002. Post-irrigation impact of domestic sewage effluent on composition of soils, crop and ground water—a case study. *Environ Int.* 28: 481–6.
146. Zhang, Q.L., Hendrix, P.F., 1995. Earthworm (*Lumbricus rubellus* and *Aporrectodea caliginosa*) effects on carbon flux in soil. *Soil Sci. Am. J.* 59, 816–823.

Résumé

Devant une situation de manque d'eau dans les régions arides et semi-arides en Algérie, un concours à l'utilisation des ressources non conventionnelles (eaux usées et boues résiduelles) devient inévitable pour faire face au problème de stress hydrique et organique. L'influence de ces ressources sur la qualité chimique physique et biologique des sols reste peu abordable. Cependant, deux régions localisées dans la wilaya de Batna ont été l'objet de la présente étude. Elles sont caractérisées par un climat semi-aride frais et des Fluvisols à texture fine. Les terrains choisis dans la première région, sont irrigués depuis plusieurs années par les eaux usées partiellement traitées à partir de la station d'épuration de la ville de Batna et rejetées dans l'effluent de Oued El Guourzi. Ces terrains sont situés de l'amont vers l'aval de l'Oued. Les autres, considérés comme témoins, se localisent dans la région de Ouled Si Slimane, irrigués par des eaux naturelles. Les eaux usées de Oued El Guourzi présentent des taux élevés de pH, de conductivité électrique, de salinité, de matières en suspension et du rapport DBO₅/DCO. Cependant, ces caractéristiques semblent être moins atténuées vers l'aval du cours d'eau sous l'effet du phénomène d'autoépuration. Concernant les sols irrigués avec les eaux usées nous avons pu enregistrer des valeurs de pH et de conductivité électrique plus faibles. L'abondance totale et la moyenne de la biomasse des vers de terre dans les sols subissant une irrigation par les eaux naturelles sont très faibles par rapport à ceux irrigués par des eaux chargées. Alors que la porosité et les taux d'infiltration à saturation sont notablement plus élevés dans les sols recevant une eau usée faiblement chargée en matières organiques. Cependant, la stabilité structurale est meilleure dans le sol caractérisé par l'irrigation avec les eaux usées à charge élevée sous céréaliculture. Le taux le plus élevé de macropores et mesopores quantifié par une analyse d'image a été enregistré dans le sol caractérisé par une irrigation avec l'eau naturelle, comparativement aux sols irrigués par les eaux usées. Un essai expérimental en fin de l'étude confirme les résultats obtenus.

Mots clés : Semi-aride ; eaux usées ; sol ; vers de terre ; matières organiques ; macropores ; mésopores ; conductivité hydraulique à saturation ; indice de stabilité structurale.

Abstract

Faced at a situation of lack of water in the arid and semi-arid regions of Algeria, assistance to the use of unconventional resources (wastewater and sludge) is inevitable in order to cope with the problem of water and organic stress. The influence of these resources on the physical and biological chemical quality of soils remains unaffordable. However, two regions located in the Wilaya of Batna were the subject of the present study. They are characterized by a cool semi-arid climate and finely textured Fluvisols. The lands selected in the first region have been irrigated for many years by wastewater partially treated from the sewage treatment plant of the city of Batna and discharged into Oued El Guourzi effluent. These lands are located from upstream to downstream of the Oued. The others, considered as witnesses, are located in the region of Ouled Si Slimane, irrigated by natural waters. Wastewater from Oued El Guourzi has high levels of pH, electrical conductivity, suspended matters and DBO₅/ DCO ratio. However, these characteristics seem to be less attenuated at downstream of the effluent under the effect of the self-purification phenomenon. For soils irrigated with wastewater we have been able to record lower pH and electrical conductivity values. The total abundance and average biomass of earthworms in soils irrigated by natural waters are very low compared to those irrigated by loaded waters. While porosity and conductivity hydraulic at saturation rates are significantly higher in soils receiving wastewater with low organic matter loadings. However, structural stability is better in the soil characterized by irrigation with high-load wastewater under cereal cultivation. The highest rate of macropores and mesopores quantified by image analysis was recorded in soil characterized by irrigation with natural water, compared to soils irrigated by wastewater. An experimental trial at the end of this study confirms the results obtained.

Key words: Semi-arid ; wastewater ; soil ; earthworms ; organic matter ; image analysis; macropores; mesopores; saturation hydraulic conductivity; structural stability index.

في مواجهة حالة نقص المياه في المناطق القاحلة وشبه القاحلة في الجزائر، فإن المساهمة في استخدام الموارد غير التقليدية (مياه الصرف والحمأة) أمر حتمي من أجل التغلب على مشكلة المياه والضغط العضوي. لا يزال تأثير هذه الموارد على الجودة الفيزيائية والبيولوجية للتربة لا يمكن تحمله. ومع ذلك، كانت منطقتين تقع في ولاية باتنة موضوع هذه الدراسة. فهي تتميز بمناخ بارد شبه جاف وتربة كلسية ذات خصائص وادية. وقد تم ري الأراضي المختارة في المنطقة الأولى لعدة سنوات بواسطة مياه الصرف الصحي المعالجة جزئياً من محطة معالجة مياه الصرف الصحي في مدينة باتنة والتي تم تصريفها في مياه وادي القر. تقع هذه الأراضي من أعلى النهر إلى أسفل النهر. أما الآخرون، الذين يعتبرون شهوداً، فيقعون في منطقة أولاد سي سليمان، المروية بالمياه الطبيعية. تتمتع مياه الصرف

الصحي من وادي القرزي بمستويات عالية من PH

DBO5 / DCO

يبدو أن هذه الخصائص أقل موهنة في المجرى المائي تحت تأثير ظاهرة التنقية الذاتية. بالنسبة للتربة التي تم ريها بمياه الصرف الصحي، فقد تمكنا من تسجيل أن الأس الهيدروجيني في تناقص وأن قيم التوصيل الكهربائي أقل. إن الوفرة الكلية ومتوسط الكتلة الحيوية لديدان الأرض في التربة المسقي بالمياه الطبيعية منخفضة للغاية مقارنة بتلك التي تروىها المياه المحشوة. في حين أن معدلات التسلل بين المسامية والتشعب أعلى بكثير في التربة التي تتلقاها مياه الصرف ذات شحنات المواد العضوية فإن الاستقرار الهيكلي أفضل في التربة التي تتميز بالري بمياه الصرف الصحي

العالية الحمل ومحصول الحبوب. تم تسجيل أعلى معدل من إجمالي الم إجمالي المسامات المتوسطة بواسطة تحليل الصور في التربة التي تميزت بالري بالمياه الطبيعية، مقارنة مع التربة المروية بالمياه العادمة. تؤكد التجربة التجريبية في نهاية الدراسة النتائج التي تم الحصول عليها

الكلمات المفتاحية

المناطق الجافة وشبه الجافة ;
الناقلية المائية عند التشبع المادة العضوية ;
بات البنية ;

Annexes

Annexe 1

Tableau 01 : Températures moyennes mensuelles (1986-2016) de la plaine d'El Madher après une extrapolation des données à partir de la station météorologiques de Ain Skhouna.

| Mois | Jan. | Fév. | Mar. | Avr. | Mai | Juin | Juil. | Août | Sep. | Oct. | Nov. | Déc. |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| T max | 10.92 | 12.52 | 15.92 | 19.45 | 24.98 | 30.60 | 34.52 | 34.09 | 28.38 | 23.30 | 16.16 | 11.95 |
| T min | -0.32 | 0.06 | 2.53 | 5.11 | 9.08 | 13.56 | 16.78 | 13.66 | 13.55 | 9.37 | 4.04 | 0.60 |
| T moy | 5.30 | 6.29 | 9.22 | 12.28 | 21.57 | 22.08 | 25.65 | 25.37 | 20.97 | 16.34 | 10.10 | 6.58 |

Tableau 02: Précipitations moyennes mensuelles (1986-2016) de la plaine d'El Madher après une extrapolation des données à partir de la station météorologiques de Ain Skhouna.

| Mois | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Juin | Juil | Aout | Sep | Oct | Nov | Déc | Total |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| P mm | 33.65 | 22.36 | 30.00 | 35.88 | 36.58 | 19.88 | 8.88 | 18.39 | 34.84 | 23.48 | 23.22 | 32.07 | 319.28 |

Tableau 03 : Températures moyennes mensuelles (1986-2015) de la plaine de Ouled Si Slimane après une extrapolation des données à partir de la station météorologiques de Ain Touta.

| Mois | Jan | Fev | Mar | Avr | Mai | Jui | Juil | Aout | Sep | Oct | Nov | Dec |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| T min(m) | 0,24 | 0,67 | 3,17 | 5,8 | 10,03 | 14,59 | 17,27 | 17,43 | 14,51 | 10,12 | 4,87 | 1,63 |
| T max(M) | 13,82 | 12,22 | 16,12 | 22,32 | 23,92 | 29,22 | 35,92 | 35,72 | 31,62 | 22,22 | 17,32 | 13,02 |
| T moy | 7,03 | 6,44 | 9,64 | 14,06 | 16,97 | 21,90 | 26,59 | 26,57 | 23,06 | 16,17 | 11,09 | 7,32 |

Tableau 04: Précipitations moyennes mensuelles (1986-2015) de la plaine de Ouled Si Slimane après une extrapolation des données à partir de la station météorologiques de Ain Touta.

| T°/moins | Jan | Fev | Mar | Avr | Mai | Jui | Juil | Aout | Sep | Oct | Nov | Dec | Total |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| P (mm) | 31,52 | 23,04 | 30,77 | 38,49 | 45,06 | 18,08 | 7,17 | 18,95 | 38,23 | 23,67 | 25,21 | 31,72 | 331,91 |

Annexe 2

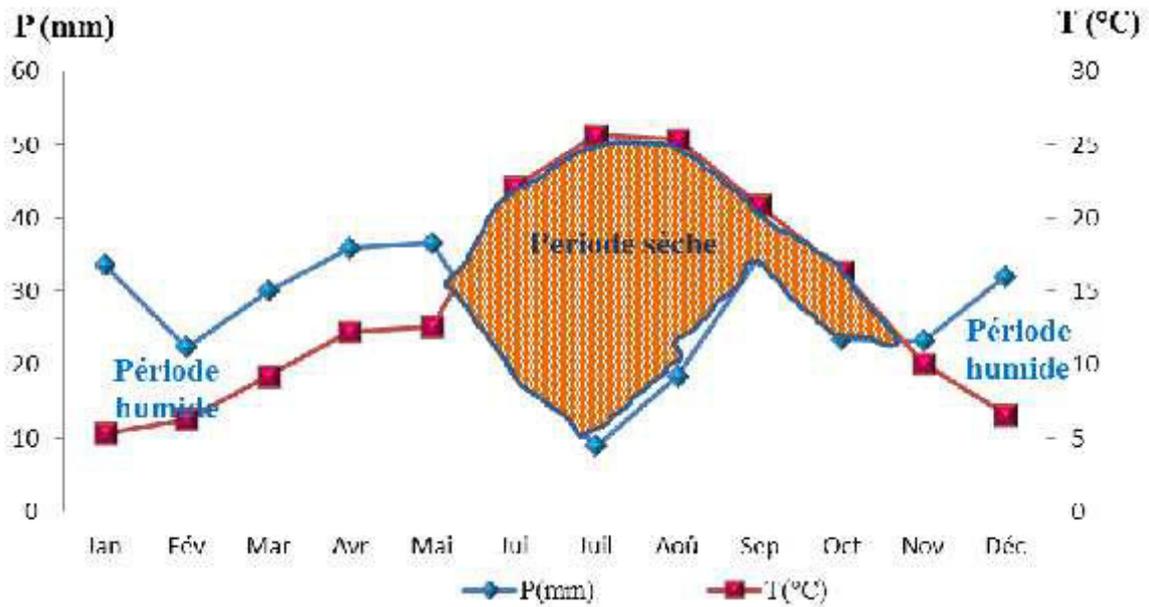


Figure 01 : Diagramme Ombrothermique de Gausson de la plaine d'El Madher de la période 1986-2016.

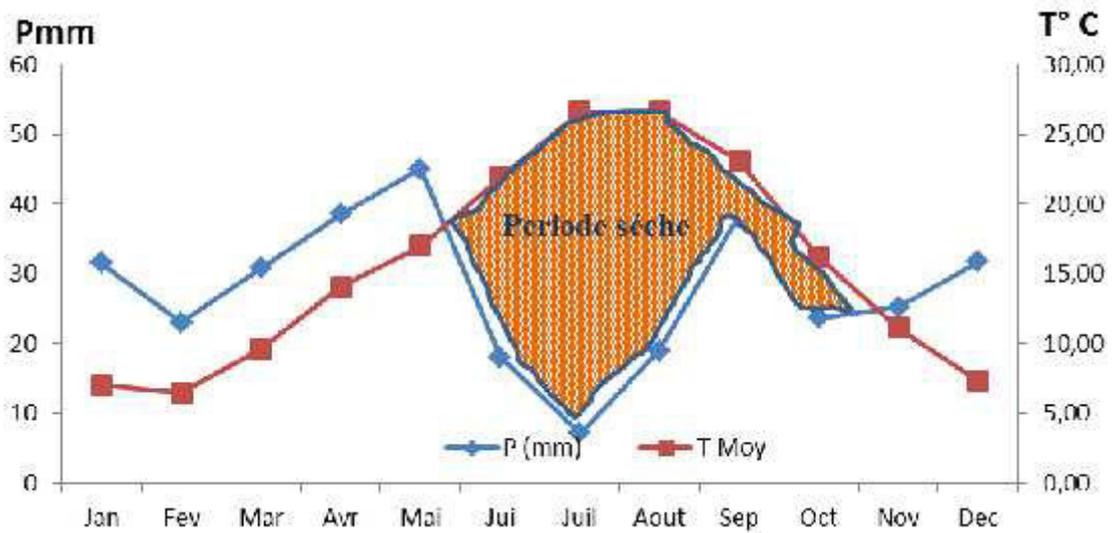


Figure 02 : Diagramme Ombrothermique de Gausson de la zone de Ouled Si Slimane(1986-2015).

Annexe 3

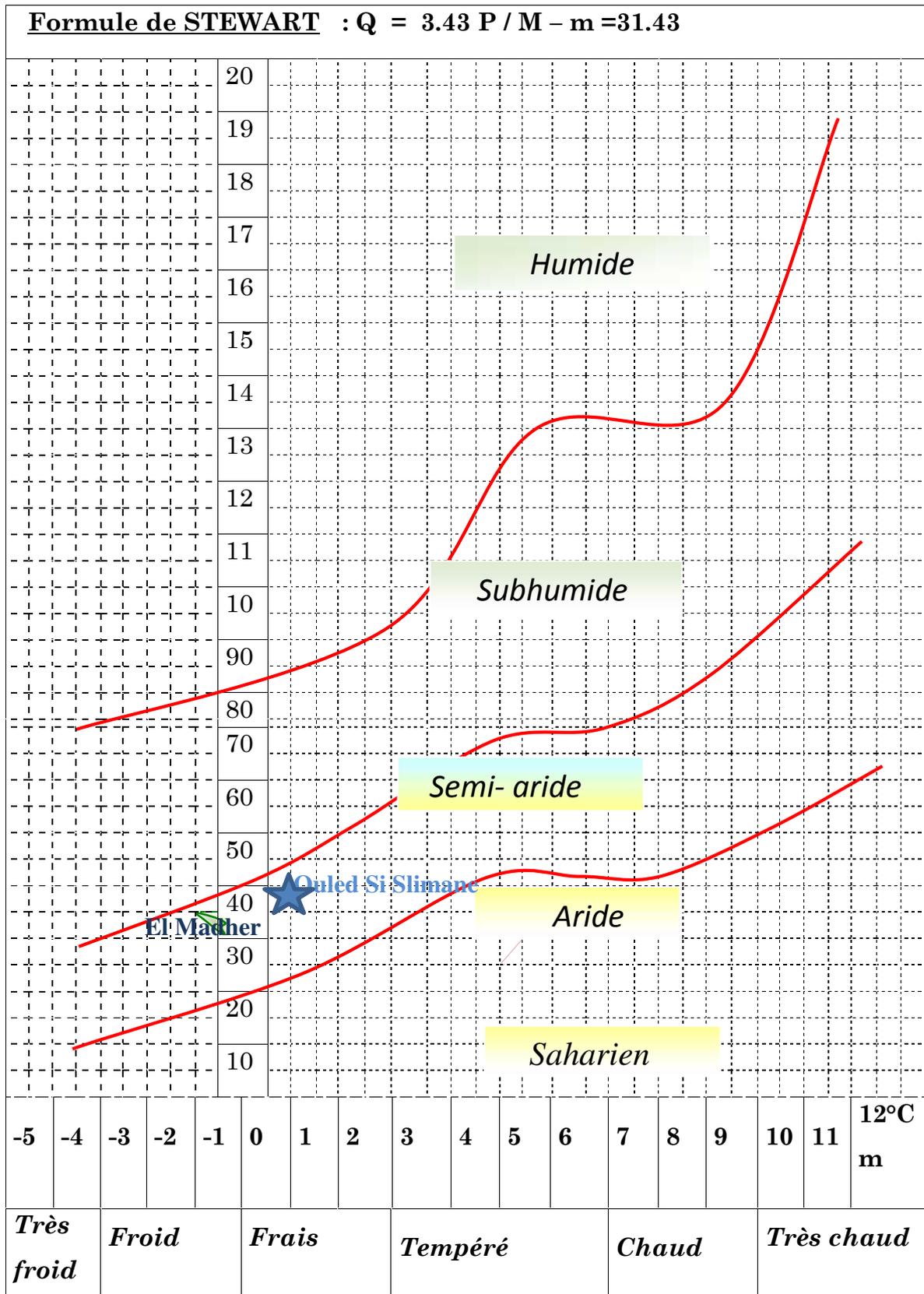


Figure 03 : Climagramme pluvio-thermique d'Emberger des deux zones de l'étude (El Madher et Ouled Si Slimane).

Annexe 4

Tableau 1: les résultats d'analyse d'ETM des boues prélevées (en µg/g de MS).

| Paramètres | Valeurs | Normes* |
|-------------------|----------------|----------------|
| Cd | < 10 | 10 |
| Co | < 34 | - |
| Cr | 54 | 500 |
| Cu | 429 | 600 |
| Mn | 172 | - |
| Ni | 24 | 100 |
| Pb | 225 | 500 |
| Zn | 681 | 2000 |

* Teneur maximales en métaux lourds des boues (**Normes Belges, 1995**).