



## Mémoire MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Science de la nature et de la vie

Filière : Écologie et Environnement

Spécialité : Protection des Écosystèmes

Présenté par :

FASSI Chaimaa

AOUYECHE Fatimattou

### Thème

**Influences de l'irrigation avec les eaux usées brutes et traitées sur la  
qualité chimique des sols et lien avec le fonctionnement biologique du sol**

Devant le jury :

Président :	SEDRATI A.	MCA.	Université de Khenchela
Encadrant :	ABABSA N.	MCA.	Université de Khenchela
Co-encadrant:	LALAAOUNA R.		Université de Khenchela
Examineur :	BERKANI C.	MCA.	Université de Khenchela

**Année universitaire : 2022/2023**

## Remerciements

Nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entreprendre et d'achever cette mission.

Tout d'abord, ce travail n'aurait pas été riche et n'aurait pas été possible sans l'aide et l'encadrement de Dr. Ababsa N., nous la remercions pour la qualité exceptionnelle de son encadrement, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant la période de notre travail pour préparer ce document.

Nos remerciements vont également à notre co-encadrant Laalaouna Rania, pour son aide pratique et son assistance dans la préparation de ce travail

Nous 'adressons nos plus vifs remerciements à : Dr. SEDRATI A/N. Maître de conférences à l'université de Khenchela pour avoir accepté de présider le jury de soutenance.

Nous tenons également et à remercier Dr. BERKANI C. Maître de conférences à l'université de Khenchela pour avoir accepté d'évaluer notre travail et participer au jury en tant que examinateur.

*Chaimaa / fatimatou*

## Liste des abréviations

## Liste des figures

## Liste des tableaux

## Introduction

## Étude bibliographique

1. Les eaux usées, nature et origines.....	01
2. Composition des eaux usées.....	01
3. Traitements des eaux usées.....	03
3.1 L'importance des traitements des eaux usées.....	03
3.2 Les étapes de traitement des eaux usées urbaines .....	03
4. Réutilisation des eaux usées traitées.....	05
4.1 Normes de la qualité de l'eau appliquée à l'Algérie.....	05
4.2 Evaluation de la qualité de l'eau traitée pour l'irrigation.....	05
4.3 Domaines de la réutilisation des eaux usées.....	05
5. Risque associés à la réutilisation des eaux usées.....	07
5.1 Les risques sanitaires.....	07
5.2 Risques environnementaux.....	07
5.3 Avantages environnementaux d'utilisation des eaux usées .....	08
5.4 Effets négatifs de la réutilisation des eaux usées sur l'environnement.....	08
2. le sol .....	09
2.1 Qualité du sol .....	09
2.2 Constituants du sol .....	09
2.3 Fonctionnes éco systémiques de sol .....	10
3. Fonctionnement biologique du sol.....	10
4. L'importance de sol dans l'écosystème .....	10

## Matériels et méthodes

1. Prélèvement des échantillons.....	12
2. Analyses des paramètres chimiques de sol .....	12

## Résultats

1. Caractéristiques chimiques des sols.....	19
1.1 Le pH.....	19
1.2 La conductivité électrique (CE).....	20
1.3 La matière organique (MO).....	21
1.4 L'azote.....	22
1.5 Le rapport carbone sur azote (C/N).....	23
1.6 Le phosphore assimilable (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ).....	24
1.7 Le calcaire total (CaCO <sub>3</sub> ).....	25
2. Caractéristiques biologiques du sol.....	26
2.1 La respiration basale des sols .....	26
2.1.1 Les sols irrigués avec les eaux usées brutes.....	26
2.1.2 Les sols irrigués avec les eaux usées traitées .....	27
2.2 La matière organique consommée après 28 jours d'incubation .....	28

## Discussion

## Conclusion

## Références bibliographiques

## **Liste des abréviations**

**STEP** : Station de traitement des eaux polluées.

**pH** : Potentiel d'hydrogène.

**JORA** : Journal Officiel de la République Algérienne.

**DBO** : Demande biochimique d'oxygène.

**OMS** : Organisation Mondiale de la Santé.

**MO** : Matière organique.

**CE** : Conductivité électrique.

**EUB** : Site irrigué avec les eaux usées brutes.

**TEUB** : Témoin du sol irrigué avec les eaux usées brutes.

**EUT** : Site irrigué avec les eaux usées traitées.

**TEUT** : Témoin du sol irrigué avec les eaux usées traitées.

**NTK** : Azote de kjeldahl.

**P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>** : Phosphore assimilable

**CaCO<sub>3</sub>** : Calcaire.

## Liste des figures

<b>N°</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>01</b>	Synoptique du traitement des eaux usées en station d'épuration.	<b>04</b>
<b>02</b>	La fraction minérale et organique du sol ( <b>Hautefeuille, 2017</b> ).	<b>11</b>
<b>03</b>	Rôle de la faune du sol.	<b>11</b>
<b>04</b>	Photo satellitaire du site irriguée avec les eaux usées traitées.	<b>14</b>
<b>05</b>	Photo satellitaire du site irriguée avec les eaux usées brutes.	<b>15</b>
<b>06</b>	Photo de quelques étapes d'analyses des paramètres de sol analysées.	<b>16</b>
<b>07</b>	Photo de quelques étapes d'analyses des paramètres de sol analysées.	<b>17</b>
<b>08</b>	Photo de quelques étapes d'analyses des paramètres de sol analysées.	<b>18</b>
<b>09</b>	Valeurs de pH de sol mesuré dans les 4 types de sols (EUT, TEUT, EUB, TEUB).	<b>19</b>
<b>10</b>	Valeurs de CE de sol mesuré dans les 4 types de sols (EUT, TEUT, EUB, TEUB).	<b>20</b>
<b>11</b>	Valeurs de MO de sol mesuré dans les 4 types de sols (EUT, TEUT, EUB, TEUB).	<b>21</b>
<b>12</b>	Valeurs de l'azote de sol mesuré dans les 4 types de sols (EUT, TEUT, EUB, TEUB).	<b>22</b>
<b>13</b>	Valeurs du rapport C/N dans les 4 types de sols (EUT, TEUT, EUB, TEUB).	<b>23</b>
<b>14</b>	Valeurs de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> de sol mesuré dans les 4 types de sols (EUT, TEUT, EUB, TEUB).	<b>24</b>
<b>15</b>	Valeur de CaCO <sub>3</sub> de sol mesuré dans les 4 types de sols (EUT, TEUT, EUB, TEUB).	<b>25</b>
<b>16</b>	Courbe de la respiration du sol irrigué avec les eaux usées brute (EUB) avec le témoin (TEUB).	<b>26</b>
<b>17</b>	Courbe de la respiration du sol irrigué avec les eaux usées traitées (EUT) avec le témoin (TEUT).	<b>27</b>
<b>18</b>	Valeur de MO consommée après 28 jours d'incubation dans les 4 types de sols (EUT, TEUT, EUB, TEUB).	<b>28</b>

### Liste des tableaux

<b>N°</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>01</b>	Normes de rejets dans un milieu récepteur (JORA, 2012).	<b>06</b>
<b>02</b>	Les différents domaines d'applications des eaux usées (Wintgens et al., 2005).	<b>07</b>
<b>03</b>	Caractéristiques des deux sites irrigués avec les eaux usées brutes et traitées.	<b>13</b>

## **Résumé**

La réutilisation des eaux usées en agriculture est une pratique qui date des temps anciens. L'objectif de cette étude est d'évaluer les impacts de l'irrigation par des eaux usées brutes et traitées sur la qualité chimique et biologique des sols agricoles.

Nous avons réalisé des analyses chimiques et biologiques des échantillons des sols irrigués avec les eaux usées brutes et leur témoin de la ville de l'Hamma (Khenchela), et des échantillons des sols irrigués avec les eaux usées traitées et leur témoin de la ville d'Ain Beida (W. Oum El Bouaghi).

Dans l'ensemble, nos résultats ont montré que l'irrigation avec les eaux usées traitées à diminuer légèrement la conductivité électrique de sol, la matière organique, le phosphore assimilable ainsi que le calcaire total, alors qu'elle a fait augmenter la teneur en azote. Concernant l'irrigation avec les eaux usées brutes elle a diminué le pH, la matière organique de sol et a augmenté la teneur en azote, le calcaire et le phosphore assimilable. Les résultats relatifs à la respiration de sol ont montré que pour les sols des deux sites irrigués avec les eaux usées brutes et traitées, les flux de CO<sub>2</sub> étaient plus faibles que pour les sols témoins. La caractérisation complète des eaux d'irrigation et un suivi régulier restent nécessaires pour bien cerner l'impact de l'irrigation avec les eaux usées sur la qualité de sol.

**Mots clés :** qualité chimique du sol, eaux usées traitées, Eaux usées brutes, irrigation, qualité biologique du sol.

## **Abstract**

The reuse of wastewater in agriculture is a practice that dates back to ancient times.

The aim of this study is to assess the impact of irrigation with raw and treated wastewater on the chemical and biological quality of agricultural soils. We carried out chemical and biological analyses of soil samples irrigated with raw wastewater and its control from the town of l'Hamma (Khenchela), and samples of soils irrigated with treated wastewater and their control from the town of Ain Beida (Oum El Bouaghi).

Overall, our results showed that irrigation with treated wastewater slightly decrease soil electrical conductivity, organic matter, available phosphorus and total limestone, while increasing nitrogen content. Irrigation with raw sewage reduced pH and soil organic matter, and increased nitrogen, limestone and available phosphorus content. The results on soil respiration showed that for soils from both sites irrigated with raw and treated CO<sub>2</sub> fluxes were lower than for control soils.

Full characterization of irrigation water and regular monitoring are still necessary to fully the impact of wastewater irrigation on soil quality.

**Keywords:** chemical soil quality, treated wastewater, raw wastewater, irrigation, biological soil quality.

## ملخص

إن إعادة استخدام المياه العادمة في الزراعة ممارسة تعود إلى العصور القديمة. الهدف من هذه الدراسة هو تقييم تأثيرات الري بمياه الصرف الصحي الغير المعالجة والمعالجة على الجودة الكيميائية والبيولوجية للتربة الزراعية. أجرينا التحاليل الكيميائية والبيولوجية لعينات التربة المروية بمياه الصرف الصحي الخام مع وجود شاهد من مدينة الحامة (خنشلة) ، وعينات من التربة المروية بمياه الصرف الصحي المعالجة مع وجود شاهد كذلك من مدينة عين البيضاء (أم البواقي). بشكل عام، أظهرت نتائجنا أن الري بمياه الصرف الصحي المعالجة أدى إلى انخفاض طفيف في الناقلية الكهربائية للتربة، والمواد العضوية ، والفوسفور المتاح، و كربونات الكالسيوم الكلية، بينما زاد محتوى النيتروجين.

فيما يتعلق بالري بمياه الصرف الصحي الخام، فقد أدى ذلك إلى خفض درجة الحموضة والمواد العضوية للتربة وزيادة محتوى النيتروجين وكربونات الكالسيوم الكلية والفوسفور المتاح. أظهرت النتائج المتعلقة بتنفس التربة أنه بالنسبة للتربة في الموقعين المرويين بمياه الصرف الصحي الخام والمعالجة، كانت تدفقات ثاني أكسيد الكربون أقل من التربة التي استخدمت كشاهد. يظل التوصيف الكامل لمياه الري والمتابعة المستمرة ضروريين لفهم تأثير الري بمياه الصرف الصحي على جودة التربة.

**الكلمات المفتاحية:** الخصائص الكيميائية للتربة، مياه الصرف الصحي المعالجة، مياه الصرف الصحي الخام، الري، الخصائص البيولوجية للتربة.

# *Introduction*

## **Introduction**

L'eau est une ressource précieuse et vitale absolument indispensable à la survie de tous les organismes vivants et toutes les activités humaines. Elle subit une pression croissante avec l'augmentation continue de la population mondiale et l'approvisionnement naturel sous forme de précipitations, qui devient de plus en plus variable et incertain avec le changement climatique **(Bilotta et al., 2012)**, qui contribue lui même à la rareté de l'eau en ce qui concerne le bilan hydrique régional **(Dwivedi, 2017)**.

La croissance sociale de la population et le développement économique vers une urbanisation et une industrialisation à grande échelle conduisent à la génération d'une grande quantité des eaux usées polluées **(Koop et van Leeuwen, 2017)**. La pénurie continue de l'eau, surtout dans les régions arides et semi-arides, a favorisé la recherche de sources supplémentaires **(Jamshidzadeh et Tavangari Barzi, 2020)**, parmi ces ressources non conventionnelle la réutilisation des eaux usées. En effet c'est une pratique qui date des temps anciens.

La gestion des eaux usées a connu récemment un très grand intérêt ce qui concerne l'exploitation des eaux usées épurées comme une ressource qui vise à la production des quantités complémentaires en eau destinée aux utilisations dans l'irrigation des champs agricoles, utilisations industrielles, récréatives et recharges des eaux souterraines **(Qasim et Zhu, 2017)**. Ainsi, cette pratique permet non seulement un approvisionnement en eau supplémentaire diminuant la pression sur la ressource, mais elle assure aussi une meilleure protection des milieux récepteurs accueillant les eaux usées **(Charland, 2014)**.

Les eaux usées constituent souvent une source d'eau fiable tout le long de l'année et contiennent les nutriments nécessaires à la croissance des végétaux, la valeur de ces eaux est reconnue depuis longtemps par les agriculteurs du monde entier et leur utilisation en agriculture représente une forme de recyclage de l'eau et des nutriments, mais cette pratique comporte des risques liés à la qualité des eaux usées **(Boudjabi et al., 2022)**.

La rareté des ressources en eau propre conduit à de nombreuses avancées scientifiques et technologiques dans les procédés de traitement des eaux usées car le traitement des eaux usées est essentiel pour récupérer l'eau douce pour les activités humaines et l'agriculture **(Saleh et al., 2022)**.

L'application des eaux usées traitées dans l'agriculture devrait croître au cours des prochaines décennies **(Hosney et al., 2023)** a cause du problème de la rareté des précipitations.

Généralement, la récupération des eaux usées à des fins d'irrigation agricole peut améliorer la disponibilité, l'accès et l'utilisation de l'eau et également minimiser l'empreinte de l'eau grise puisque les terres agricoles peuvent assimiler des niveaux élevés de nutriments (**Lahlou et al., 2022**). L'irrigation directe à partir des eaux usées brutes est interdite mais continue néanmoins d'être pratiquée dans de nombreux endroits (**Khelif, 2018**).

Les eaux usées non traitées contiennent des agents pathogènes (bactéries, parasites et virus), des produits chimiques, et des nutriments qui peuvent poser un risque pour la santé humaine et environnementale (**Ungureanu et al., 2020**).

L'objectif de ce travail consiste à évaluer les impacts de l'irrigation par des eaux usées brutes et traitées sur la qualité chimique et biologique des sols.

Le manuscrit élaboré s'articule autour de quatre parties principales, en plus de l'introduction et la conclusion.

La première partie est consacrée à une revue bibliographique, dont laquelle nous avons abordé des informations qui concerne les eaux usées, dans un premier ordre, ensuite dans un second ordre nous avons abordé le concept de qualité du sol et ses composantes et leur importance dans l'environnement ainsi que les fonctions les plus importantes qu'il assure. La deuxième partie est une présentation des sites sur lesquels nous avons prélevé les échantillons de sol, ainsi que les méthodes utilisées pour les analyses effectuées sur ces échantillons.

La troisième partie porte sur la présentation, l'analyse et la discussion des résultats.

# *Etude bibliographique*

## **1. Les eaux usées, nature et origines**

### **1.1 Définition des eaux usées**

Une eau usée est généralement un mélange de matières polluantes répondant à ces catégories (**Rejsek, 2002**), qui sont rejetées dans un émissaire d'égout appelée encore eau résiduaire, proviennent de diverses activités agricoles, domestiques et industrielles (**Ahmed et al., 2022**). Chaque type d'eau usée possède des caractéristiques liées à son origine, altérées par les activités humaines (**Amiri, 2020**). Ainsi une modification défavorable ou nocive des propriétés physico-chimique et biologiques (**Ghadbane, 2003**) et chargées de matières minérales et organiques (**Kanbouchi, 2014**). Elles sont composées d'environ 99% d'eau et 1% de matières solides en suspension (**Sawadogo, 2018**), et dont certains peuvent avoir un caractère toxique (**Bachi, 2010**), c'est pour cela, elles doivent être transportées par le réseau d'égouts vers des stations d'épuration afin d'être traitées (**Bara et Kara, 2021**).

### **1.2 Les eaux usées domestiques**

Les eaux usées domestiques sont constituées d'une part des eaux vannes encore appelées « eaux noires » issues des toilettes et chargées des matières organiques azotées, de germes fécaux, et d'autre part des eaux grises provenant des ménages (lavabo, lessiveuse, baignoire,...) et des rejets issus essentiellement des activités ménagères (**Tiomele et al., 2022**). Les eaux usées domestiques sont essentiellement caractérisées par la présence des matières minérales, des matières organiques biodégradables (**Lemita, 2021**).

### **1.3 Les eaux usées industrielles**

La définition des eaux usées industrielles est très large et différente de celle domestique. En raison des différents types d'industries et des divers procédés appliqués (**Shahedi et al., 2020**). Leurs caractéristiques varient d'une industrie à l'autre (**Boussadia et al., 2018**).

### **1.4 Les eaux usées pluviales**

Les eaux usées pluviales sont synonymes des eaux claires collectées dans les réseaux d'assainissement (**Tiomele et al., 2022**). Elles constituent la cause d'une pollution importante des cours d'eau, notamment pendant les périodes orageuses. L'eau de pluie se charge d'impuretés au contact de l'air (fumées industrielles), puis, en ruisselant, des résidus déposés sur les toits et les chaussées des villes (huiles de vidange, carburants, ...) (**Libes, 2010**).

## **2. Compositions des eaux usées**

### **2.1 Généralité**

Toutes les activités humaines qui reposent sur l'utilisation de l'eau génèrent des eaux usées. L'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture estime que la quantité d'eaux usées produite chaque année est de près de 1500 km<sup>3</sup> et c'est environ six fois

plus que la quantité d'eau des rivières qui traversent le monde entier (**Kempińska et Kotwasik, 2018**). Dans la plupart des pays en développement, les eaux usées urbaines constituent une menace environnementale pour la santé humaine et animale (**Sanou et al., 2019**).

## **2.2 Les microorganismes**

Les eaux usées contiennent tous les microorganismes excrétés avec les matières fécales. La microflore entérique normale est accompagnée d'organismes pathogènes où l'ensemble de ces organismes peut être classé en trois grands groupes : les bactéries, les virus, les protozoaires... (**Belaid, 2010**).

### **2.2.1 Les bactéries**

Les bactéries sont des organismes microscopiques dont la taille varie entre 0,2 et 10 µm (**Carré, 2017**). Les bactéries pathogènes se propagent dans les eaux usées par l'intermédiaire des fèces des individus (**Drechsel et al., 2011**). D'après **Bofuou (2015)**, les principales bactéries pathogènes rencontrées dans les eaux usées sont : Salmonella sp, Shigella sp, Yersinia enterocolitica, Vibrio cholerae, Plesiomonas shigelloides, Listeria monocytogenes, Mycobacterium sp, Pseudomonas aeruginosa, Campylobacter sp, Klebsiella pneumoniae... etc

### **2.2.2 Virus**

Les virus sont de très petits parasites intracellulaires (10 à 350 nm) qui ne peuvent se reproduire que dans les cellules hôtes (**Laabassi, 2018**). Leurs concentrations dans les eaux usées municipales varient de  $10^3$  à  $10^4$  particules par litre (**Arbaoui et Ouaggad, 2020**). Leur isolement et leur dénombrement dans les eaux usées sont difficiles, ce qui conduit vraisemblablement à une sous-estimation de leur nombre réel (**Nani et al., 2021**).

Les virus sont classés en familles, les familles les plus fréquemment retrouvées dans les eaux usées sont les Picornaviridae (ex : virus de l'hépatite A) et Caliciviridae (norovirus, GI et, GII, responsables de près de 80% de gastroentérites) (**Girardin, 2015**), et Coxsackie et Adenovirus et Reovirus (**Haiahem et Yassad, 2022**).

### **2.2.3 Protozoaires**

Les protozoaires sont des organismes monocellulaires, dont leurs réservoirs sont les matières fécales des animaux et des humains (**Carré, 2017**).

Certains protozoaires au cours de leur cycle vital, passent par une forme de résistance, les kystes, qui peuvent être véhiculés par les eaux résiduaires (**Vandermeersch, 2005**). Parmi les protozoaires les plus importants du point de vue sanitaire, il faut citer Entamoeba histolytica, responsable de la dysenterie amibienne et Giardia lamblia (**Belaid, 2010**). En revanche, 10 à 30 kystes, est une dose suffisante pour causer des troubles sanitaires (**Tabet et al., 2015**).

#### **2.2.4 Les helminthes**

Les vers helminthes sont des vers multicellulaires souvent rencontrés dans les eaux usées (**Metahri, 2012**). Dans les eaux usées municipales, le nombre d'œufs de parasites peut être évalué entre 10 et  $10^3$  pc/L (**Toze, 2006**). Comme les protozoaires, ils sont pour la plupart les parasites, dont la plupart ont des cycles de vie complexes (**Carré, 2017**). Parmi les vers pathogènes rencontrés dans les eaux usées on trouve : Ascaris, Oxyuris vermicularis, Flagellés, ténias (**Belaid, 2010**). La persistance de ces organismes dans différents environnements les conditions environnementales et leur résistance à la désinfection leur permettent de la reproduction, qui est un risque potentiel (**Uchymiak et al., 2007**).

### **3. Traitements des eaux usées**

Le traitement des eaux usées comprend l'ensemble des processus physiques, chimiques et biologiques successivement pour la dépollution des eaux usées, visant à éliminer les matières organiques biodégradables, les solides en suspension et les nutriments (**Cotterill et al., 2017**). Le traitement est réalisé dans une usine nommée station d'épuration ou station de traitement des eaux polluées (STEP).

#### **3.1 L'importance des traitements des eaux usées**

Le traitement de l'eau usée a pour objectif de réduire du niveau de contamination en métaux lourds et en micro-organismes pathogènes pour la rendre plus utilisable en agriculture et en différentes usages.

#### **3.2 Les étapes de traitement des eaux usées urbaines**

##### **3.2.1 Le prétraitement**

Le prétraitement est une phase d'épuration grossière. Elle élimine tous les éléments solides volumineux et grossiers (**Asiwal, 2016**) qui pourraient endommager les ouvrage de traitement (**Naidoo et al., 2014**). Cette phase retire environ 35% des éléments polluants (**Moulin et al., 2013**). Elles sont respectivement les suivantes : (1) Dégrillage, (2) Dessablage et (3) Déshuilage dégraissage.

##### **3.2.2 Traitement primaire**

Au cours de cette méthode, les grosses matières solides sont d'abord, par la coagulation-floculation qui est généralement utilisée pour éliminer les polluants colloïdaux de l'eau (**Ghosh, 2019**). Ce procédé consiste à introduire des coagulants inorganiques qui neutralisent la charge de surface des particules en suspension et facilitent ainsi leur sédimentation (**Ben Osman, 2022**). L'ajout dans un second temps d'un réactif chimique permet d'améliorer la sédimentation et de former des floes plus gros qui pourront être plus facilement retirés de la suspension (**Lee et al., 2012**).

### 3.2.3 Traitement secondaire (Traitement biologique)

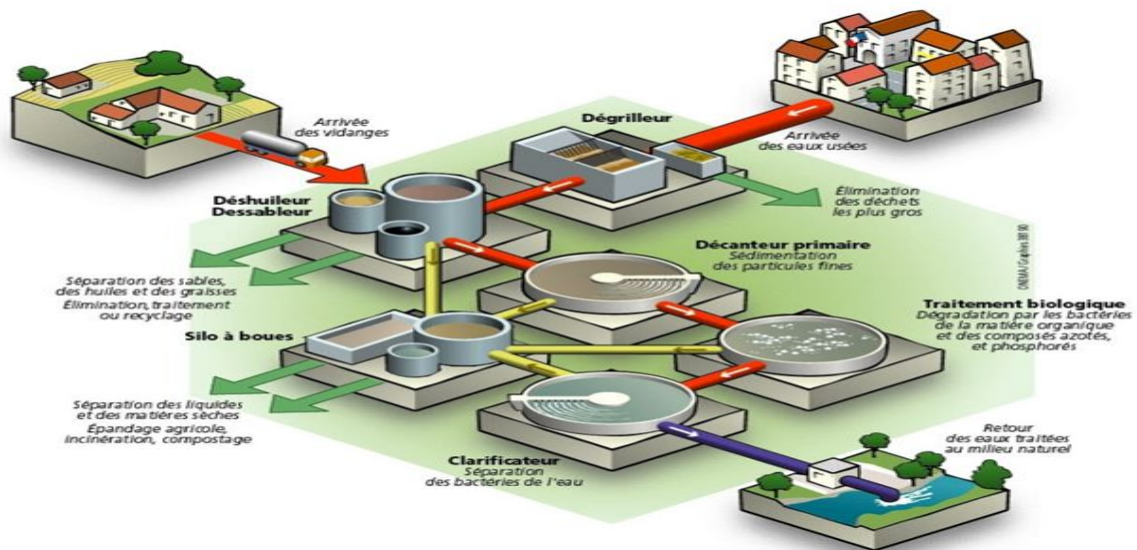
Le traitement biologique des eaux usées est le procédé le plus utilisé dans les stations d'épuration (**Ben Osman, 2022**). Les techniques d'épuration biologiques utilisent l'activité des bactéries dans l'eau, qui dégradent la matière organique (**Anku et al., 2017**). Ces techniques peuvent être anaérobies, c'est-à-dire se déroulant en absence d'oxygène, ou aérobies c'est-à-dire nécessitant un apport oxygène (**Rezazi et al., 2022**).

### 3.2.4 Traitement tertiaire

Les traitements de désinfection chimique sont souvent utilisés comme traitements tertiaires. Parmi les désinfectants chimiques, le chlore est l'un des biocides les plus couramment utilisés pour la désinfection des eaux usées et le traitement des eaux d'irrigation (**Decol et al., 2019**). La désinfection par la chloration est la méthode la plus ancienne, elle permet l'élimination de la plupart des microorganismes pathogènes (**Bourbon et al., 2015**).

### 3.2.5 Traitement des boues

Le traitement des boues est défini comme l'ensemble des opérations visant à modifier les caractéristiques des boues en excès afin de rendre leur destination finale fiable et sans nuisance.



**Figure 1.** Synoptique du traitement des eaux usées en station d'épuration

(<https://www.charente-maritime.gouv.fr/Actions-de-l-Etat/Environnement-risques-naturels-et-technologiques/Eau-et-milieux-aquatiques/Eaux-usees-et-Eaux-pluviales/L-assainissement-collectif>).

#### 4. Réutilisation des eaux usées traitées

Le rejet d'eaux usées non traitées ou mal traitées est une source de pollution des eaux souterraines et de surface (**Djaani et Amer, 2020**). De nombreux pays traitent les eaux usées par différentes techniques afin de les réutiliser dans de nombreux domaines en particulier pour l'irrigation (**Djaani et Amer, 2020**).

Face à la pénurie d'eau, la réutilisation des eaux usées est une voie d'avenir, une fois traitées, les eaux usées peuvent en effet et être destinées à différents usages (**Maquet, 2021**).

##### 4.1 Norme de la qualité de l'eau appliquée à l'Algérie

Avant d'être rejetés dans le milieu naturel, la réglementation impose des normes de rejet, dans les eaux superficielles comme dans le sol et le sous-sol suivant différents types de dispositifs d'épuration et de rejets (**Amiri et al., 2017**). Le tableau (1) résume les normes Algériennes qui représentent les valeurs limites maximales de rejet d'effluents dans un milieu récepteur.

##### 4.2 Evaluation de la qualité de l'eau traitée pour l'irrigation

Cinq principaux **critères physico-chimiques** pour évaluer la qualité de l'eau d'irrigation ont été dégagés (**Couture, 2006**) :

(1) **salinité** qui représente le contenu total en sels solubles, (2) **sodium**: proportion relative des cations sodium ( $\text{Na}^+$ ) par rapport aux autres, (3) **alcalinité et dureté**: concentration d'anions carbonate ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) et bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) en relation avec la concentration en calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et en magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), (4) **concentration** en éléments qui peuvent être toxiques, (5) **pH** de l'eau d'irrigation (6) **critères de qualité biologique** la microbiologie des eaux est le critère le plus important pour les ouvriers du chantier et le grand public qui peuvent entrer en contact direct ou indirect avec les eaux usées traitées (**Mefti, 2015**). Une réutilisation restrictive ou non restrictive peut être adoptée en fonction de la qualité microbiologique. Chaque pays possède des directives et/ou règlements auxquels les agriculteurs doivent obligatoirement se conformer (**Benzaghrou, 2021**).

##### 4.3 Domaines de la réutilisation des eaux usées

Le monde a trouvé des ressources alternatives, qui peuvent combler la demande en eau dans plusieurs domaines de l'industrie d'agriculture surtout (**Kacprzak et al., 2017**). Les principaux domaines de réutilisations des eaux usées sont présentés dans le tableau (2). La réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation devient le meilleur choix, surtout dans les régions arides et semi-arides (**Drechsel et al., 2010**). De plus, les boues d'épuration peuvent être considérées comme un substrat pour la fertilisation et l'assainissement des sols si la technologie appliquée permet d'obtenir des produits de qualité (**Kacprzak et al., 2017**).

La réutilisation des eaux usées présente de nombreux avantages tels que l'augmentation de la teneur en carbone organique (CO), azote (N), phosphore (P), Potassium (K) et magnésium (Mg) dans le sol et irrigation des eaux souterraines propres (Singh et al., 2009). D'après Benzaria (2008), les différents types de réutilisation sont classés en trois catégories :

**1. Usage agricole :** L'agriculture consomme la part la plus importante de l'eau (70%), à travers les statistiques,

**Tableau 1.** Normes de rejets dans un milieu récepteur (JORA, 2012)

Paramètres	Unités	Valeurs limites
Température	°C	30
PH	-	6,5 à 8,5
MES	mg/L	35
DBO5	mg/L	35
DCO	mg/L	120
Azote	mg/L	10
Phosphates	mg/L	02
Phosphore total	mg/L	10
Cyanures	mg/L	0,1
Aluminium	mg/L	03
Cadmium	mg/L	0,2
Fer	mg/L	0,2
Manganèse	mg/L	01
Mercure total	mg/L	0,01
Nickel total	mg/L	0,5
Plomb total	mg/L	0,5
Cuivre total	mg/L	0,5
Zinc total	mg/L	03
Huiles et graisses	mg/L	20
Hydrocarbures totaux	mg/L	10
Indices phénols	mg/L	0,3
Composés organiques chlorés	mg/L	5
Chrome totale	mg/L	0,5

**JORA :** Journal Officiel de la République Algérienne.

**2. Usage urbain** comme l'arrosage de parcs, de terrains de sport, de terrains de golf, les piscines, bassins pour la pêche et la navigation de plaisance,

3. **Usage industriel** comme les circuits de refroidissement, construction, papeteries, industries textiles, etc.

**Tableau 2.** Les différents domaines d’application des eaux usées (**Wintgens et al., 2005**).

<b>Domaine de réutilisation des eaux usées</b>	<b>Exemples d’applications</b>
Irrigation pour l’agriculture	Irrigation de cultures Irrigation de pépinières
Irrigation d’espaces verts	Parcs, cours de golf, zones résidentielles
Réutilisation et recyclage industriel	Refroidissement, alimentation des bouilleurs, eau de procédés
Réalimentation des eaux souterraines	Contrôle de la contamination en sel des nappes souterraines, réapprovisionnement en eau
Réutilisation bénéfiques pour l’environnement	Etangs et lacs, débit des cours d’eau, aquaculture
Utilisation urbaine de non-potabilisation	Protection incendie, air conditionnée, eau de toilettes
Utilisation pour potabilisation	Mélange dans des réservoirs existants, injection dans le réseau d’eau potable

## 5. Risques associés à la réutilisation des eaux usées

### 5.1 Les risques sanitaires

Les virus entériques pathogènes de l’homme sont les agents étiologiques majeurs des maladies entériques d’origine hydrique (**Moreira et Bondelind, 2017**), la prévalence de micro-organismes pathogènes peut provoquer des maladies d’origine hydrique telles que la typhoïde, la tuberculose, le choléra, l’hépatite et la dysenterie, qui sont alarmantes (**Wen et al., 2020**). Les eaux usées ne sont parfois pas traitées avant d’être rejetées dans les cours d’eau, ce qui pose des problèmes importants, en particulier lorsqu’un organisme microbien, une demande biochimique en oxygène (DBO), une toxicité et des nutriments sont trouvés en combinaison (**Siddiki et al., 2021**). Les estimations ont révélé qu’environ un tiers des médicaments administrés a été détecté dans les eaux usées du service d’oncologie, le fluorouracile a été détecté dans les eaux usées jusqu’à 124 µg/l, la doxorubicine jusqu’à 1,35 µg/l. (**Ferk et al., 2007**).

### 5.2 Risques environnementaux

Les effluents des usines de traitement des eaux usées déposent de grandes quantités de matières organiques et de nutriments dans les cours d’eau récepteurs, l’augmentation de la charge en éléments nutritifs entraîne une eutrophisation et des carences temporaires en éléments chimiques (**Ghosh, 2019**).

### 5.3 Avantages environnementaux d'utilisation des eaux usées

Les eaux usées devraient être considérées comme une source renouvelable d'eau, d'énergie, de nutriments et d'autres sous-produits récupérables plutôt que comme un fardeau (OMS, 2018).

La sauvegarde des ressources en eaux souterraines dans les zones de surexploitation de ces ressources pour l'agriculture ; les eaux usées sont importantes pour de nombreux agriculteurs particulièrement sous les climats arides et semi-arides (Atinkpahoun et al., 2018).

L'épuration de l'eau usée et son utilisation en irrigation est une option attrayante, car elle représente une source d'eau et d'engrais additionnels renouvelables et fiables (Khacheba et al., 2017). Et aussi les eaux usées traitées ont une valeur nutritive élevée qui peut améliorer la croissance des plantes, réduire les taux d'application d'engrais et d'augmenter la productivité des sols de faible fertilité (Al-Lahham et al., 2003).

Les eaux de faible qualité étant utilisées à des fins d'irrigation et l'eau douce de bonne qualité est utilisée pour l'eau potable et d'autres usages spéciaux (Hamdy et Ragab, 2006). L'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation aidera à réduire le pompage excessif et l'extraction des eaux souterraines, évitant ainsi les problèmes liés à l'eau de mer (Forats et Ghedair, 2019).

### 5.4 Effets négatifs de la réutilisation des eaux usées sur l'environnement

#### 5.4.1 Impact sur le sol

L'effet négatif le plus important sur l'environnement causé par l'utilisation des eaux usées agricoles est l'augmentation de la salinité du sol qui, si elle n'est pas contrôlée, peut diminuer la productivité à long terme (Kessira et Hamdy, 2005), une diminution du pH est observée dans certains sols basique (Herpin et al., 2007), Cette diminution est expliquée par un lessivage par les eaux d'irrigation des calcaires actifs qui sont responsables de l'alcalinité du sol (Solis et al., 2005). Pereira et al. (2002) ont rapporté que la salinité affecte la productivité du sol par les manières suivant :

- Il peut provoquer une toxicité d'ions spécifiques (sodium, bore ou chlore) ;
- Il interfère avec l'absorption par les plantes des nutriments essentiels tels que le potassium et le nitrate en raison de l'antagonisme avec le sodium, le chlorure et le sulfate ;
- Il peut endommager la structure du sol en provoquant un relâchement du sol et un colmatage des pores.

Nadav et al. (2013) indiquent que les propriétés physico chimique du sol sont altéré par l'irrigation par les eaux usées, puisque l'application à long terme des eaux usées cause

l'accumulation des matières organique donc les matières en suspension des eaux usées affect négativement la porosité des sols (Tunc et Sahin, 2015).

#### 5.4.2 Impact sur les cultures

L'irrigation avec les eaux usées traités ou brutes influence sur les cultures par deux mécanismes (1) la phytotoxicité où l'eau usée peut créer une toxicité due à une concentration élevée de certains éléments comme le bore, chlorure, sodium, bicarbonate et quelques métaux lourds (Qadir et Scott, 2011). Les nécroses sur les feuilles identifient des symptômes de toxicité au bore chez les cultures sensibles de bore, (2) Accumulation des métaux dans les plantes ces métaux lourds posent des problèmes d'écotoxicité et pourraient être impliqués dans de nombreuses pathologies, atteintes du système nerveux central, du foie, des reins, mais aussi cancers et malformations embryonnaires (Abrahams, 2002), Yadav et al. (2002) ont constaté que les teneurs en métaux lourds au niveau des plantes irriguées par des eaux usées depuis 30 ans sont au-dessous de seuil de toxicité pour les plantes.

## 2. Le sol

### 2.1 Qualité du sol

La qualité d'un sol se définit ainsi en fonction de son aptitude à fournir les services attendus (Antoni et al., 2011). Sa définition s'appuie sur la notion de composantes fonctionnelles, à la fois chimiques, biologiques et physiques (Piutti et al., 2015), donc est une mesure de la capacité du sol à fournir des services écosystémiques, à travers son aptitude à accomplir des fonctions (Tóth et al., 2007). La matière organique des sols est un pilier central de la fertilité et les micro-organismes du sol (Piutti et al., 2015), les organismes du sol et leurs activités peuvent donc être utilisés comme indicateurs pertinents de la qualité du sol (Krüger et al., 2017).

### 2.2 Constituants du sol

Le sol est principalement composé de particules minérales de masse, de volume et de minéralogie variables et constitué de macromolécules organiques complexes composées de matière organique dérivée de débris végétaux ou animaux (Mouloubou, 2015). D'après Behlouli (2021), le sol est un organisme vivant composé de deux parties (Fig. 2) : (1) la **fraction organique généralement** la matière organique du sol peut être inerte (résidus de culture, humus) ou vivante (faune et flore) (Lavelle 2002), et elle joue de nombreux rôles (Vanhove et Bertin, 2018). Les plus importants sont sans doute ceux de source d'éléments nutritifs et d'énergie pour les organismes vivants ainsi que de contributeurs à la fertilité du sol (Briat et Job, 2017), (2) **la fraction minérale** : Les éléments minéraux sont fournis lors de la biodégradation et minéralisation de la matière organique par les organismes du sol.

### **2.3 Fonctions éco systémique de sol**

Les fonctions des sols sont « ce que fait le sol » (Calvaruso et al., 2020), que celles-ci soient essentiellement écologiques (Blanchart et Trap, 2020) ou couvrent également des processus non biologiques (Calvaruso et al., 2020). Généralement, les fonctions des sols existent indépendamment d'un bénéfice pour l'Homme (Eglin et al., 2021). Plusieurs fonctions essentielles du sol, et certaines de ses propriétés physico-chimiques (régulation du cycle hydrique, évolution de la MO, structuration et flux d'énergie) dépendent de l'action des êtres vivants (Gobat et al., 2010).

En principe les organismes de sol comprennent des bactéries, des champignons, des algues, les parties souterraines des plantes ainsi que des animaux très variés allant des protozoaires jusqu'aux mammifères (Le Roy et al., 2020).

Le sol joue plusieurs fonctions comme : support de production, support du paysage, source de matériaux, mémoire du passé, filtration et épuration, régulation des eaux et des cycles du carbone, réservoirs de biodiversité, régulation des gaz à effet de serre (GES) (Bellec et al., 2015).

### **3. Fonctionnement biologique du sol**

Les organismes vivants du sol jouent un rôle fondamental dans son fonctionnement biologique et plus largement dans certains services qui peuvent intéresser les productions agricoles (Cannavacciuolo et al., 2017).

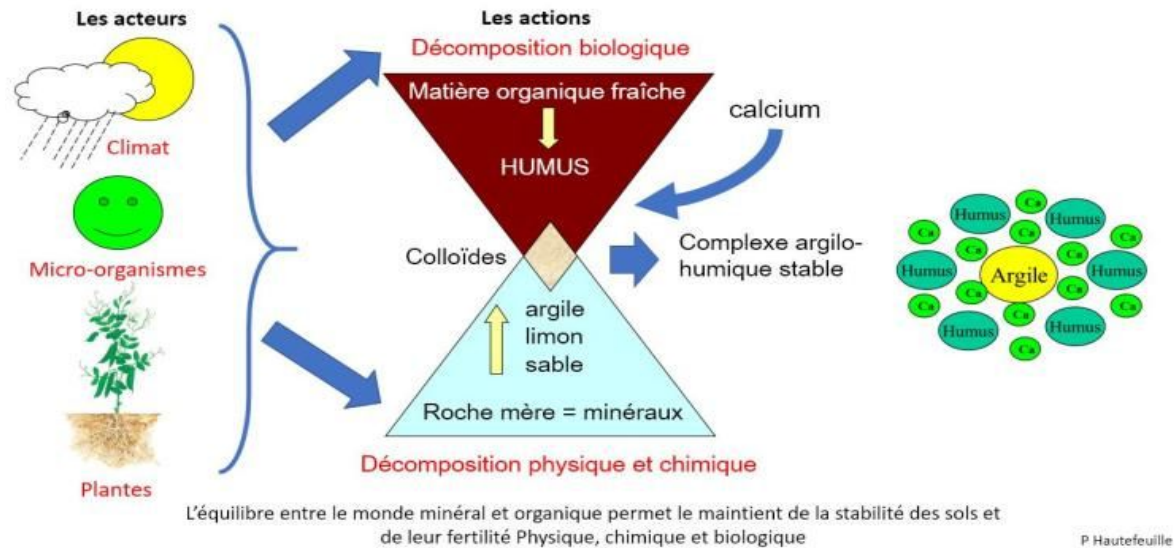
Les microorganismes sont les organismes les plus divers d'un point de vue taxonomique et fonctionnel (Bouchez et al., 2016). Ils peuvent augmenter la concentration en éléments métalliques et non-métalliques pour les rendre disponibles pour les racines (Uroz et al., 2015) ce qui les rendent des acteurs clés dans la plupart des cycles biogéochimiques (Cannavacciuolo et al., 2017). Ce sont eux les responsables de la minéralisation et qui donnent à des éléments essentiels (azote, phosphore, soufre, fer) leur forme assimilable par les plantes (Vanhove et Bertin, 2018).

Les macro-organismes sont considérés comme des ingénieurs de l'écosystème qui vont conditionner le biotope des autres organismes de la faune et microorganismes, modifiant ainsi les cycles biogéochimiques (Barot et al., 2007) (Fig. 3).

### **4. L'importance de sol dans l'écosystème**

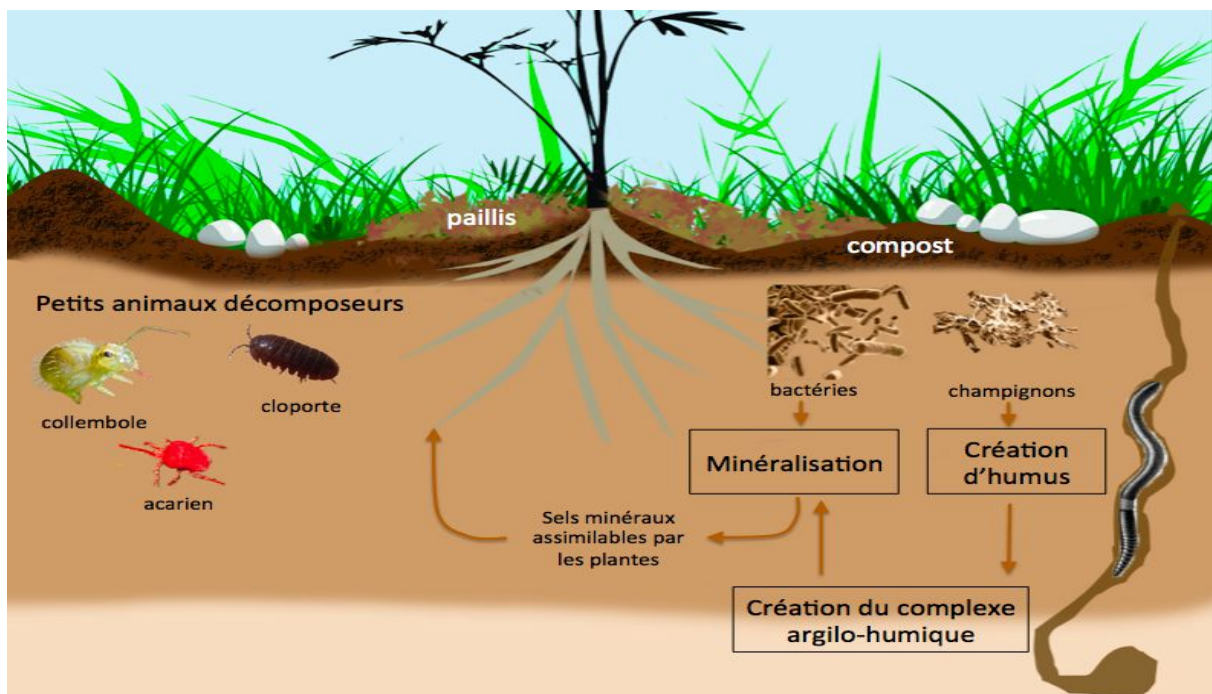
Les sols fournissent et régulent un grand nombre de services écosystémiques et jouent un rôle important dans le maintien de l'humanité (Blanchart et al., 2019). Il est le siège des grands cycles biogéochimiques des éléments constitutifs de la matière vivante (Girard et al., 2011).

## Le sol: union de la matière minérale et organique



**Figure 2.** La fraction minérale et organique du sol (Hautefeuille, 2017)

Les avantages que nous recevons des sols sont directement ou indirectement liés à l'air pur, à l'eau et à la production alimentaire, entre autres, et sont essentiels à la réduction de la pauvreté et à l'atténuation du changement climatique (Pereira, et al., 2018). La matière organique du sol participe à en faire un milieu vivant et dynamique (Le Roy et al., 2020).



**Figure 3.** Rôles de la faune du sol (<https://svtlyceedevenne.com/seconde/enjeux-contemporains/caracteristiques-des-sols-et-production-de-biomasse/>)

# *Matériel et méthodes*

## **Matériel et Méthodes**

### **1. Prélèvement des échantillons**

Afin d'évaluer les impacts de l'irrigation avec les deux types des eaux usées brutes et traitées, sur la qualité chimique et biologique du sol, nous avons cherché des sites soumis à ces pratiques, malheureusement nous n'avons pas trouvé des sites irrigués avec les deux types d'eau dans un même endroit. Nos investigations nous ont guidés à : i) un site irrigué avec les eaux usées traitées proche à la station d'épuration de la ville Ain Beida (wilaya Oum El Bouaghi) où le sol est irrigué avec les eaux traitées par la STEP, ii) un site irrigué avec les eaux usées brutes au niveau de la ville de El Hamma (wilaya de Khenchela) où le sol est irrigué par les eaux usées brutes de la ville clandestinement. Le prélèvement des échantillons a été effectué le mois de février.

Dans chaque site nous avons prélevé trois échantillons de sol à partir de l'horizon anthropique à une profondeur de 30 cm, ensuite ces trois échantillons sont mélangés pour prélever un seul échantillon représentatif de 500g, de plus dans chaque site nous avons prélevé un échantillon témoin représentatif de 500g à partir d'une parcelle non irriguée juste à côté. Les données des deux sites sont récapitulées dans le tableau (1).

Après le prélèvement des échantillons, les sols sont séchés sur un papier à l'air libre ensuite tamisé à un tamis de 2mm pour réaliser les analyses chimiques et biologiques.

### **2. Analyses des paramètres chimiques de sol**

#### **2.1. Le pH de sol**

20g de sol ont été agités dans 50ml d'eau distillée durant 30 minutes, la lecture du pH est faite directement sur la solution en utilisant un pH-mètre.

#### **2.2. La conductivité électrique du sol (CE)**

10 g de sol ont été agités dans 50 ml d'eau distillée durant 1h et 30 minutes, ensuite la conductivité est déterminée à l'aide de conductimètre.

#### **2.3. La matière organique du sol (MO)**

La matière organique est calculée à partir du carbone analysé par la méthode de Walkley-Black citée par **Pielain et Mathieu (2003)**, la MO est dosée avant et après l'incubation.

**Tableau 1.** Caractéristiques des deux sites irrigués avec les eaux usées brutes et traitées

	<b>Site irrigué avec les eaux usées brutes</b>	<b>Site irrigué avec les eaux traitées</b>
<b>Situation géographique</b>	Ville El Hamma, wilaya Khenchela	Ville Ain Beida, wilaya Oum El Bouaghi
<b>Cordonnées</b>	35.4775 N 7.0769 E. Sol irrigué (EUB) 35.4775 N 7.074722 E. Sol témoin (TEUB)	35,788443 N 7,336197 E. Sol irrigué (EUT) 35,787424N 7,336197 E. Sol témoin (TEUT)
<b>Climat</b>	Semi aride	Semi aride
<b>Culture</b>	Sol non cultivé, la culture précédente est une céréale	Orge

#### 2.4. L'azote du sol

Le N Kjeldahl total (NKT) a été déterminé par la méthode Kjeldahl.

#### 2.5. Le phosphore assimilable ( $P_2O_5$ )

Le phosphore assimilable a été dosé par la méthode de Joret Herbert

### 3. La respiration des sols

Le taux de la respiration basale a été déterminé par incubation de 25 g de sol à deux tiers de leur capacité aux champs dans une étuve à 28 °C avec deux bécher l'un contient 30 ml de l'eau distillée e le seconde contient 30 ml de NaOH. Le CO<sub>2</sub> dégagé est mesuré par titration de la solution de NaOH incubé avec l'HCl en présence de phénolphtaléine et chlorure de baryum au cours des jours suivant : j3, j7, j11, j14, j21 et j28.



**Figure 4.** Photo satellitaire du site irrigué avec les eaux usées traitées (EUT : site de prélèvement de sol irrigué avec les eaux usées traitées, TEUT témoin du sol irrigué avec les eaux usées traitées (google earth))



**Figure 5.** Photo satellitaire du site irrigué avec les eaux usées brutes EUB : site de prélèvement de sol irrigué avec les eaux usées brutes, TEUB témoin du sol irrigué avec les eaux usées brutes (google earth)



**Figure 6.** Photos de quelques étapes d'analyse des paramètres de sol analysées

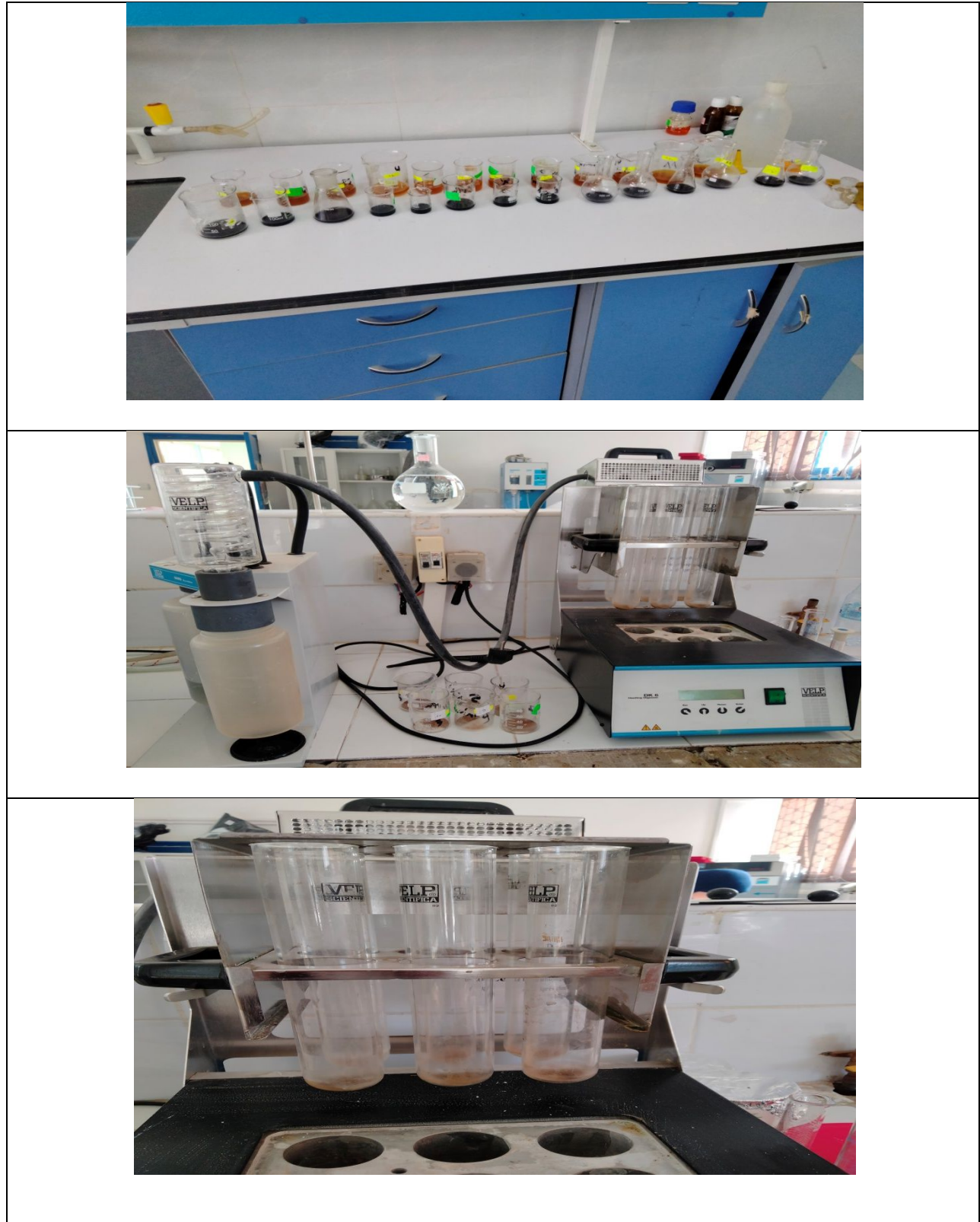
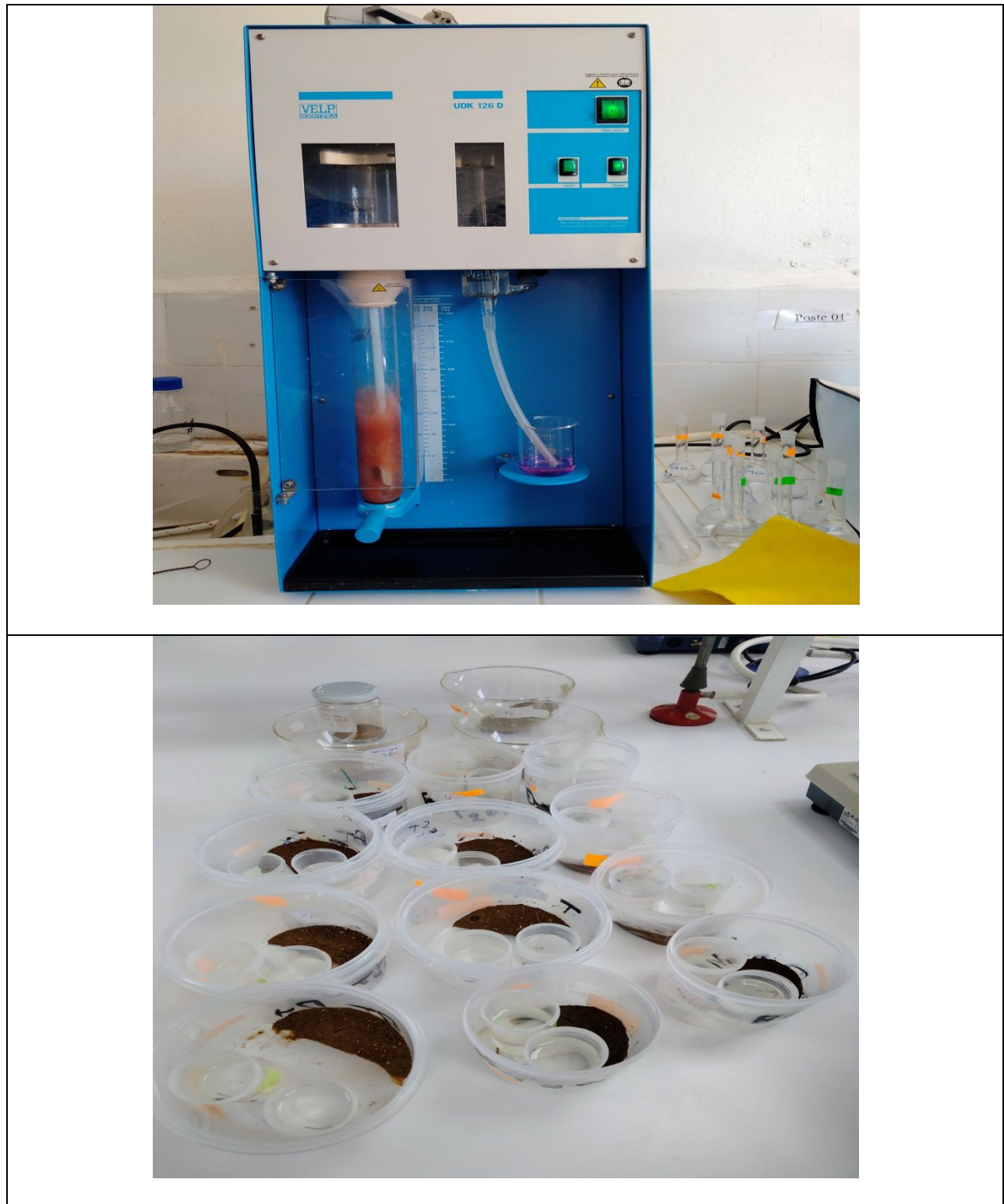


Figure 7. Photos de quelques étapes d'analyse des paramètres de sol analysées (suit)



**Figure 8.** Photos de quelques étapes d'analyse des paramètres de sol analysées (suit)

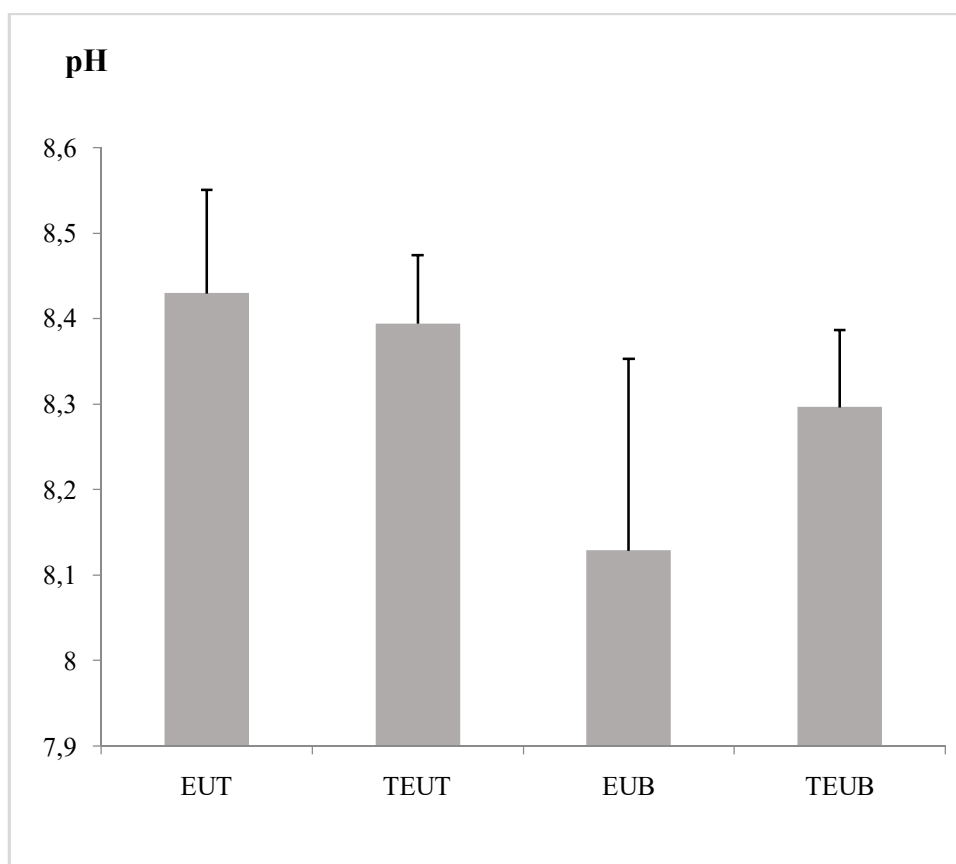
# *Résultats et discussion*

### 3. Résultats

#### 3.1. Caractéristique chimiques des sols

##### 3.1.1. Le pH

La figure (9) montre que les valeurs moyennes du pH des sols irrigués par les deux types d'eaux et leurs témoins oscillent entre 8.43 et 8.12. D'après cette figure, l'irrigation avec les eaux traitées a fait augmenter légèrement le pH ( $\text{pH EUT}=8.43\pm 0.12$ ,  $\text{pH TEUT}=8.39\pm 0.08$ ), alors que pour les sols irrigués avec les eaux usées brutes le pH est plus faible dans les sols irrigués avec les eaux brutes par rapport au témoin ( $\text{pH EUB}=8.12\pm 0.22$ ,  $\text{pH TEUB}=8.29\pm 0.09$ ).

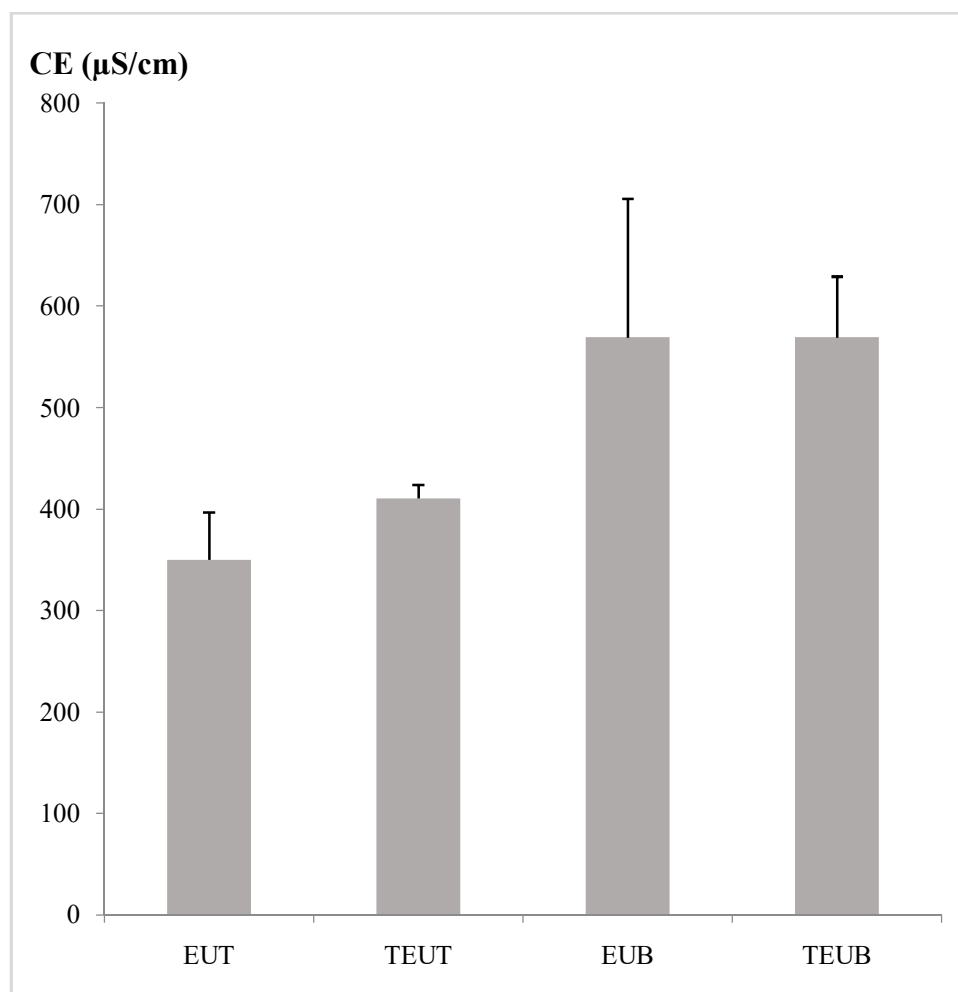


**Figure 9.** Valeurs de pH de sol mesuré dans les 4 types de sols (EUT : sol irrigué avec les eaux usées traitées, TEUT : sol témoin non irrigué avec les eaux usées traitées, EUB : sol irrigué avec les eaux usées brutes, TEUB sol témoin non irrigué avec les eaux usées brutes).

### 3.1.2. La conductivité électrique (CE)

Les résultats de la mesure de la CE qui figurent dans la figure (10) révèlent que la valeur moyenne de la CE des sols irrigués avec les eaux traitées est plus faible que celle des sols témoins (CE EUT= 349.66±47 mS/cm, CE TEUT= 410.33±13.6 mS/cm).

Concernant les sols irrigués avec les eaux usées brutes, aucune différence n'a été révélée (CE EUB= 569 ±136.49 mS/cm, CE TEUB= 569.33±60.02 mS/cm).

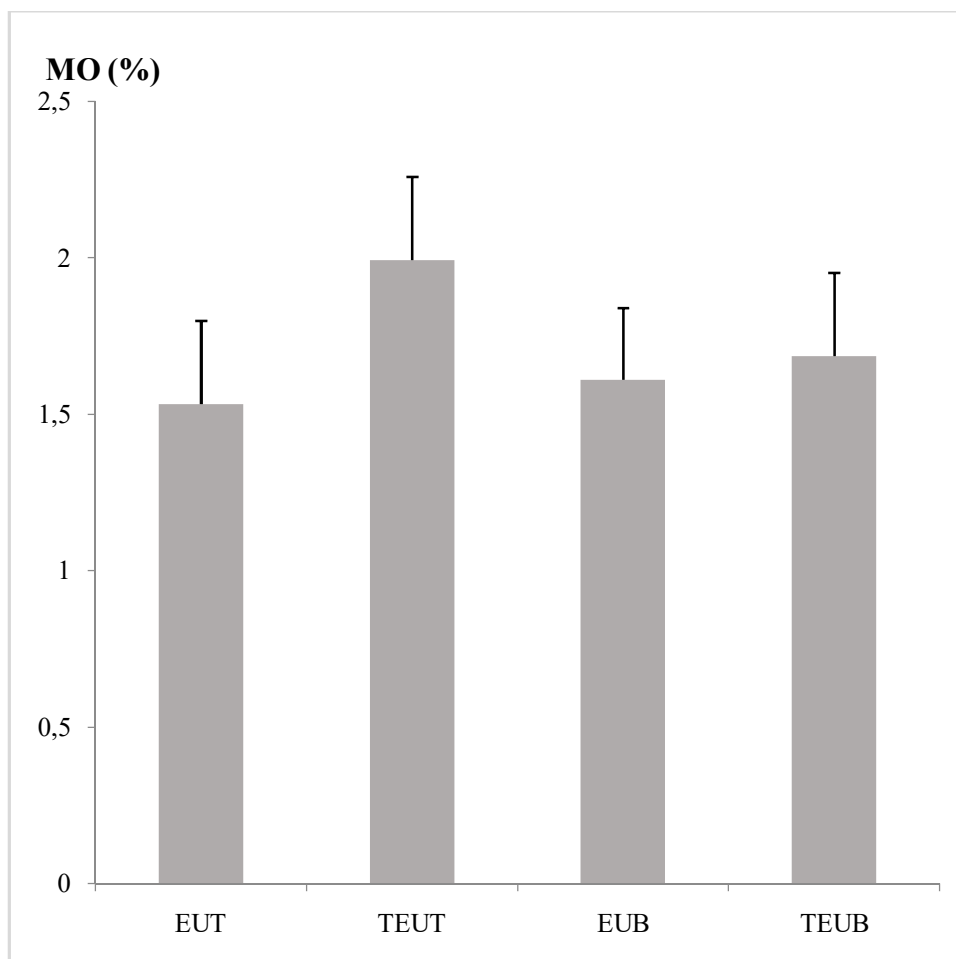


**Figure 10.** Valeurs de la CE de sol mesuré dans les 4 types de sols (EUT : sol irrigué avec les eaux usées traitées, TEUT : sol témoin non irrigué avec les eaux usées traitées, EUB : sol irrigué avec les eaux usées brutes, TEUB sol témoin non irrigué avec les eaux usées brutes).

### 3.1.3. La matière organique (MO)

La valeur moyenne de la teneur de la MO la plus élevée est enregistrée dans le sol témoin du site irrigué avec les eaux usées traitées (MO=  $1.99 \pm 0.26$  %) ce qui indique que l'irrigation avec les eaux traitées n'a aucun effet sur l'amélioration des teneurs de la MO dans ce site.

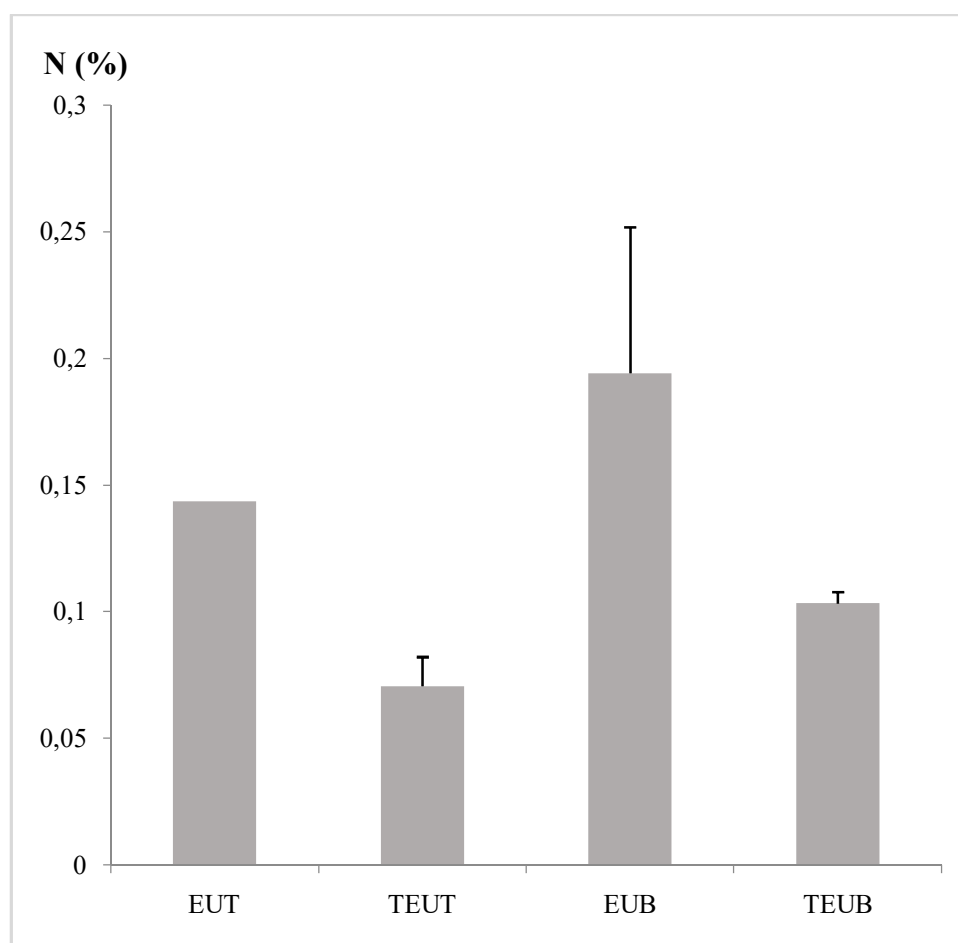
Quant au sol irrigué avec les eaux usées brutes, leurs valeurs des teneurs moyennes de la MO du sol irrigué et sol témoin sont très proches les unes des autres (MO EUB=  $1.60 \pm 0.22$  % et MO TEUB=  $1.68 \pm 0.26$  %) (Fig. 11).



**Figure 11.** Valeurs de la MO de sol mesuré dans les 4 types de sols (EUT : sol irrigué avec les eaux usées traitées, TEUT : sol témoin non irrigué avec les eaux usées traitées, EUB : sol irrigué avec les eaux usées brutes, TEUB sol témoin non irrigué avec les eaux usées brutes).

### 3.1.4. L'azote

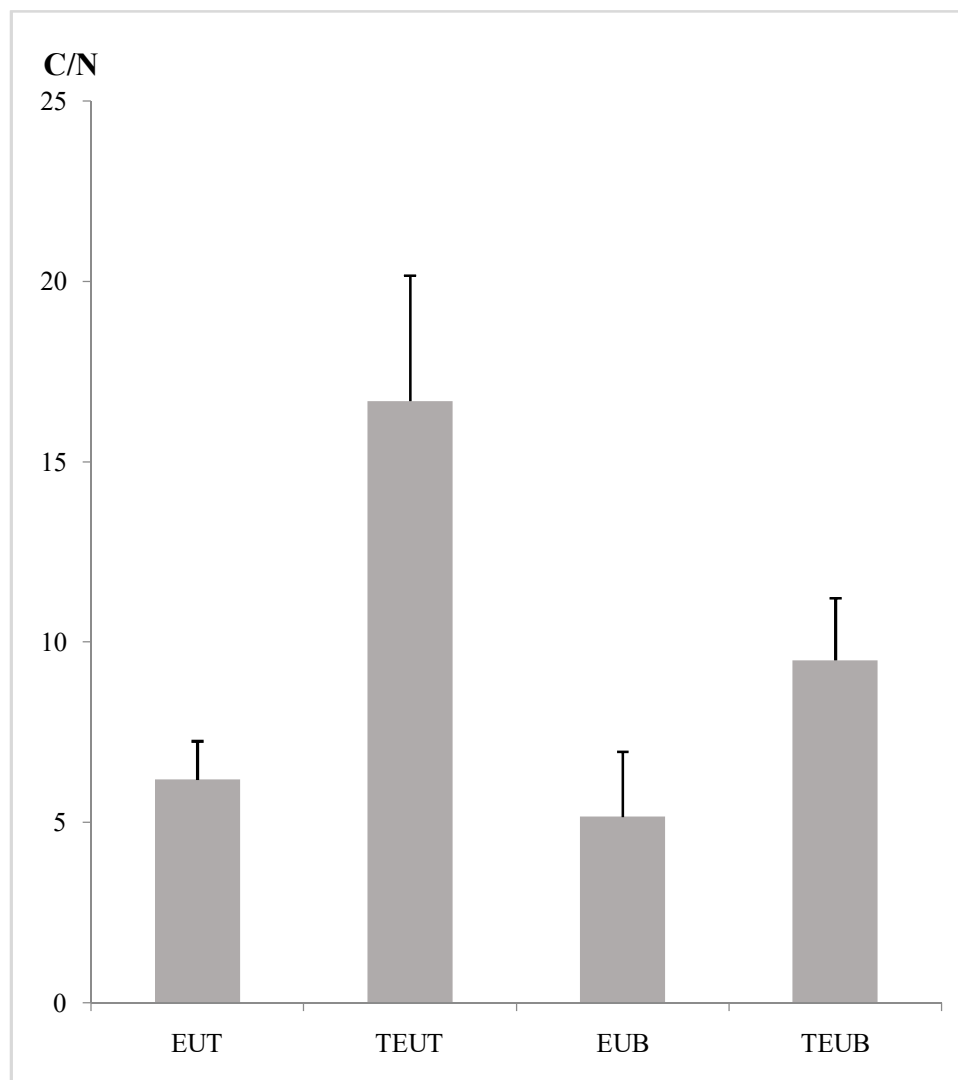
Les résultats de l'analyse de l'azote de sol sont illustrés dans la figure (12). Cette figure révèle que l'irrigation avec les eaux usées traitées et brutes a fait augmenter les teneurs en azote totale de sol. Pour le site irrigué avec les eaux usées traitées, nous remarquons que nous avons enregistré une valeur de l'azote totale double dans les sols irrigués avec ces eaux par rapport au sol témoin ( $0.14 \pm 0$  % et  $0.07 \pm 0,01$  % respectivement). La valeur moyenne de l'azote totale enregistrée pour le site irrigué avec les eaux usées brutes est la plus élevée ( $0,19 \pm 0,05$  %) ce qui indique que l'irrigation avec les eaux usées brutes impact positivement la teneur en azote dans le sol.



**Figure 12.** Valeurs de l'azote de sol mesuré dans les 4 types de sols (EUT : sol irrigué avec les eaux usées traitées, TEUT : sol témoin non irrigué avec les eaux usées traitées, EUB : sol irrigué avec les eaux usées brutes, TEUB sol témoin non irrigué avec les eaux usées brutes).

### 3.1.5. Le rapport carbone sur azote (C/N)

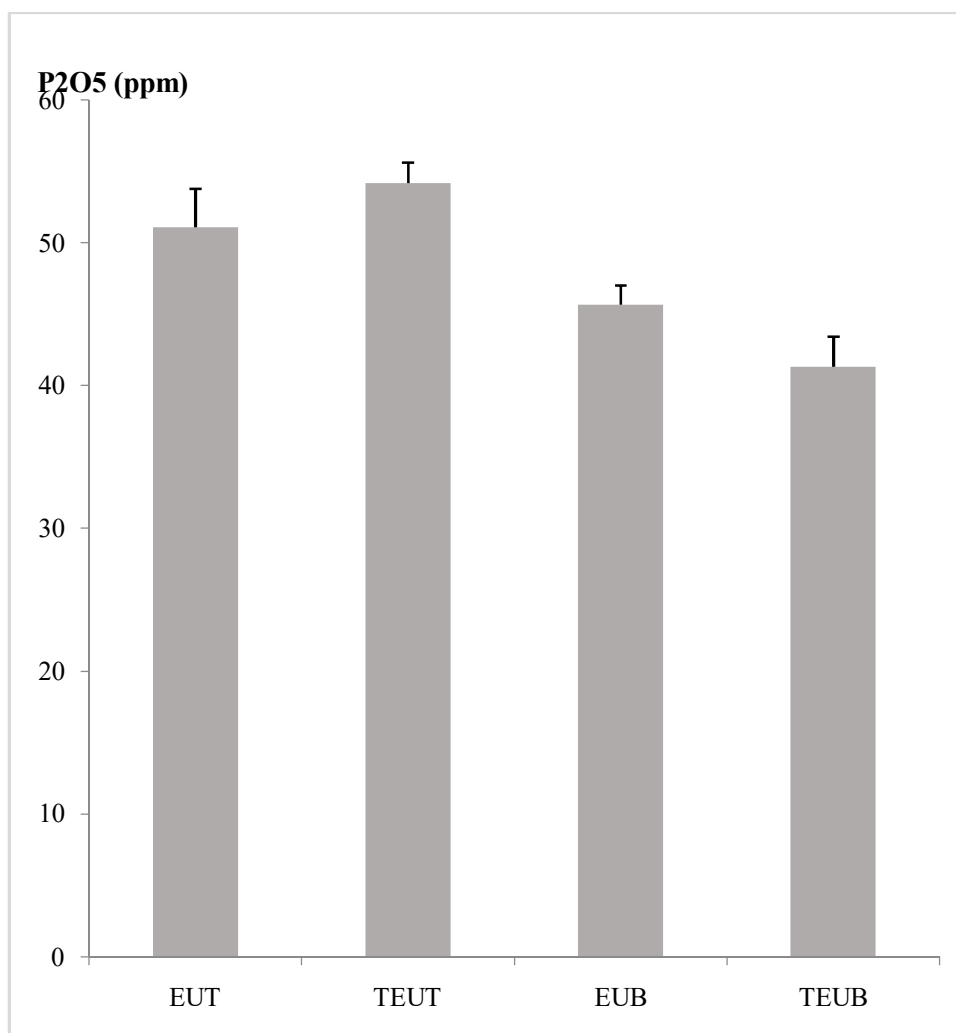
Les résultats du rapport C/N qui est un indicateur important de la dégradation de la matière organique, sont représentés dans la figure (13). Cette dernière révèle que dans les deux sites les sols témoins sont caractérisés par des rapports C/N plus élevés que les sols irrigués avec les eaux usées traitées et brutes ( $6.18 \pm 1.07$ ,  $16.68 \pm 3.48$ ,  $5.16 \pm 1.80$  et  $9.49 \pm 1.72$  respectivement pour EUT, TEUT, EUB et TEUB).



**Figure 13.** Valeurs Du rapport C/N dans les 4 types de sols (EUT : sol irrigué avec les eaux usées traitées, TEUT : sol témoin non irrigué avec les eaux usées traitées, EUB : sol irrigué avec les eaux usées brutes, TEUB sol témoin non irrigué avec les eaux usées brutes).

### 3.1.6. Le phosphore assimilable ( $P_2O_5$ )

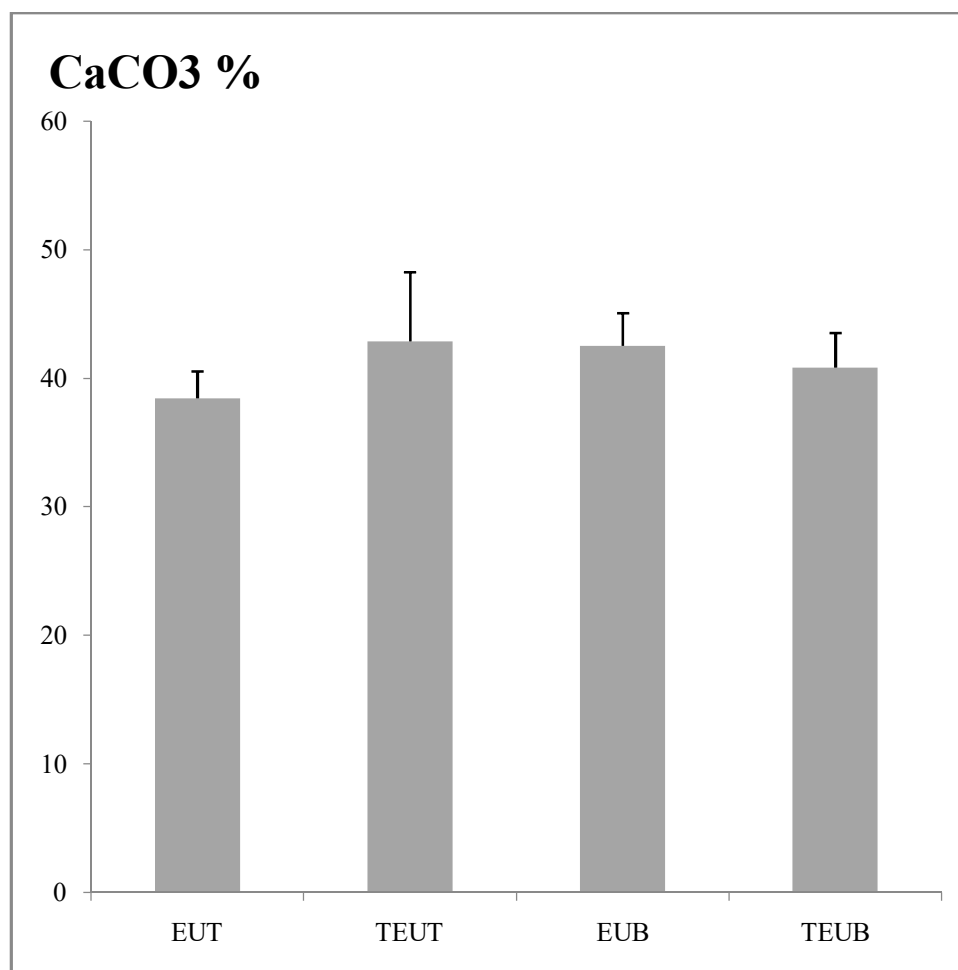
Les résultats de la Figure (14) révèlent que la valeur moyenne de  $P_2O_5$  de sol irrigué avec les eaux usées traitées est  $51,10 \pm 2,68$  ppm et la valeur moyenne de  $P_2O_5$  enregistré pour le sol témoin est  $54,19 \pm 1,43$  ppm. Concernant le site irrigué avec les eaux usées brutes, nous remarquons une légère élévation de teneurs en  $P_2O_5$  par rapport au témoin ; la valeur de  $P_2O_5$  de sol irrigué avec les eaux usées brutes est  $45,66 \pm 1,33$  ppm et la valeur moyenne de sol témoin non irrigué avec les eaux usées brute est  $41,29 \pm 2,13$  ppm.



**Figure 14.** Valeurs de  $P_2O_5$  de sol mesuré dans les 4 types de sols (EUT : sol irrigué avec les eaux usées traitées, TEUT : sol témoin non irrigué avec les eaux usées traitées, EUB : sol irrigué avec les eaux usées brutes, TEUB sol témoin non irrigué avec les eaux usées brutes).

### 3.1.7. Le calcaire total (CaCO<sub>3</sub>)

D'après les résultats obtenus de la mesure du calcaire total CaCO<sub>3</sub> représentés sur la figure (15), la teneur en calcaire total est très élevée pour les quatre sites. Le sol du site irrigué avec les eaux traitées a présenté les valeurs les plus faibles, avec une moyenne de  $38.43 \pm 2.12$  %, alors que le sol témoin a enregistré la moyenne la plus élevée ( $42.85 \pm 5.39\%$ ). Pour le sol du site irrigué avec les eaux usées brutes nous avons enregistré une moyenne de  $42,51 \pm 2.56$  %, alors que le sol témoin la moyenne moins faible ( $40,81 \pm 2.69$ ).



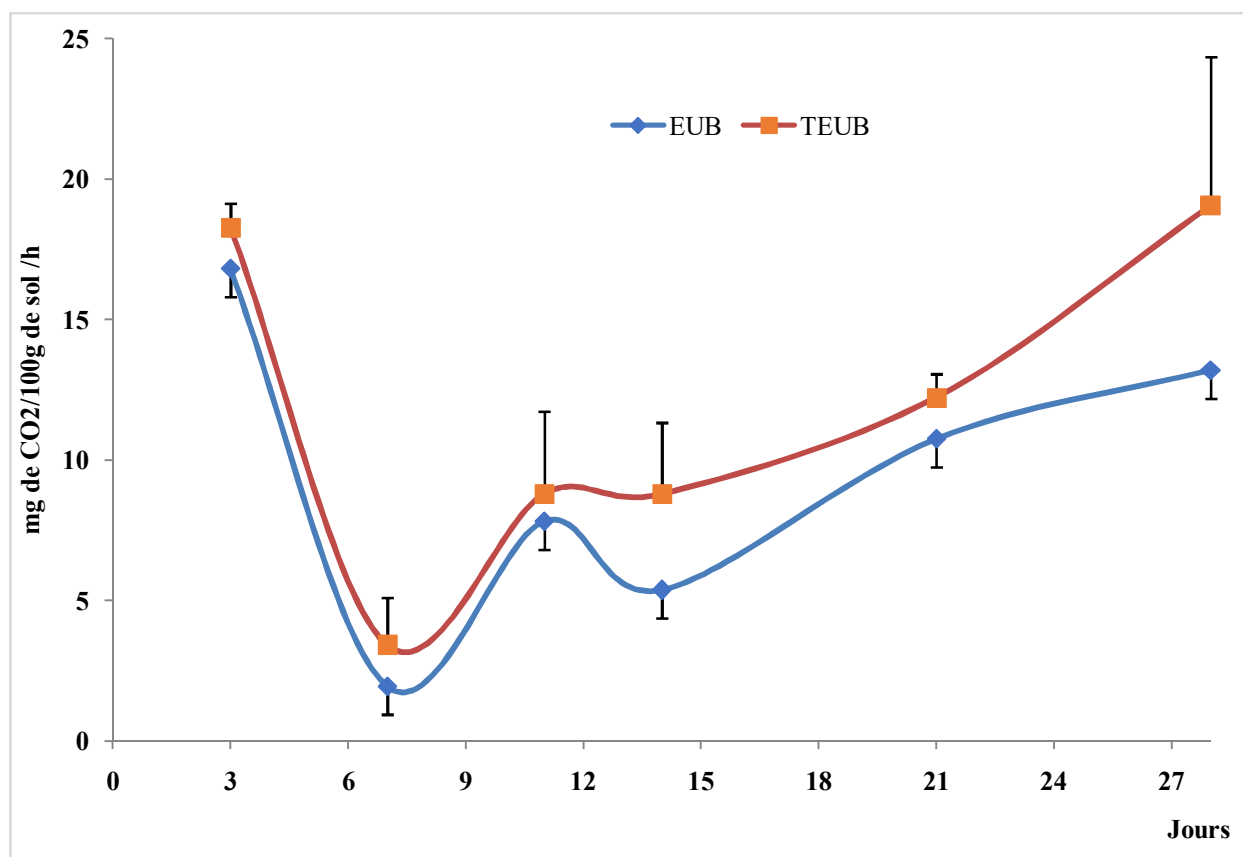
**Figure 15.** Valeurs de CaCO<sub>3</sub> de sol mesuré dans les 4 types de sols (EUT : sol irrigué avec les eaux usées traitées, TEUT : sol témoin non irrigué avec les eaux usées traitées, EUB : sol irrigué avec les eaux usées brutes, TEUB sol témoin non irrigué avec les eaux usées brutes).

### 3.2. Caractéristiques biologiques du sol

#### 3.2.1. La respiration basale des sols

##### 3.2.1.1. Les sols irrigués avec les eaux usées brutes

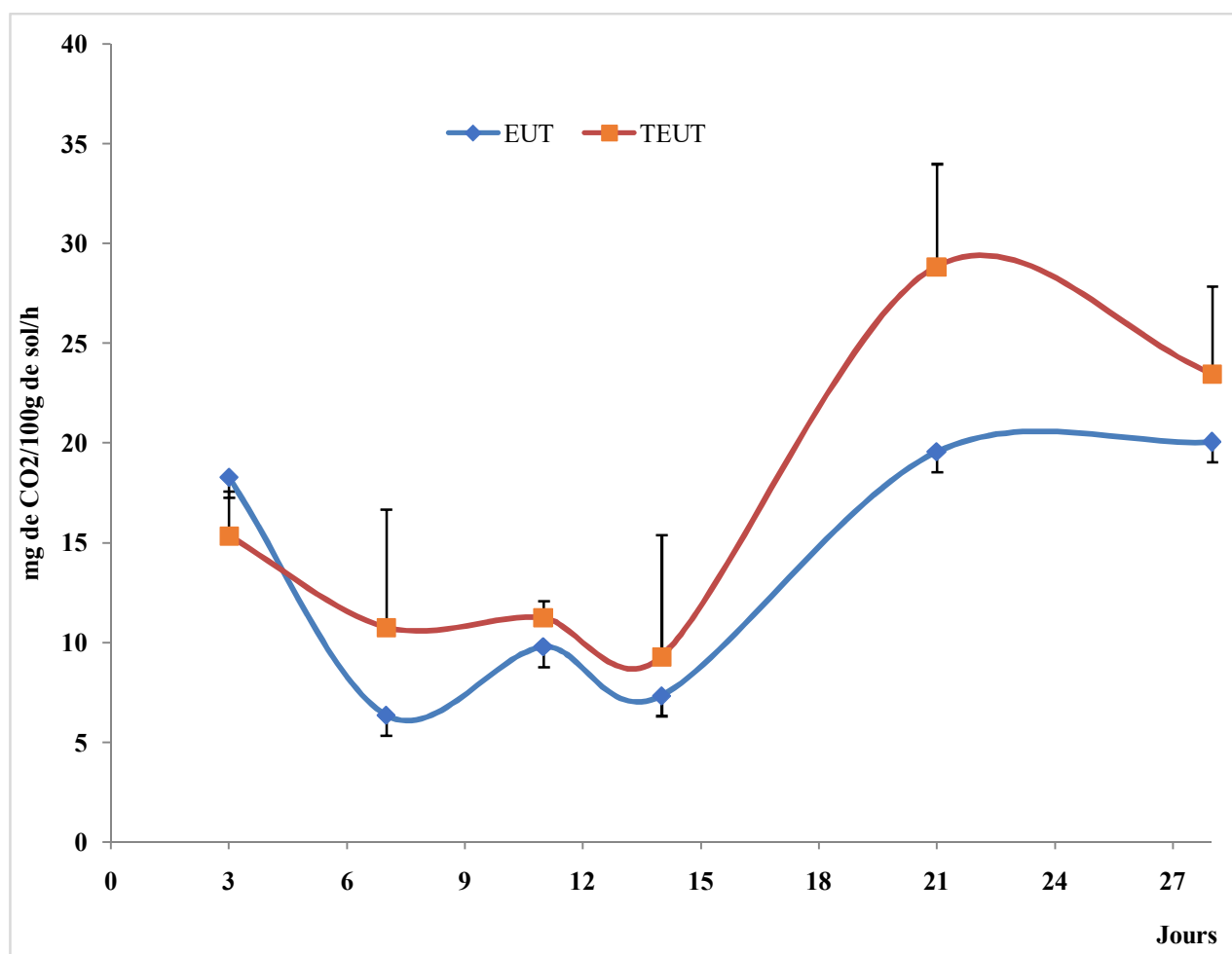
La valeur moyenne la plus élevée de CO<sub>2</sub> de sol irrigué avec les eaux usées brute (16,81±1,69 mg de CO<sub>2</sub>/100g de sol/h) est remarquée pendant le 3<sup>ème</sup> jour, et la valeur la plus basse (1,95±0,84 mg de CO<sub>2</sub>/100g de sol/h) est notée dans au 7<sup>ème</sup> jour. Concernant le témoin (TEUB) la valeur de CO<sub>2</sub> la plus élevée a été enregistrée au 28<sup>ème</sup> jour (19,06±5,28 mg de CO<sub>2</sub>/100g de sol/h) et la valeur la plus base a été enregistrée au 7<sup>ème</sup> jour avec une valeur moyenne de 3.42±1.69 mg de CO<sub>2</sub>/100g de sol/h (Figure 16).



**Figure 16.** Courbe de la respiration du sol irrigué avec les eaux usées brutes (EUB) avec le témoin (TEUB)

### 3.2.1.2. Les sols irrigués avec les eaux usées traitées

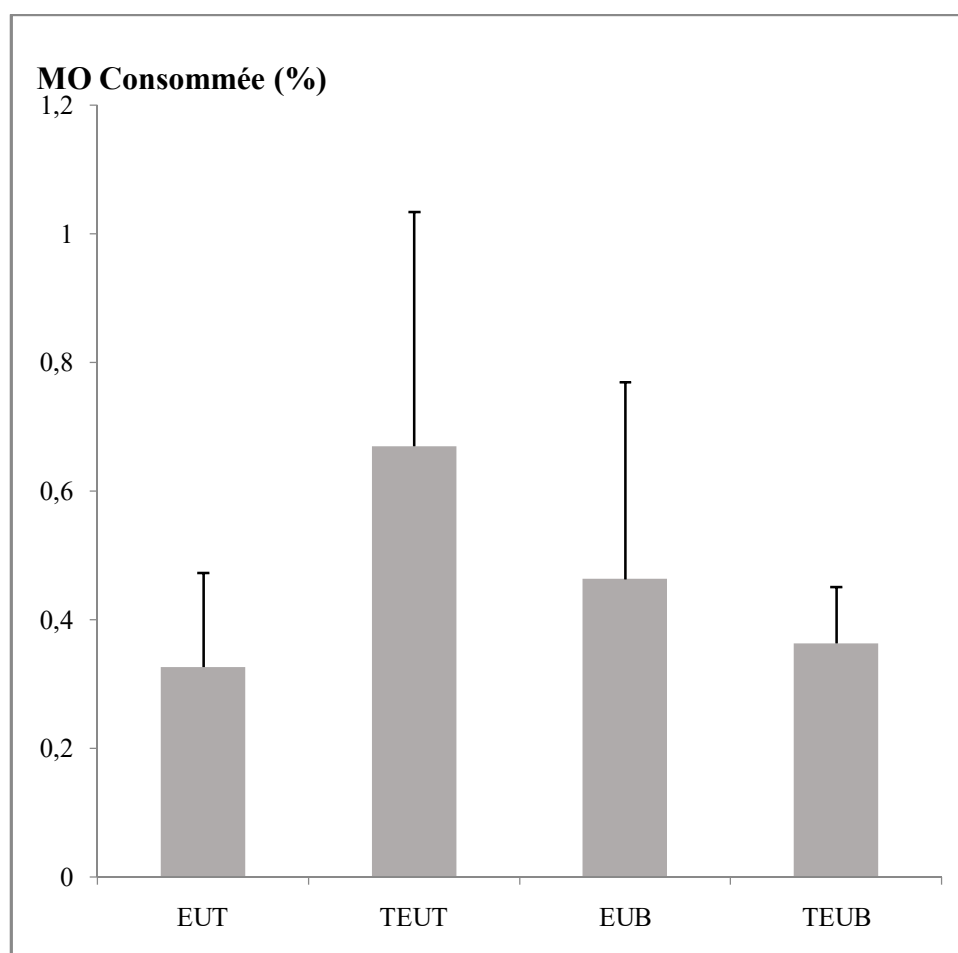
La figure (17) illustre la courbe de la respiration du sol irrigué avec les eaux usées traitées (EUT) avec le témoin (TEUT). La valeur la plus élevée de CO<sub>2</sub> de sol irrigué avec les eaux usées traitées est enregistrée en 28<sup>ème</sup> jour avec une moyenne de 20.04±4,23 mg de CO<sub>2</sub>/100g de sol/h alors que la plus faible est enregistrée pendant le 7<sup>ème</sup> jour avec une moyenne 6.35±1.69. Pour le témoin (TEUT), la valeur la plus élevée de CO<sub>2</sub> dégagé a été enregistrée durant le 21<sup>ème</sup> jour avec une moyenne de 28.84±5.15 mg de CO<sub>2</sub>/100g de sol/h tandis que la valeur la plus faible de CO<sub>2</sub> est enregistrée le 14<sup>ème</sup> jour avec une moyenne 9.28±6.10 mg de CO<sub>2</sub>/100g de sol/h.



**Figure 17.** Courbe de la respiration du sol irrigué avec les eaux usées traitées (EUT) avec le témoin (TEUT)

### 3.2.2. La matière organique consommée après 28 jours d'incubation

Les valeurs de la MO consommées après 28 jours d'incubation dans les 4 types de sol sont figurées dans la figure (18). A travers cette figure, nous remarquons que la teneur en MO dans le sol témoin du site irrigué avec des eaux usées traitées est la plus élevée après incubation de 28 jours avec une moyenne de  $0.67 \pm 0.30$  % et la valeur minimale a été enregistrée dans le sol irrigué avec de l'eau usée traitée avec une moyenne de  $0.32 \pm 0.14$  %; tandis que la valeur moyenne de la MO dans le sol irrigué avec de l'eau usée brute était  $0.46 \pm 0.30$  % et le sol témoin non irrigué avec de l'eau usée brute (TEUB) la valeur moyenne égale à  $0.36 \pm 0.08$  %.



**Figure 18.** Valeurs de la MO consommée après 28 jours d'incubation dans les 4 types de sols (EUT : sol irrigué avec les eaux usées traitées, TEUT : sol témoin non irrigué avec les eaux usées traitées, EUB : sol irrigué avec les eaux usées brutes, TEUB sol témoin non irrigué avec les eaux usées brutes).

#### **4. Discussion**

La comparaison entre les indicateurs chimiques et biologiques du sol dans les sols des sites irrigués par les eaux usées brutes et traitées et ceux des témoins a montré des différences et des similitudes pour les paramètres mesurés.

Le pH de sol mesuré dans les 4 types de sols (EUT, TEUT, EUB et TEUB) révèlent que les résultats des moyennes du pH (8.43, 8.39, 8.12 et 8.29 respectivement) est basique. Cette alcalinité lié à la présence de calcium dans ces sols sous forme de carbonate de calcium (**Song et al., 2022**). Nous remarquons que les valeurs moyennes de pH des sols irrigués avec les eaux usées brutes et traitées et leur témoin ne présentent pas de différences remarquables, cela indique que l'irrigation avec les deux types d'eaux usées brutes et traités n'ont pas des effets important sur le pH de sol dans cette étude. **Khelif, (2018)** a signalé que l'irrigation avec les eaux usées a entraîné une augmentation très significative de pH de sol.

La conductivité électrique du sol est une propriété importante qui est souvent étudiée en sciences environnementales et agricoles (**Norris et al., 2020**). Une des raisons pour lesquelles la conductivité électrique du sol est importante est qu'elle peut être utilisée pour évaluer la qualité du sol et la santé des écosystèmes (**Yeilagi et al., 2021**). Elle est généralement utilisée pour mesurer la salinité du sol (**Corwin, 2021**). A travers nos résultats, nous remarquons que la valeur de la conductivité électrique du sol irrigué avec des eaux usées et du sol témoin est la même, ce qui signifie que les eaux usées n'ont pas affecté la conductivité de ce sol, tandis que l'eau traitée a affecté le sol, car elle a causé une légère variation de la valeur de la conductivité électrique (349.66 $\mu$ S/cm) par rapport au sol témoin (410.33 $\mu$ S/cm) Comme cette eau a affecté la diminution de la salinité du sol (EUT). Les résultats de l'étude de **Khelif, (2018)** indiquent que les valeurs de la conductivité électrique sont relativement, plus élevées dans les sols des parcelles irriguées avec les eaux usées (entre 0.39 et 0.69 dS/m) que dans le sol témoin non irrigué avec ces eaux (entre 0.21 et 0.22dS/m) et que l'augmentation des concentrations de la salinité est due à la qualité des eaux usées chargées en sels solubles ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  ...), qui sont retenus par le sol.

La matière organique du sol est une composante cruciale d'un sol sain et joue un rôle essentiel dans la croissance et le développement des plantes (**Pahalvi et al., 2021**). Elle contribue à

-----  
améliorer la structure du sol, la rétention d'eau et la disponibilité des nutriments (**Funderburg, 2020**) ainsi que la fertilité du sol (**Huang et al., 2021**). Les résultats obtenus par **Khelif, (2018)** et **Tamrabet (2011)** ont dévoilé une augmentation très hautement significative de la teneur en matière organique dans les sols des parcelles irriguées avec les eaux usées brutes, ce qui n'est pas en accord avec nos résultats.

L'azote du sol est un élément nutritif très important, dont les plantes ont besoin pour leur croissance et leur développement (**Dimkpa et al., 2020**), **il est essentiel** à la santé des écosystèmes du sol (**Timmis et Ramos, 2021**). Le pourcentage d'azote dans le sol irrigué avec des eaux usées et de l'eau traitée est élevé par rapport à ses témoins, ce qui signifie que la pratique de l'irrigation avec ces eaux a amélioré la teneur de ces sols en azote, cela est dû à la richesse des eaux usées brutes et traitées en azote. Nos résultats concordent avec ceux de **Khelif, (2018)** qui a rapporté que, l'irrigation par les eaux usées brutes entraîne une augmentation des teneurs d'azote total, par rapport au sol témoin.

Le rapport carbone sur azote est un indicateur de la capacité d'un produit organique à se décomposer. Lorsqu'une plante ou amendement organique est déposé au sol, il est dégradé par les micro-organismes (**Milkereit et al., 2021**). Le rapport C/N est un indicateur biochimique simple de la qualité des matières organiques, de leur capacité de décomposition et leur potentiel de libération des éléments nutritifs (**Nicolardot & al., 2001**). Sa valeur indique si un substrat organique est facilement (rapidement) ou difficilement (lentement) décomposable ou pas (**Kabonekaet al., 2021**). Généralement, la minéralisation de l'azote contenu dans un substrat organique commence lorsque son rapport C/N est inférieur ou égal à 25 (**Johnson et al., 2007**). La diminution du rapport C/N du sol irrigué avec de l'eau usée (5.16) et du sol irrigué avec de l'eau traitée (6.18) par rapport aux témoins, indique l'apparition d'une minéralisation de l'azote dans le substrat organique et la décomposition des résidus organiques dans le sol est accompagnée de la conversion du C, de l'azote et d'autres éléments nutritifs en tissus microbiens et dans ce processus, une portion du C est dissipée sous forme de CO<sub>2</sub> accompagnée de changement du rapport C/N comme l'indiquent **Kaboneka et al. (2021)**.

Pour assurer une croissance saine et robuste des plantes, il est important de maintenir des niveaux suffisants de phosphore dans le sol (**Raymond et al., 2021**). Il est nécessaire de comprendre le cycle du phosphore dans le sol et les facteurs qui peuvent affecter sa disponibilité

-----  
pour les plantes afin de maximiser son utilisation dans les systèmes de culture (**Elhaissoufi et al., 2022**). D'après nos résultats, il est clair que les sols des deux sites, n'ont pas enregistré de variations importantes dans les valeurs moyennes du phosphore, puisque le sol irrigué avec de l'eau traitée a légèrement diminué sa valeur (51,10 ppm) après avoir été (54,19 ppm), et le sol irrigué avec de l'eau usée a légèrement augmenté sa valeur (45,66 ppm) après avoir été (41,29 ppm), ce qui indique un manque de phosphore dans cette eau. Nos résultats ne sont pas cohérents avec d'autres études. Les résultats des analyses des sols de l'étude de **Khelif (2018)** montrent une augmentation marquée des taux de phosphore assimilable dans les parcelles agricoles irriguées par les eaux usées brutes. De même **Tamrabet, (2011)**, a signalé que l'irrigation avec les eaux usées a un effet très marquant sur l'amélioration du phosphore de sol.

La respiration du sol est le processus par lequel les micro-organismes vivant dans le sol, tels que les bactéries et les champignons, décomposent la matière organique et libèrent du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dans l'atmosphère (**Sadatshojai et al., 2021**). La quantité de CO<sub>2</sub> libérée par la respiration du sol est influencée par plusieurs facteurs, dont la disponibilité de la matière organique (**Mobunda et al., 2020**). La compréhension de la respiration du sol est cruciale pour prédire comment les écosystèmes réagiront aux changements environnementaux, tels que le réchauffement climatique ou les changements d'utilisation des sols (**Pi et al., 2021**). Grâce aux deux courbes qui représentent la respiration du sol irrigué avec les deux types d'eaux, nous pouvons voir que le sol irrigué avec des eaux usées a un taux de libération de CO<sub>2</sub> en 28 jours inférieur aux pourcentages du sol non irrigué avec des eaux usées, et cette diminution est due au manque de matière organique dans ce sol (EUB) ou au manque d'organismes dans les eaux usées qui décomposent la matière organique et la libèrent sous forme de CO<sub>2</sub>.

Il en est de même pour le sol irrigué avec de l'eau traitée, où le pourcentage de CO<sub>2</sub> libéré par celui-ci est plus important le troisième jour seulement, puisque sa valeur est de 18,28 mg de CO<sub>2</sub>/100g de sol/h et celle du sol témoin de 15,35 mg de CO<sub>2</sub>/100g de sol/h, ce qui indique la présence d'organismes vivants et de matière organique le troisième jour du sol EUT en quantités significatives, et c'est ce qui a conduit à la libération d'une plus grande quantité de CO<sub>2</sub>. Mais dans les jours restants pour le sol (EUT), les résultats sont similaires pour le sol irrigué avec des eaux usées (EUB).

# *Conclusion*

## **Conclusion**

La réutilisation des eaux usées traitées ou brutes pour l'irrigation dans de nombreux pays surtout en sous développement est due à la pénurie d'eau. Les pays développés réutilisent également les eaux traitées pour faire face au problème de sécheresse.

Par conséquent, dans notre étude, nous avons examiné et utilisé des critères chimiques et biologiques de qualité du sol pour évaluer de manière critique l'impact de l'irrigation avec des eaux usées brutes et traitées.

Il a été constaté que l'irrigation avec les eaux usées traitées a diminué légèrement la conductivité électrique de sol, la matière organique, le phosphore assimilable ainsi que le calcaire total, alors qu'elle a fait augmenter la teneur en azote.

Concernant l'irrigation avec les eaux usées brutes elle a diminué le pH, la matière organique et a augmenté la teneur en azote, le calcaire et le phosphore assimilable.

Concernant la respiration de sol, les résultats ont montré que pour les sols des deux sites irrigués avec les eaux usées brutes et traitées, les flux de CO<sub>2</sub> étaient plus faibles que pour les sols témoins.

Une étude plus approfondie qui utilise d'autres paramètres de qualité de sol comme les métaux lourds, la porosité de sol, la conductivité hydraulique... ainsi que des prélèvements de sol dans plusieurs périodes de l'année (période sèche et période humide, avant et après irrigation), ainsi qu'une caractérisation complète des eaux d'irrigation reste nécessaire pour bien cerner l'impact de l'irrigation avec les eaux usées sur la qualité de sol.

Généralement, l'irrigation avec des eaux usées brutes devrait être évitée en raison de ses effets négatifs sur la santé des plantes et du sol, surtout dans le cas où ces eaux non traitées sont chargées en polluants toxiques et des microorganismes pathogènes, sauf après traitement dans des stations d'épuration des eaux usées et avec des rendements d'épuration élevés.

## *Références bibliographiques*

## Références bibliographiques

Abrahams, P. W. (2002). Soils: their implications to human health. *Science of the Total Environment*, 291(1-3), 1-32.

Ahmed, S. F., Mofijur, M., Parisa, T. A., Islam, N., Kusumo, F., Inayat, A., & Ong, H. C. (2022). Progress and challenges of contaminate removal from wastewater using microalgae biomass. *Chemosphere*, 286, 131656.

Al-Lahham, O., El Assi, N. M., & Fayyad, M. (2003). Impact of treated wastewater irrigation on quality attributes and contamination of tomato fruit. *Agricultural Water Management*, 61(1), 51-62.

Amiri K. 2020. Contribution à l'évaluation et au traitement des eaux usées dans le sud et du Sahara Algérien .Application au sud de la région d'oued righ (Touggourt) . Thèse de Doctorat d'état, Université Kasdi Merbah Ouargla, pp80-84.

Amiri, K., Bekkari, N., Débbakh, A., Benmalek, A., & Bouchahm, N. (2017). Caractérisation des eaux usées des rejets domestiques de la ville de Touggourt (Algérie). *J. Algér. Rég. Arid*, 14, 104-108.

Anku, W. W., Mamo, M. A., & Govender, P. P. (2017). Phenolic compounds in water: sources, reactivity, toxicity and treatment methods. *Phenolic compounds-natural sources, importance and applications*, 419-443.

Antoni, V., Arrouays, D., Bispo, A., Brossard, M., Le Bas, C., Stengel, P., ... & Walter, C. (2011). L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols.

Arbaoui, S., & Ouaggad, N. (2020). Etat des lieux sur la réutilisation des eaux usées urbaines traitées de la station d'épuration de Touggourt (Mémoire présenté en vue de L'obtention du diplôme de master, Université Kasdi Merbah-Ouargla).

Asiwal, R. S., Sar, S. K., Singh, S., & Sahu, M. (2016). Wastewater treatment by effluent treatment plants. *SSRG Int. J. Civil Eng.*, 3, 12.

Atinkpahoun, C. N., Soclo, H. H., Pons, M. N., & Leclerc, J. P. (2018). Physico-chemical characterization of domestic wastewaters in the " Vie-Nouvelle" agglomeration, Cotonou, Benin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 12(1), 542-557.

Bachi, O. E. K. (2010). Mémoire présenté en vue de L'obtention du diplôme de magister thème diagnostique sur la valorisation de quelques plantes du jardin d'épuration de station du vieux ksar Témacin. Ouargla, 105p.

Bara, B., & Kara, R. (2021). Etude d'évaluation de la performance épuratoire de la station du traitement des eaux usées d'Oued Souf (Mémoire présenté en vue de L'obtention du diplôme de master, Université Center of Abdalhafid Boussouf-MILA).

Barot, S., Rossi, J. P., & Lavelle, P. (2007). Self-organization in a simple consumer–resource system, the example of earthworms. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(9), 2230-2240.

Behlouli, K. (2021). Contribution a l'étude des Macros invertébrés du sol et hiérarchisation des facteurs écologiques au niveau d'une subéraie anthropisé dans le massif d'Ath Ghobri (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).

Belaid, N. (2010). Evaluation des impacts de l'irrigation par les eaux usées traitées sur les plantes et les sols du périmètre irrigué d'El Hajeb-Sfax: salinisation, accumulation et phytoabsorption des éléments métalliques (Doctoral dissertation, Limoges).

Bellec, P., Lavarde, P., Lefebvre, L., & Madignier, M. L. (2015). Propositions pour un cadre national de gestion durable des sols. *Rapport CGEDD*, (010068-01). P 13\_14.

Ben Osman, Y. (2022). Traitement électrochimique des eaux usées chargées en polluants émergents utilisant des anodes innovantes à coût maîtrisé (Doctoral dissertation, Mulhouse). Page 22.

Benzaghou, Y. (2021). Effets de l'utilisation des eaux usées épurées et des sous-produits de la STEP d'Ain El Houtz sur la qualité des cultures du périmètre irriguée de Hennaya (Doctoral dissertation).

Benzaria, M. (2008). Approche méthodologique pour les projets de réutilisation des eaux usées en irrigation.

Bilotta, G. S., Burnside, N. G., Cheek, L., Dunbar, M. J., Grove, M. K., Harrison, C., ... & Davy-Bowker, J. (2012). Developing environment-specific water quality guidelines for suspended particulate matter. *Water Research*, 46(7), 2324-2332.

Blanchart, E., & Trap, J. (2020). Intensifier les fonctions écologiques du sol pour fournir durablement des services écosystémiques en agriculture. *Étude et Gestion des Sols*, 27, 121-134.

Blanchart, E., Raharrijaona, S., Razafindrakoto, M., Becquer, T., Bernard, L., Trap, J., & Razafimbelo, T. (2019). «Les sols et notre environnement», une animation diversifiée et interactive sur les services rendus par les sols, dans le cadre de l'Année Internationale des Sols, à Madagascar. *Etude et Gestion des Sols*, 26(1), p-115.

Bouchez, T., Blieux, A. L., Dequiedt, S., Domaizon, I., Dufresne, A., Ferreira, S., ... & Ranjard, L. (2016). Molecular microbiology methods for environmental diagnosis. *Environmental Chemistry Letters*, 14, 423-441.

Boudjabi, S., Ababsa, N., & Chenchouni, H. (2022). Sewage and sewage treatment. In *The Palgrave Handbook of Global Sustainability* (pp. 1-27). Cham: Springer International Publishing.

Boufous, S. (2015). Vers une économie circulaire dans le domaine de l'eau.

Bourbon, B., Lapalus, G., LE Daheron, V., Louvet, C., Marais, J., Pages, M., & Bouyer, D. (2015). Les traitements tertiaires : Pour quoi faire ? 14<sup>e</sup> Séminaire Eau, 30.

Boussadia, F. Z. (2018). Traitement des eaux usées de l'entreprise Algal+ par méthode électrochimique électrocoagulation (Doctoral dissertation, Université Mohamed BOUDIAF de M'Sila).

Briat, J. F., & Job, D. (2017). Les sols et la vie souterraine : Des enjeux majeurs en agroécologie. *Quae*.

Calvaruso, C., Blanchart, A., Bertin, S., Grand, C., Pierart, A., & Eglin, T. (2020). Quels paramètres du sol mesurer pour évaluer les fonctions et les services écosystémiques associés. *Étude et Gestion des Sols*, 27, 36-376.

Cannavacciuolo, M., Cassagne, N., Riou, V., Mulliez, P., Prévost-Bouré, N. C., Dequiedt, S. S., ... & Ranjard, L. (2017). Validation d'un tableau de bord d'indicateurs sur un réseau national de fermes en grande culture et en viticulture pour diagnostiquer la qualité biologique des sols agricoles. *Innovations Agronomiques*, 55, 41-54. P42.

Carré, E. (2017). Qualité biologique des eaux usées traitées en vue de la réutilisation (Doctoral dissertation, Université de Lyon).

Charland, K. (2014). Analyse des perspectives de réutilisation des eaux usées municipales au Québec (Doctoral dissertation, éditeur non identifié).

Corwin, D. L. (2021). Climate change impacts on soil salinity in agricultural areas. *European Journal of Soil Science*, 72(2), 842-862.

Cotterill, S. E., Dolfing, J., Jones, C., Curtis, T. P., & Heidrich, E. S. (2017). Low Temperature Domestic Wastewater Treatment in a Microbial Electrolysis Cell with 1 m<sup>2</sup> Anodes: Towards System Scale- Up. *Fuel Cells*, 17(5), 584-592.

Couture, I. (2006). Principaux critères pour évaluer la qualité de l'eau en micro-irrigation. In *Colloque sur l'irrigation, L'eau, Source de Qualité et de Rendement*, p2.

Decol, L. T., López-Gálvez, F., Truchado, P., Tondo, E. C., Gil, M. I., & Allende, A. (2019). Suitability of chlorine dioxide as a tertiary treatment for municipal wastewater and use of reclaimed water for overhead irrigation of baby lettuce. *Food Control*, 96, 186-193.

Dimkpa, C. O., Fugice, J., Singh, U., & Lewis, T. D. (2020). Development of fertilizers for enhanced nitrogen use efficiency—Trends and perspectives. *Science of the Total Environment*, 731, 139113.

Djaani, M., & Amer, Z. B. (2020). Évaluation de la qualité des eaux usées traitées par le système de lagunage naturel d'el Atteuf et par l'argile naturelle d'el menia. *UPB Sci Bull Series B*, 82(3), 12.

Drechsel, P., Bahri, A., Raschid-Sally, L., & Redwood, M. (Eds.). (2010). *Wastewater irrigation and health: assessing and mitigating risk in low-income countries*. IWMI.

Drechsel, P., Scott, C. A., Raschid-Sally, L., Redwood, M., & Bahri, A. (2011). *L'irrigation avec des eaux usées et la santé: évaluer et atténuer les risques dans les pays à faible revenu*. PUQ.

Dwivedi, A. K. (2017). Researches in water pollution: A review. *International Research Journal of Natural and Applied Sciences*, 4(1), 118-142.

Eglin, T., Cousin, I., & Walter, C. (2021). Contribution aux réflexions sur les concepts de fonctions des sols et de services écosystémiques, et leur évaluation. *Étude et Gestion des Sols*, 28, 143-146.

Elhaisoufi, W., Ghoulam, C., Barakat, A., Zeroual, Y., & Bargaz, A. (2022). Phosphate bacterial solubilization: A key rhizosphere driving force enabling higher P use efficiency and crop productivity. *Journal of Advanced Research*, 38, 13-28.

Ferk, F., Uhl, M., Fuerhacker, M., Mahnik, S. N., Lenz, K., Weissenbacher, N., ... & Bursch, W. (2007). Hospital waste water: health risk for human and environment by cytostatic drug emissions? Part II: Biological monitoring (genotoxicity assays) and risk assessment. In *BMC Pharmacology* (Vol. 7, No. 2, pp. 1-1). BioMed Central.

Forats, A., & Ghedair, H. (2019). L'effet d'utilisation des eaux usées traitées en irrigation sur certaines propriétés physico-chimique de sol dans la cuvette d'Ouargla (Mémoire présenté en vue de L'obtention du diplôme de master, Université Kasdi Merbah Ouargla).

Funderburg, E. (2020). The role of organic matter in soil. *Stockfarm*, 10(9), 31-33.

Ghadbane, N. (2003). Les eaux usées urbaines Cas d'étude : ville de M'sila (Doctoral dissertation, Université de M'Sila-Mohamed Boudiaf).

Ghosh, S. K. (2019). *Wastewater recycling and management*.

Girard, M. C., Walter, C., Rémy, J. C., Berthelin, J., & Morel, J. L. (2011). *Sols et environnement-2e édition-Cours, exercices et études de cas-Livre+ compléments en ligne: Cours, exercices corrigés et études de cas*. Dunod.

Girardin, G. (2015). Devenir dans l'atmosphère des virus entériques pathogènes de l'homme présents dans les eaux usées (Doctoral dissertation, Université d'Avignon).

Gobat, J. M., Aragno, M., & Matthey, W. (2010). *Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols* (Vol. 14). PPUR Presses polytechniques.

Haiahem, R., & Yassad, K. (2022). Étude et suivi de fonctionnement de la STEP de Guelma: traitement et réutilisation des eaux usées (Mémoire de master de l'Université 8 Mai 1945 Guelma).

Hamdy, A., & Ragab, R. (2006). Reuse of treated wastewater in irrigation: challenges and perspectives.

Hautefeuille, P. (2017). L'agriculture du carbone. Le sol : union de la matière organique et minérale, <https://agriculture-eco-performante.com/2017/10/29/le-sol-union-de-la-matiere-organique-et-minerale/>

Herpin, U., Gloaguen, T. V., da Fonseca, A. F., Montes, C. R., Mendonça, F. C., Piveli, R. P., ... & Melfi, A. J. (2007). Chemical effects on the soil–plant system in a secondary treated

wastewater irrigated coffee plantation—a pilot field study in Brazil. *agricultural water management*, 89(1-2), 105-115.

Hosney, H., Tawfik, M. H., Duker, A., & van der Steen, P. (2023). Prospects for treated wastewater reuse in agriculture in low-and middle-income countries: Systematic analysis and decision-making trees for diverse management approaches. *Environmental Development*, 46, 100849.

Huang, T., Yang, N., Lu, C., Qin, X., & Siddique, K. H. (2021). Soil organic carbon, total nitrogen, available nutrients, and yield under different straw returning methods. *Soil and Tillage Research*, 214, 105171.

Jamshidzadeh, Z., & Tavangari Barzi, M. (2020). Wastewater quality index (WWQI) as an assessment tool of treated wastewater quality for agriculture: a case of North Wastewater Treatment Plant effluent of Isfahan. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(7), 7366-7378.

Johnson, J. M. F., Barbour, N. W., & Weyers, S. L. (2007). Chemical composition of crop biomass impacts its decomposition. *Soil Science Society of America Journal*, 71(1), 155-162.

Kaboneka, S., Nsavyimana, G., Bizimana, S., & Bicereza, D. (2021). Cinétique de décomposition de la paille de blé dans un sol acide du Mugamba Sud (Burundi): effet du mode d'application. *Revue de l'Université du Burundi. Série-Sciences Exactes et Naturelles*, 30, 9-19.

Kacprzak, M., Neczaj, E., Fijałkowski, K., Grobelak, A., Grosser, A., Worwag, M., ... & Singh, B. R. (2017). Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environmental research*, 156, 39-46.

Kanbouchi, I., Souabi, S., Chtaini, A., & Aboulhassan, M. A. (2014). Évaluation de la pollution des eaux usées mixtes collectées par le réseau d'assainissement de la ville de Mohammedia: Cas d'un collecteur principal. *Les technologies de laboratoire*, 8(34).

Kempińska, D., & Kot-Wasik, A. (2018). The use of RP-HPLC–Q-TOF–MS as a powerful tool for wastewater composition profiling and selection of water pollution marker specific to wastewater contamination. *Monatshefte für Chemie-Chemical Monthly*, 149, 1595-1604.

Kessira, M., & Hamdy, A. (2005). Gestion de l'irrigation avec les eaux non conventionnelles. Bari: CIHEAM/EU DG Research, 203-216.

Khacheba, R., Hartani, T., & Ker Rault, Ph. (2017). Etude de l'application d'un traitement tertiaire complémentaire sur les eaux usées épurées de la station de lagunage aéré de Ouargla en vue de réutilisation agricole en milieu aride. *Systèmes Agric. Environ. SAGREN*, 1. Page 88

Khelif, S. (2018). Impact de l'irrigation avec les eaux usées sur la qualité des sols agricoles et des eaux souterraines de la région de Fesdis-Région nord de Batna (Doctoral dissertation, UB1).

Khelif, S. (2018). Impact de l'irrigation avec les eaux usées sur la qualité des sols agricoles et des eaux souterraines de la région de Fesdis-Région nord de Batna (Doctoral dissertation, UB1).

Koop, S. H., & van Leeuwen, C. J. (2017). The challenges of water, waste and climate change in cities. *Environment, development and sustainability*, 19(2), 385-418.

Krüger, I., Chartin, C., van Wesemael, B., Malchair, S., & Carnol, M. (2017). Integrating biological indicators in a Soil Monitoring Network (SMN) to improve soil quality diagnosis—a study case in Southern Belgium (Wallonia). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 21(S1).

Laabassi, A. (2018). L'épuration des eaux usées par le système de lagunage à macrophytes (Doctoral dissertation, Université Ferhat Abbas Sétif 1).

Lahlou, F. Z., Mackey, H. R., & Al-Ansari, T. (2022). Role of wastewater in achieving carbon and water neutral agricultural production. *Journal of Cleaner Production*, 130706.

Lavelle, P. (2002). Functional domains in soils. *Ecological research*, 17, 441-450.

Le Roy, J., Dubois, V., Tournebize, J., Lauvernet, C., & Clément, R. (2020). Synthèse bibliographique: Impacts de l'infiltration d'eaux usées traitées sur les sols (Doctoral dissertation, INRAE UR-Reversaal).

Lee, K. E., Morad, N., Teng, T. T., & Poh, B. T. (2012). Development, characterization and the application of hybrid materials in coagulation/flocculation of wastewater: A review. *Chemical Engineering Journal*, 203, 370-386.

Lemita, A. (2021). Méthodologie d'optimisation de la commande du procédé de traitement des eaux usées par boues activées basée sur les algorithmes évolutionnaires (Doctoral dissertation).

Libes, Y. (2010). Les eaux usées et leur épuration. Académie de Nancy-Metz.

Maquet, C (2021). La réutilisation des eaux usées: une solution d'avenir. Page 69

Mefti, M. E. A. (2015). Réutilisation des eaux épurées dans l'irrigation (Doctoral dissertation).

Metahri, M. S. (2012). Elimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées par des procédés mixtes: cas de la STEP est de la ville de Tizi Ouzou (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri). P 69

Milkereit, J., Geisseler, D., Lazicki, P., Settles, M. L., Durbin-Johnson, B. P., & Hodson, A. (2021). Interactions between nitrogen availability, bacterial communities, and nematode indicators of soil food web function in response to organic amendments. *Applied Soil Ecology*, 157, 103767.

Mobunda, J., Azenge, C. J. P., Monde, G., Angbonga, A., & Meniko, J. P. P. (2020). Caractérisation spatio-temporelle de la quantité de CO<sub>2</sub> dégagée par les décharges publiques de la ville de Kisangani (RD Congo). *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 8(4).

Moreira, N. A. & Bondelind, M., (2017), Safe drinking water and waterborne outbreaks, *Journal of Water and Health*, vol. 15, n°1, p. 83-96.

Moulin, S., Rechels, D. R., & Stankovic, M. (2013). Traitement des eaux usées. Centre d'Enseignement et de Recherches sur l'Environnement et la Société.

Mouloubou, O. (2015). Développements spectroscopiques pour l'étude de la matière organique du sol dans des extraits liquides, avec étude de son impact sur le comportement des métaux: application à un sol agricole amendé par du compost (Doctoral dissertation, Aix-Marseille).

Nadav, I., Tarchitzky, J., & Chen, Y. (2013). Water repellency induced by organic matter (OM) in treated wastewater (TWW) infiltration ponds and irrigation. In *Functions of Natural Organic Matter in Changing Environment* (pp. 883-887). Springer Netherlands.

Naidoo, S., & Olaniran, A. O. (2014). Treated wastewater effluent as a source of microbial pollution of surface water resources. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(1), 249-270.

Nani, H. B., Touil, A., & Nani, M. (2021). La Réutilisation Des Eaux Usées En Agriculture à Partir De La Station D'épuration (STEP 03) De La Wilaya d'El-Oued.

Nicolardot, B., Recous, S., & Mary, B. (2001). Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: a simple dynamic model based on the C: N ratio of the residues. *Plant and soil*, 228(1), 83-103.

Norris, C. E., Bean, G. M., Cappellazzi, S. B., Cope, M., Greub, K. L., Liptzin, D., ... & Honeycutt, C. W. (2020). Introducing the North American project to evaluate soil health measurements. *Agronomy Journal*, 112(4), 3195-3215.

OMS. (2018). Progrès relatifs au traitement et à l'utilisation sans danger des eaux usées : mise à l'essai de la méthode de suivi et résultats préliminaires relatifs à l'indicateur 6.3. 1 des ODD. Page 31

Pahalvi, H. N., Rafiyya, L., Rashid, S., Nisar, B., & Kamili, A. N. (2021). Chemical fertilizers and their impact on soil health. *Microbiota and Biofertilizers, Vol 2: Ecofriendly Tools for Reclamation of Degraded Soil Environs*, 1-20.

Pereira, L. S., Cordery, I., & Iacovides, I. (2002). Coping with Water Scarcity.(IHP? VI, Technical Documents in Hydrology, n 58). Paris. International Hydrological Programme, UNESCO.

Pereira, P., Bogunovic, I., Muñoz-Rojas, M., & Brevik, E. C. (2018). Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 5, 7-13.

Pi, K., Bierozza, M., Brouchkov, A., Chen, W., Dufour, L. J., Gongalsky, K. B., ... & Van Cappellen, P. (2021). The cold region critical zone in transition: responses to climate warming and land use change. *Annual Review of Environment and Resources*, 46, 111-134.

Piletlain, F., Mathieu C. (2003). Analyse chimique des sols. Méthodes choisies. Lavoisier édition TEC et DOC. 376p.

Piutti, S., Romillac, N., Chanseau, A., Slezack-Deschaumes, S., Manneville, V., & Amiaud, B. (2015). Enjeux et contributions des prairies temporaires pour améliorer la fertilité des sols. *Fourrages*, 223, 179-187.

Qadir, M., & Scott, C. A. (2011). Contraintes non pathogènes liées à l'irrigation avec des eaux usées. *L'irrigation avec des eaux usées et la santé*, 109. Page 124

Qasim, S. R., & Zhu, G. (2017). *Wastewater Treatment and Reuse Theory and Design Examples, Volume 2: Post-Treatment, Reuse, and Disposal*. CRC Press.

Raymond, N. S., Gómez-Muñoz, B., van der Bom, F. J., Nybroe, O., Jensen, L. S., Müller-Stöver, D. S., ... & Richardson, A. E. (2021). Phosphate-solubilising microorganisms for improved crop productivity: a critical assessment. *New Phytologist*, 229(3), 1268-1277.

Rejsek, F. (2002). *Analyse des eaux : Aspects réglementaires et techniques*. Centre régional de documentation pédagogique d'Aquitaine.

Rezazi, Z., Rabhi, A., & Rahmani, A. C. (2022). Evaluation de l'élimination du risque biologique dans les procédés de traitement des eaux usées.

Sadatshojaei, E., Wood, D. A., & Rahimpour, M. R. (2021). Potential and challenges of carbon sequestration in soils. *Applied Soil Chemistry*, 1-21.

Saleh, T. A., Mustaqeem, M., & Khaled, M. (2022). Water treatment technologies in removing heavy metal ions from wastewater: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 17, 100617.

Sanou, Y., Ségbéaya, K. N., Paré, S., Baba, G., & Bonzi-Coulibaly, L. Y. (2019). Etude expérimentale de l'élimination du calcium des eaux usées par des charbons actifs mésoporeux. *Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie*, 47, 52-60.

Sawadogo, B. (2018). *Traitement des eaux usées industrielles par des procédés membranaires sous climat sahélien: cas des eaux usées de brasserie au Burkina Faso (Doctoral dissertation, Université Montpellier; Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement)*.

Shahedi, A., Darban, A. K., Taghipour, F., & Jamshidi-Zanjani, A. J. C. O. I. E. (2020). A review on industrial wastewater treatment via electrocoagulation processes. *Current opinion in electrochemistry*, 22, 154-169.

Siddiki, S. Y. A., Uddin, M. N., Mofijur, M., Fattah, I. M. R., Ong, H. C., Lam, S. S., ... & Ahmed, S. F. (2021). Theoretical calculation of biogas production and greenhouse gas

emission reduction potential of livestock, poultry and slaughterhouse waste in Bangladesh. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(3), 105204.

Singh, A., Sharma, R. K., Agrawal, M., & Marshall, F. (2009). Effects of wastewater irrigation on physicochemical properties of soil and availability of heavy metals in soil and vegetables. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 40(21-22), 3469-3490.

Solis, C., Andrade, E., Mireles, A., Reyes-Solis, I. E., Garcia-Calderon, N., Lagunas-Solar, M. C., ... & Flocchini, R. G. (2005). Distribution of heavy metals in plants cultivated with wastewater irrigated soils during different periods of time. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 241(1-4), 351-355.

Song, T., Huang, C., Yang, H., Liang, J., Ma, Y., Xu, C., ... & Zhang, L. (2022). Characterization of Soil-Plant Leaf Nutrient Elements and Key Factors Affecting Mangoes in Karst Areas of Southwest China. *Land*, 11(7), 970.

Tabet, M., Abda, A., Benouareth, D. E., Liman, R., Konuk, M., Khallef, M., & Taher, A. (2015). Mutagenic and genotoxic effects of Guelma's urban wastewater, Algeria. *Environmental monitoring and assessment*, 187, 1-13.

Timmis, K., & Ramos, J. L. (2021). The soil crisis: the need to treat as a global health problem and the pivotal role of microbes in prophylaxis and therapy. *Microbial Biotechnology*, 14(3), 769-797.

Tiomele, S. A. T., & Kamdem, M. S. (2022). Logiques d'acteurs dans la gestion des eaux usées et assainissement dans la commune d'arrondissement de Bafoussam 1er (Ouest-Cameroun). *ESI Preprints*, 7, 196-196.

Toth, G., Stolbovoy, V., & Montanarella, L. (2007). Soil quality and sustainability evaluation—an integrated approach to support soil-related policies of the European Union.

Toze, S. (2006). Reuse of effluent water—benefits and risks. *Agricultural water management*, 80(1-3), 147-159.

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.

Uchymiak, M., Rahardianto, A., Lyster, E., Glater, J., & Cohen, Y. (2007). A novel RO ex situ scale observation detector (EXSOD) for mineral scale characterization and early detection. *Journal of Membrane Science*, 291(1-2), 86-95.

Ungureanu, N., Vlăduț, V., & Voicu, G. (2020). Water scarcity and wastewater reuse in crop irrigation. *Sustainability*, 12(21), 9055.

Uroz, S., Kelly, L. C., Turpault, M. P., Lepleux, C., & Frey-Klett, P. (2015). The mineralosphere concept: mineralogical control of the distribution and function of mineral-associated bacterial communities. *Trends in microbiology*, 23(12), 751-762.

Vandermeersch, D. (2005). Prosecuting International Crimes in Belgium. *Journal of International Criminal Justice*, 3(2), 400-421.

Vanhove, P. (2018). Classification des pratiques d'agriculteurs et relation avec les caractéristiques structurales et biologiques des sols en régions limoneuse et sablo-limoneuse de Wallonie (Doctoral dissertation, Thèse de doct. (Visité le 01/06/2022)).

Wen, W., Su, W., Tang, H., Le, W., Zhang, X., Zheng, Y., ... & Wang, H. (2020). Immune cell profiling of COVID-19 patients in the recovery stage by single-cell sequencing. *Cell discovery*, 6(1), 31.

Wintgens, T., Melin, T., Schäfer, A., Khan, S., Muston, M., Bixio, D., & Thoeye, C. (2005). The role of membrane processes in municipal wastewater reclamation and reuse. *Desalination*, 178(1-3), 1-11.

Yadav, R.K., Goyal, B., Sharma, R.K., Dubey, S.K. et Minhas, P.S., (2002). Post irrigation impact of domestic sewage effluent on composition of soils, crops and ground water - A case study. *Environment International*, 28 (6): 481-486.

Yeilagi, S., Rezapour, S., & Asadzadeh, F. (2021). Degradation of soil quality by the waste leachate in a Mediterranean semi-arid ecosystem. *Scientific reports*, 11(1), 11390.

### **Sites Web**

<https://www.charente-maritime.gouv.fr/Actions-de-l-Etat/Environnement-risques-naturels-et-technologiques/Eau-et-milieux-aquatiques/Eaux-usees-et-Eaux-pluviales/L-assainissement-collectif>. Consulté le 20 avril 2023.

<https://svtlyceedevenne.com/seconde/enjeux-contemporains/caracteristiques-des-sols-et-production-de-biomasse/> . Consulté le 25 avril 2023.



## Résumé

La réutilisation des eaux usées en agriculture est une pratique qui date des temps anciens. L'objectif de cette étude est d'évaluer les impacts de l'irrigation par des eaux usées brutes et traitées sur la qualité chimique et biologique des sols agricoles. Nous avons réalisé des analyses chimiques et biologiques des échantillons des sols irrigués avec les eaux usées brutes et leur témoin de la ville de l'Hamma (Khenchela), et des échantillons des sols irrigués avec les eaux usées traitées et leur témoin de la ville d'Ain Beida (Oum El Bouaghi). Dans l'ensemble, nos résultats ont montré que l'irrigation avec les eaux usées traitées a diminué légèrement la conductivité électrique de sol, la matière organique, le phosphore assimilable ainsi que le calcaire total, alors qu'elle a fait augmenter la teneur en azote. Concernant l'irrigation avec les eaux usées brutes elle a diminué le pH, la matière organique de sol et a augmenté la teneur en azote, le calcaire et le phosphore assimilable. Les résultats relatifs à la respiration de sol ont montré que pour les sols des deux sites irrigués avec les eaux usées brutes et traitées, les flux de CO<sub>2</sub> étaient plus faibles que pour les sols témoins. La caractérisation complète des eaux d'irrigation et un suivi régulier restent nécessaires pour bien cerner l'impact de l'irrigation avec les eaux usées sur la qualité de sol.

**Mots clés :** qualité chimique du sol, eaux usées traitées, Eaux usées brutes, irrigation, qualité biologique du sol.

## Abstract

The reuse of wastewater in agriculture is a practice that dates back to ancient times. The aim of this study is to assess the impact of irrigation with raw and treated wastewater on the chemical and biological quality of agricultural soils. We carried out chemical and biological analyses of soil samples irrigated with raw wastewater and its control from the town of l'Hamma (Khenchela), and samples of soils irrigated with treated wastewater and their control from the town of Ain Beida (Oum El Bouaghi). Overall, our results showed that irrigation with treated wastewater slightly decrease soil electrical conductivity, organic matter, available phosphorus and total limestone, while increasing nitrogen content. Irrigation with raw sewage reduced pH and soil organic matter, and increased nitrogen, limestone and available phosphorus content. The results on soil respiration showed that for soils from both sites irrigated with raw and treated CO<sub>2</sub> fluxes were lower than for control soils. Full characterization of irrigation water and regular monitoring are still necessary to fully the impact of wastewater irrigation on soil quality.

**Keywords:** chemical soil quality, treated wastewater, raw wastewater, irrigation, biological soil quality.

## ملخص

إن إعادة استخدام المياه العادمة في الزراعة ممارسة تعود إلى العصور القديمة الهدف من هذه الدراسة هو تقييم تأثيرات الري بمياه الصرف الصحي الغير المعالجة والمعالجة على الجودة الكيميائية والبيولوجية للتربة الزراعية. أجرينا التحاليل الكيميائية والبيولوجية لعينات التربة المروية بمياه الصرف الصحي الخام مع وجود شاهد من مدينة الحامة (خنشلة)، وعينات من التربة المروية بمياه الصرف الصحي المعالجة مع وجود شاهد كذلك من مدينة عين البيضاء (أم البواقي). بشكل عام، أظهرت نتائجنا أن الري بمياه الصرف الصحي المعالجة أدى إلى انخفاض طفيف في الناقلية الكهربائية للتربة، والمواد العضوية، والفسفور المتاح، و كربونات الكالسيوم الكلية، بينما زاد محتوى النيتروجين. فيما يتعلق بالري بمياه الصرف الصحي الخام، فقد أدى ذلك إلى خفض درجة الحموضة والمواد العضوية للتربة وزيادة محتوى النيتروجين وكربونات الكالسيوم الكلية والفسفور المتاح. أظهرت النتائج المتعلقة بتنفس التربة أنه بالنسبة للتربة في الموقعين المرويين بمياه الصرف الصحي الخام والمعالجة، كانت تدفقات ثاني أكسيد الكربون أقل من التربة التي استخدمت كشاهد. يظل التوصيف الكامل لمياه الري والمتابعة المستمرة ضروريين لفهم تأثير الري بمياه الصرف الصحي على جودة التربة

**الكلمات المفتاحية :** الخصائص الكيميائية للتربة، مياه الصرف الصحي المعالجة، مياه الصرف الصحي الخام، الري، الخصائص البيولوجية للتربة