



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar -El OUED
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Biologie

En vue de l'obtention du diplôme de Master Spécialité :
Diversité écologique et physiologie végétale

THÈME

**Effet des eaux usées traitées sur la plante
dans un écosystème saharien**

Présenté par :

M^{elle}. Feredj Raouane

M^{elle}. Madjidi Douaa

Devant le jury composé de :

Président	Laouedj Hacene	MCA	Université d'El Oued
Examineur	Ghania Ahmed	MAA	Université d'El Oued
Promotrice	Serraye Aicha	MCB	Université d'El Oued

Soutenu le : 09/10/2025

Année universitaire : 2024/2025

Résumé

La réutilisation des eaux usées traitées est une solution importante et efficace pour faire face à de graves pénuries d'eau, en particulier dans les zones sèches telles que la région d'El Oued. Ces zones souffrent d'une pénurie croissante d'eau douce en raison de facteurs climatiques et de conditions naturelles difficiles, ce qui rend nécessaire le recours à des alternatives non conventionnelles afin d'assurer la sécurité alimentaire et hydrique.

Dans ce contexte, cette étude s'est concentrée sur l'évaluation de l'impact des eaux usées traitées, produites à la station d'épuration de Kouinin sur la croissance de la plante de sorgho, qui se caractérise par sa grande capacité d'adaptation aux climats secs.

Les résultats ont montré que l'eau traitée est riche en principaux nutriments tels que l'azote, le phosphore. Cela a eu un impact positif sur la croissance des plantes, avec une nette amélioration de l'augmentation de la biomasse fraîche et sèche, par rapport à l'irrigation traditionnelle utilisant de l'eau de puits relativement pauvre en ces éléments.

D'autre part, des analyses en laboratoire ont montré que certaines propriétés de cette eau, telles que le pH, la température et les valeurs de phosphate (PO₄), étaient dans les limites autorisées selon les normes nationales, ce qui la rendait adaptée à un des fins d'irrigation. Cependant, d'autres indicateurs, tels que les niveaux de conductivité électrique, ont dépassé les limites standard algériennes, ce qui peut présenter des risques potentiels pour le sol et les plantes à long terme s'ils ne sont pas traités et surveillés régulièrement.

En conséquence, on peut dire que les résultats de cette étude ont démontré les avantages possibles pour l'utilisation de l'eau traitée dans l'amélioration de la biomasse dans l'écosystème saharien, mais en même temps ils ont démontré la nécessité d'adopter une surveillance attentive et une qualité de traitement acceptable, d'une manière qui assure l'exploitation sûre et durable de ces ressources en eau alternatives.

Mots clés : Kouinine, eaux usées traitées, biomasse, sorgho, écosystème saharien.

Summary

Reusing treated wastewater is an important and effective solution to address severe water shortages, especially in dry areas such as the valley area. These areas suffer from an increasing shortage of fresh water due to climatic factors and difficult natural conditions, which makes it necessary to resort to unconventional alternatives to ensure food and water security.

In this context, this study focused on evaluating the impact of treated wastewater produced at the Kouinin Treatment Plant on the growth of sorghum plants, which are characterized by their high ability to adapt to dry climates.

The results showed that the treated water was rich in key nutrients such as nitrogen and phosphorus. This had a positive impact on plant growth, with a significant improvement in the increase in fresh and dry biomass, compared to traditional irrigation using well water that is relatively poor in these elements. On the other hand, laboratory analyses showed that some properties of this water, such as pH, temperature, and phosphate (PO₄) values, were within the permissible limits according to national standards, making it suitable for one of the irrigation purposes.

Therefore, we can say that the results of this study demonstrated the potential benefits of using treated water to improve biomass in the desert ecosystem, but at the same time they demonstrated the need to adopt careful monitoring and acceptable treatment quality, in a way that

Keywords: Kouinin, treated wastewater, biomass, sorghum, desert system.

المخلص

تعتبر إعادة استخدام مياه الصرف الصحي المعالجة حلاً مهماً وفعالاً لمعالجة النقص الحاد في المياه، خاصة في المناطق الجافة مثل منطقة الواد. وتعاني هذه المناطق من نقص متزايد في المياه العذبة بسبب العوامل المناخية والظروف الطبيعية الصعبة، مما يجعل من الضروري اللجوء إلى بدائل غير تقليدية لضمان الأمن الغذائي والمائي.

وفي هذا السياق، ركزت هذه الدراسة على تقييم تأثير مياه الصرف الصحي المعالجة المنتجة في محطة معالجة كوينين على نمو نبات الذرة الرفيعة الذي يتميز بقدرته العالية على التكيف مع المناخات الجافة. وأظهرت النتائج أن المياه المعالجة غنية بالعناصر الغذائية الرئيسية مثل النيتروجين والفوسفور. وكان لذلك أثر إيجابي على نمو النبات، مع تحسن ملحوظ في زيادة الكتلة الحيوية العذبة والجافة، مقارنة بالري التقليدي باستخدام مياه الآبار الفقيرة نسبياً في هذه العناصر. ومن ناحية أخرى، أظهرت التحاليل المخبرية أن بعض خصائص هذه المياه، مثل الرقم الهيدروجيني ودرجة الحرارة وقيم الفوسفات (PO4)، كانت ضمن الحدود المسموح بها وفق المعايير الوطنية، مما جعلها مناسبة لأحد أغراض الري. وبالتالي، يمكننا القول إن نتائج هذه الدراسة أثبتت الفوائد المحتملة لاستخدام المياه المعالجة في تحسين الكتلة الحيوية في النظام البيئي الصحراوي، لكنها في الوقت نفسه أثبتت الحاجة إلى اعتماد مراقبة دقيقة وجودة معالجة مقبولة، بطريقة تضمن الاستغلال الآمن والمستدام لهذه الموارد المائية البديلة.

الكلمات المفتاحية: كوينين، مياه الصرف المعالجة الكتلة الحيوية، الذرة الرفيعة، نظام صحراوي.

Remerciements

Nous remercions tout d'abord Allah tout puissant, de nous avoir donné le courage, la patience et la chance d'étudier et de suivre le chemin de la science.

Nous remercions en premier lieu Dr. SERRAYE Aicha notre promotrice pour nous avoir donné l'occasion de diriger ce mémoire de fin d'étude tout le long de sa réalisation.

Nos remerciements également la Présidente du jury, examinatrice du jury, pour avoir accepté de juger et d'examiner notre travail scientifique.

Nous remercions aussi tous les membres de la faculté des sciences de la nature et de la vie.

Nous remercions également la Direction de l'assainissement des eaux (ONA) dans la vallée pour sa coopération et son soutien à nos travaux de recherche.

Nous remercions infiniment tous les laboratoires d'analyses qui nous aide à analyser notre échantillon de recherche.

Nous remercions enfin toute personne de près ou de loin ayant généreusement contribué à l'élaboration de ce travail.

Dédicace

À celle qui a été ma source de force et mon inspiration, à ma chère mère, symbole de tendresse et de sacrifices, je prie Dieu de la protéger et de la garder comme une couronne sur ma tête.

À mon noble père, mon soutien et mon premier guide, qui ne m'a jamais privé de ses conseils, de son aide et de ses prières, je lui exprime toute ma gratitude.

À mes frères et sœurs bien-aimés, parure de ma vie et compagnons de mon parcours.

À mes amis qui m'ont accompagné tout au long de ce chemin, je partage avec eux la joie de cet accomplissement.

À tous ceux que j'aime et qui occupent une place particulière dans mon cœur.

Je dédie ce modeste travail.

Raouane

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère

À mon père Omar, écolier de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger.

Que dieu les garde et les protège.

À mon cher frère et à mes chères sœurs.

À tous ceux que j'aime.

Je dédie ce travail.

Douaa

Table des matières

Résumé

Summary

ملخص

Remerciements

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale.....1

Chapitre1 : Généralités sur les eaux usées traitées

Introduction partielle.....3

1 Définition des eaux usées traitées.....3

2. Origine des eaux usées3

2.1. Eaux domestiques..... 3

2.2. Eaux industrielles 3

2.3. Eaux agricoles..... 4

3. Traitement des eaux usées4

3. 1. Étapes de traitement des eaux usées..... 4

3.1.1. Prétraitement.....4

3.1.2. Traitement primaire4

3.1.3. Traitement secondaire5

3.1.4. Traitement tertiaire5

3.2. Technologies de traitement..... 5

3.2.1. Technologies biologiques5

3.2.2 Technologies physico-chimiques8

4. Composition des eaux usées traitées	9
4.1. Macroéléments	9
4.1.1. Azote (N)	9
4.1.2. Phosphore (P)	9
4.1.3. Potassium (K)	9
4.2. Microéléments	9
4.2.1. Métaux lourds.....	9
4.2.2. Pathogènes	10
4.2.3. Résidues chimiques	10
5. Avantages de l'utilisation des eaux usées traitées	10
5.1. Réduction de la consommation des ressources en eau douce	10
5.2 Apport de nutriments pour les plantes	11
6. Limites et risques associés à l'utilisation des eaux usées traitées	11
6.1. Accumulation de contaminants dans les sols et les plantes	11
6.2. Problèmes sanitaires : Pathogènes et métaux lourds	11
6.3. Effets à long terme sur l'environnement	13
7. Utilisation des eaux usées traitées dans les zones sèches et désertiques	14
7.1 Possibilités d'utilisation dans les écosystèmes secs	14
7.2. Etude de cas dans des environnements désertiques	14
8. Réglementation et gestion des eaux usées traitées	15
8.1. Normes nationales	15
8.1.1. Paramètres microbiologiques.....	15
8.2.3. Paramètres physico-chimiques	16
8.2. Normes internationales	18
8.2.1. Norme européenne	18
8.2.2. Arabie Saoudite.....	22
8.2.3. Maroc	23
Conclusion	27

Chapitre 2: Effets de la réutilisation des eaux usées traitées

Introduction partielle	28
-------------------------------------	-----------

1. Effets positifs sur le sol	28
1.1. L'augmentation de la teneur en matières organiques	28
1.2. Amélioration de la structure	28
1.3. Accroissement de l'activité microbienne.....	28
1.4. Amélioration de la capacité de rétention d'eau	29
2. Effets négatifs sur le sol	29
2.1. Risque de contamination du sol	29
2.2. Accumulation de métaux lourds	30
3. Effets positifs sur le secteur agricole	30
3.1. Réduction de l'utilisation des fertilisants chimiques.....	30
3.2. Amélioration du rendement	30
4. Effets négatifs sur le secteur agricole	31
5. Effets positifs sur la richesse hydrique.....	32
6. Effets négatifs sur la richesse hydrique.....	33
7. Effet sur le secteur économique	33
8. Effets positifs sur le secteur social	34
9. Effets négatives sur le secteur social.....	34
Conclusion.....	36

Chapitre 3

Matériel et méthodes

1.Caractéristiques de la région d'étude.....	37
1.1. Situation Géographique.....	37
1.2. Cadre géologique	38
1.3. Climat de la région d'étude	39
1.4. Relief.....	39
1.5. Caractères pédologiques.....	39
1.6. Hydrogéologie	40
2. Choix de zone d'échantillonnage.....	40
3. Matériel Utilisé	41

4. Analyses.....	42
4.1. Analyse de l'eau	43
4.2. Analyse de sorgho.....	43
4.3. Analyses statistiques.....	44

Résultats et discussion

1. Résultats d'analyses physico-chimiques des eaux	45
1.1. Résultat d'analyse de potentiel hydrique (pH).....	45
1.2. Résultat d'analyse de conductivité électrique (CE)	46
1.3. Résultat d'analyse de température (T).....	47
1.4. Résultat d'analyse de l'orthophosphate (PO₄).....	48
1.5. Résultat d'analyse de l'azote ammoniacal (N-NH₄).....	49
2. Résultats d'analyses de plante.....	50
2.1. Biomasse fraîche.....	50
2.2. Biomasse sèche.....	52
Conclusion générale	54
Recommandations	55
Références bibliographiques	

Liste des figures

Figure 1: Procédé de traitement à boues activées en bassin unique	6
Figure 2: schémas présente le principe du fonctionnement des disques biologiques.....	6
Figure 3 : schéma qui présente le principe d'un lit bactérien.....	7
Figure 4 : Ssystème de lagunage : un bassin anaérobie, un bassin facultatif et un bassin pour la maturation aérobie	8
Figure 5 : Situation géographique de la wilaya El-Oued	38
Figure 6: Plan géologique du région d'El-Oued dans le grand Erg Oriental	39
Figure 7: Zone d'échantillonnage	41
Figure 8: pH-mètre utilisé dans les analyses	42
Figure 9: Conductimètre utilisé dans les analyses	42
Figure 10: Spectrophotomètre UV-Visible	42
Figure 11: Concentration moyenne de pH dans les deux types d'eaux analysés	45
Figure 12: Concentration moyenne de conductivité électrique dans les deux types d'eaux analysé	46
Figure 13: Concentration moyenne de température dans les deux types d'eaux analysées.	47
Figure 14: Concentration moyenne de PO4 dans les deux types d'eaux analysées	48
Figure 15: Concentration moyenne de N-NH4 dans les deux types d'eaux analysées	49
Figure 16: Biomasse fraise de sorgho sous deux types dans quatre campagnes	50
Figure 17: : Biomasse sèche du sorgho change sous deux types d'irrigation dans quatre campagne	52

Liste des tableaux

Tableau 1: Standards algériennes microbiologiques de réutilisation des eaux usées en irrigation.	16
Tableau 2: Standards Algériennes physico-chimiques de réutilisation des eaux usées traitées	17
Tableau3 : Standards Algériennes des éléments toxiques de réutilisation des eaux usées traitées pour les sols à texture fine, neutre ou alcalin	18
Tableau 4:Classes de qualité de l'eau de récupération et usage et méthode d'irrigation agricoles autorisés	20
Tableau 5: Exigences de qualité applicables à l'eau de récupération destinée à l'irrigation agricole.....	21
Tableau 6: Surveillance de validation de l'eau de récupération destinée à l'irrigation agricole	22
Tableau 7: Paramètres physico-chimiques de réutilisation d'eau usée traitée en irrigation en Arabie Saoudite	23
Tableau 8: exigences bactériologiques marocaines pour l'irrigation avec les l'eaux usées traitées	24
Tableau 9: norme marocaine des paramètres parasitologiques pour l'irrigation avec les l'eaux usées traitées	24
Tableau 10: valeurs limites des éléments trace métalliques dans les eaux usées traitées pour l'irrigation .	25
Tableau 11: normes marocaines des paramètres physico chimiques	26
Tableau 12 :Principaux agents pathogènes que l'on peut trouver dans les eaux usée.....	32
Tableau 13 : présente les principaux types des agents pathogènes entériques et des substances d'intérêt sanitaire que l'on peut trouver dans les eaux usées	43

Liste des abréviations

°C	Degré Celsius
CE	Conductivité Électrique
CEE	Communauté Économique Européenne
DBO	Demande Biochimique en Oxygène
DCO	Demande Chimique en Oxygène
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
h	Heure
HAP	hydrocarbures aromatiques polycycliques
K	Potassium
Kg/m²	kilogramme par mètre carré
mg/l	milligramme par litre
N	Azote
NH₄⁺	Ion ammonium
NO₃⁻	Nitrate
N-NH₄	Azote ammoniacal
P	Phosphore
PH	Potentiel of Hydrogène
PO₄	Phosphate orthophosphate
Sm/cm	millisiemens par centimètre
STEP-1	Station de Traitement des Eaux Usées

Introduction générale

La plupart de l'Algérie se caractérise par un climat semi-aride à aride, marqué par une rareté des précipitations et leur irrégularité dans le temps et l'espace, ce qui affecte négativement la disponibilité des ressources en eau. Avec l'aggravation des contraintes climatiques et l'augmentation du taux de croissance démographique, ainsi que les transformations économiques et sociales, le pays a enregistré une augmentation notable de la demande en eau. Dans ces conditions, le recours à l'irrigation agricole est devenu une nécessité pour faire face à l'ampleur du déficit hydrique et renforcer l'expansion de l'activité agricole, alors que les ressources en eau disponibles demeurent limitées et insuffisantes pour répondre aux besoins croissants (Rouibah et Belabbas, 2022).

Dans ce contexte, la réutilisation des eaux usées est considérée comme l'une des solutions importantes disponibles, puisqu'elle consiste à utiliser des eaux traitées à différents usages. Les projets de réutilisation des eaux usées traitées contribuent à améliorer la gestion intégrée des ressources en eau et à préserver l'environnement. Ils représentent également une approche essentielle dans les pays arides et semi-arides partout dans le monde, où la concurrence pour l'eau entre les différents secteurs est particulièrement intense (Condom et al., 2012).

Par conséquent, la politique de valorisation des eaux usées traitées est devenue une exigence incontournable, car ces eaux, une fois épurées, peuvent constituer une ressource hydrique importante contribuant à réduire le déficit hydrique, notamment lorsqu'elles sont utilisées pour l'irrigation agricole (Djeddi, 2007).

La région d'El-Oued, comme une région saharienne algérienne, souffre aussi du manque d'eau et cherche une solution pour la gestion des eaux usées traitées produites journalièrement sans aucun usage durable et efficace pour accomplir les besoins hydriques de cette wilaya. D'après cette situation alarmante, notre problématique de recherche est d'estimer la qualité de ces eaux non conventionnelles et de voir si elles sont usables pour le secteur d'irrigation en respectant l'environnement et ne pas faire mal aux ouvriers qui ont contact avec cette source.

Notre travail vise à évaluer certaines caractéristiques des eaux usées traitées et étudier les effets de l'irrigation avec des eaux usées sur la croissance de certaines cultures agricoles répandues dans la région depuis plus de vingt ans.

Pour réaliser cette étude, nous avons structuré ce mémoire en deux parties complémentaires:

La première partie aborde le cadre théorique à travers une revue bibliographique complète, comprenant deux chapitres principaux:

- Chapitre 1 : Généralités sur les eaux usées traitées;

- Chapitre 2 : Effets de la réutilisation des eaux usées traitées.

La deuxième partie met l'accent sur l'aspect pratique, elle est exposée en chapitre 3. Ce chapitre est divisé en deux : la méthodologie adoptée, les protocoles analytiques utilisés. Et les résultats obtenus et la discussion détaillée.

Chapitre 01

Généralités sur les eaux usées traitées

Introduction partielle

Dans ce chapitre 1, intitulé « Généralités sur les eaux usées traitées », nous présentons les informations essentielles concernant ce type d'eau. Nous y abordons notamment l'origine des eaux usées, les procédés de leur traitement ainsi que les avantages liés à leur réutilisation. La réglementation et les modalités de gestion encadrant ces pratiques sont également examinées, de même que la définition précise des eaux usées traitées. Enfin, les limites et les risques potentiels associés à leur utilisation sont discutés.

Les détails sont dévoilés comme suit :

1 Définition des eaux usées traitées

Les eaux usées désignent tous les types d'eaux usées émises par diverses activités humaines (domestiques – commerciales – industrielles). On les appelle parfois eaux usées ou eaux usées car elles sont majoritairement transportées dans le réseau public d'égouts en Ville.

Les eaux usées constituent environ 80 % de l'eau douce consommée dans les villes. Il est composé d'environ 99% d'eau et...Diverses impuretés et polluants nocifs à un taux d'environ 1%. La quantité d'eaux usées rejetée dans le réseau public d'assainissement évolue avec l'évolution des taux de consommation d'eau et varie donc Ses versets varient selon les heures de la journée, les jours de la semaine, les mois ou les saisons de l'année (Asfari, 2004)

2. Origine des eaux usées

Les eaux usées ont des origines différentes, on distingue trois familles d'eaux usées :

2.1. Eaux domestiques

Il s'agit des eaux polluées résultant de l'utilisation humaine, comprenant l'eau issue des cuisines, des installations de lavage, des éviers, des salles de bains, des toilettes et des structures similaires. Cette eau contient également des micropolluants tels que des médicaments, des produits cosmétiques et des produits chimiques ménagers qui peuvent avoir des effets nocifs sur l'environnement et la santé humaine (Eme et Boutin, 2015).

2.2. Eaux industrielles

Comprennent toutes les eaux qui sont généralement rejetées par l'usine dans l'environnement extérieur, après avoir contribué à la fabrication, au nettoyage, au transport et au refroidissement (Woodard, 2001). Leurs caractéristiques varient d'une industrie à l'autre. En plus des substances organiques, azotées ou phosphorées, elles peuvent aussi renfermer des produits toxiques, des dissolvants, des métaux lourds, des micropolluants organiques et des hydrocarbures (Moussaoui et A Benhabib , 2015).

2.3. Eaux agricoles

L'agriculture est une source majeure de pollution de l'eau, contribuant à l'introduction d'engrais et de pesticides dans l'environnement. Lorsque l'eau agricole est chargée d'azote et de phosphore, le sol peut être incapable de l'absorber entièrement, ce qui entraîne un ruissellement de surface et une accumulation dans les aquifères, entraînant la pollution des rivières et des réservoirs (Metahri, 2012).

3. Traitement des eaux usées

3. 1. Étapes de traitement des eaux usées

3.1.1. Prétraitement

Est un processus physique visant à éliminer les matières grossières des eaux usées, qui pourraient provoquer l'obstruction des canalisations, dans le but de préserver les équipements et les étapes de purification suivantes (Fidele, 2020). Selon (Vandermeersch, 2006), ce processus se compose de 3 étapes qui sont :

3.1.1.1. Dégrillage

Le dégrillage a pour objectif d'éliminer les déchets solides de grande taille, son efficacité dépend de l'écartement des barreaux des grilles employées. D'après(Bali, 2024), il existe trois catégories principales de dégrillage selon cet espacement :

- Le pré-dégrillage, avec un intervalle de 30 à 100 mm ;
- Le dégrillage intermédiaire, où l'écartement des barreaux varie entre 10 et 30 mm ;
- Le dégrillage fin, avec un espacement inférieur à 10 mm.

3.1.1.2. Dessablage

Ce processus comprend un bassin où la diminution de la vitesse d'écoulement entraîne la décantation des sables, qui sont ensuite récupérés par pompage (Vandermeersch, 2006). Il a pour objectif de prévenir l'accumulation dans les canalisations, de protéger les composants mécaniques comme les pompes contre l'abrasion, et d'éviter toute perturbation des autres étapes du traitement (Bassompierre, 2007).

3.1.1.3. Dégraissage/Déshuilag

Le dégraissage est réalisé par flottation, permettant de séparer les particules grasses non solubles, qui représentent entre 10 % et 20 % des graisses totales. Quant au déshuilage, il consiste à éliminer les huiles présentes dans les eaux résiduaires industrielles par écumage, qu'il soit manuel ou mécanique (Fidele, 2020).

3.1.2. Traitement primaire

Le traitement initial est effectué par dépôt de substances en suspension dans le bassin de dépôt, ce qui permet de réduire la charge sur le traitement biologique subséquent en éliminant

une partie de ces solides (Vandermeersch, 2006). Le procédé est réalisé par des méthodes physico-chimiques, qui visent à éliminer autant de substances que possible et de matières organiques facilement déposables (Bassompierre, 2007).

3.1.3. Traitement secondaire

Est une méthode qui favorise la décomposition des contaminants grâce à l'action des micro-organismes. Ce processus se produit naturellement dans les environnements naturels, comme les eaux de surface contenant une quantité suffisante d'oxygène. Une diversité d'êtres vivants microscopiques intervient dans cette transformation, selon différents cycles de biodégradation. Parmi ces organismes, on retrouve notamment les bactéries, les algues, les champignons et les protozoaires (Dhaouadi, 2008).

3.1.4. Traitement tertiaire

Le traitement triple est une forme avancée de traitement, généralement après la séparation des solides des liquides et après le traitement biologique. Ces procédés comprennent diverses procédures physiques et chimiques qui complètent les phases de traitement primaire et secondaire. Un traitement avancé est utilisé lorsque l'élimination de certains composants des eaux usées est nécessaire, à la fois en raison de la toxicité de certains véhicules et pour réutiliser l'eau (Riffat, 2013).

3.2. Technologies de traitement

Les technologies pour le traitement des différents types d'eaux usées sont désormais adaptées aux nouveaux modes de consommation, et à l'utilisation des matières premières. Ces technologies sont également en phase avec les dernières contraintes environnementales. En effet, si les entreprises industrielles savent pertinemment que nos ressources en eau ne sont pas inépuisables, et sont conscientes de la nécessité de la traiter. L'assainissement des effluents est aujourd'hui réalisé de manière systématique. Les traitements doivent respecter toutes les normes de rejet afin d'envoyer dans le milieu naturel une qualité d'eau saine. Parmi ces variables traitement, on peut citer les suivants :

3.2.1. Technologies biologiques

3.2.1.1. Filtres biologiques

Les unités de filtration biologique sont constituées de bassins circulaires ou carrés où l'eau d'égout est distribuée (après avoir quitté le bassin de dépôt primaire) au moyen de tuyaux perforés qui tournent à une vitesse spécifique, comme ils circulent, l'eau jaillit des trous et tombe sur la surface des filtres, imprégnant les espaces de gravier, formant une couche semi-gel sur la surface du gravier, où cette couche de gel contient les finances des bactéries et des micro-organismes qui absorbent l'oxygène (trouvé dans l'air). Les pores du gravier) oxydent

les substances organiques et de temps en temps les gels perdent leur capacité à coller aux granulés de gravier et à s'engouffrer dans l'eau, ce qui nécessite l'utilisation de bassins de dépôt secondaires suivis de filtres pour stocker ces substances (Abd El-Sabour, 2000).

3.2.1.2. Boues activées

Le traitement des eaux usées par boues activées a été mis au point pour la première fois en 1914 à Manchester (Angleterre) par les scientifiques britanniques Edward Arden et William Lockett. Aujourd'hui, cette méthode est la plus couramment utilisée pour l'épuration des eaux usées urbaines, quelle que soit la taille des collectivités (Hauduc, 2010; Oliveira et al., 2017). Le procédé des boues activées est basé sur la promotion de la croissance de blocs bactériens dans un bassin alimenté avec les eaux usées à purifier (le bassin d'activation). Afin d'éviter le dépôt de ces blocs dans le bassin, il faut assurer un mouvement continu et robuste de l'eau. La prolifération des micro-organismes nécessite également une quantité suffisante d'oxygène (Dhaouadi, 2008). La figure (Figure 1) suivante présente cette technique.

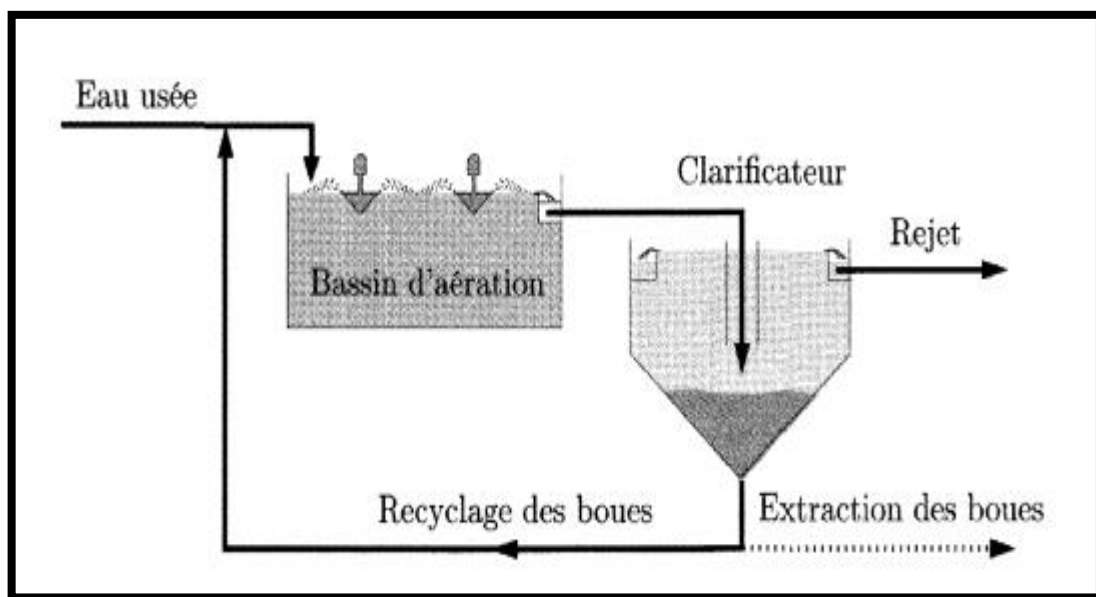


Figure 1 : Procédé de traitement à boues activées en bassin unique (Chachuat et al., 2003).

3.2.1.3. Disques biologiques

Les comprimés biologiques sont des réacteurs contenant des comprimés de plastique inerte qui circulent à l'intérieur d'un réservoir à débit constant, où ils produisent une biomasse active qui contribue à l'analyse des polluants dans les eaux usées. Ces comprimés sont submergés à 40 à 60 % et tournent à une vitesse d'un cycle par minute (Figure2.) Les bactéries agissent sur leur surface en absorbant l'oxygène lorsqu'elles sont exposées à l'air et en consommant de la matière organique lorsqu'elles sont immergées dans l'eau. Lorsque

l'épaisseur de la biomembrane augmente, se sépare automatiquement et se déplace vers le réservoir de dépôt secondaire pour le séparer de l'eau traitée (Bali, 2024).

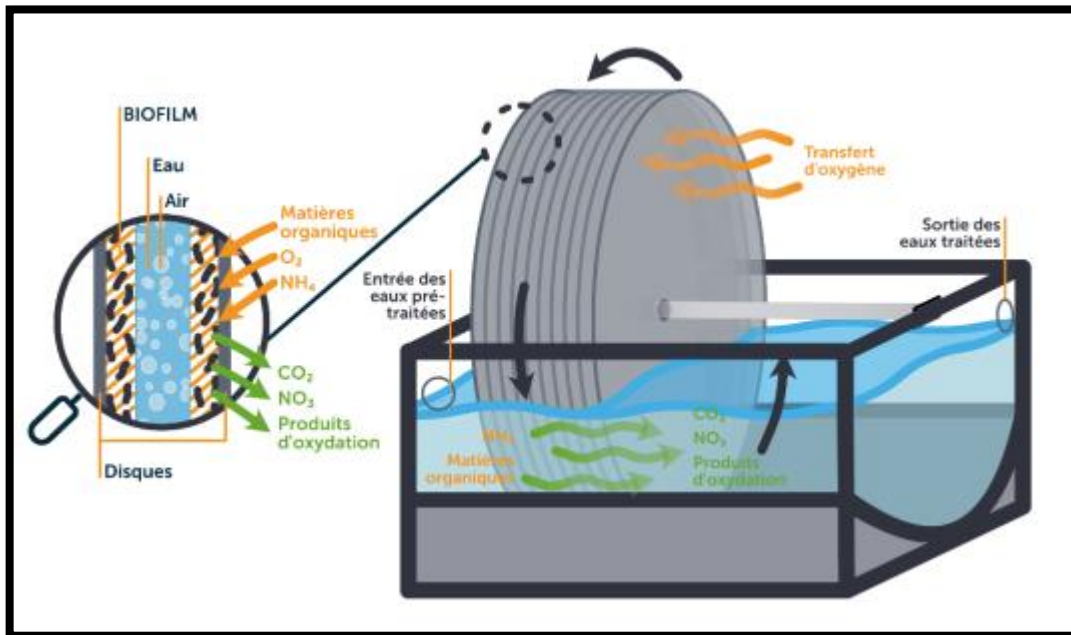


Figure 2 : schémas présente le principe du fonctionnement des disques biologiques (Bali, 2024).

3.2.1.4. Lit bactérien

La figure 3 Explique le principe des lits bactériens, ils sont des processus biologiques basés sur l'agriculture stationnaire (Fidele, 2020), parfois connu sous le nom de filtres bactériens ou filtres à goutte. Son principe de onctionnement est de faire en sorte que l'eau à traiter, après avoir été pré déposée, coulant sur une masse d'un matériau de surface large personnalisé, serve de pilier aux microorganismes purifiés (Hamid et al., 2014).

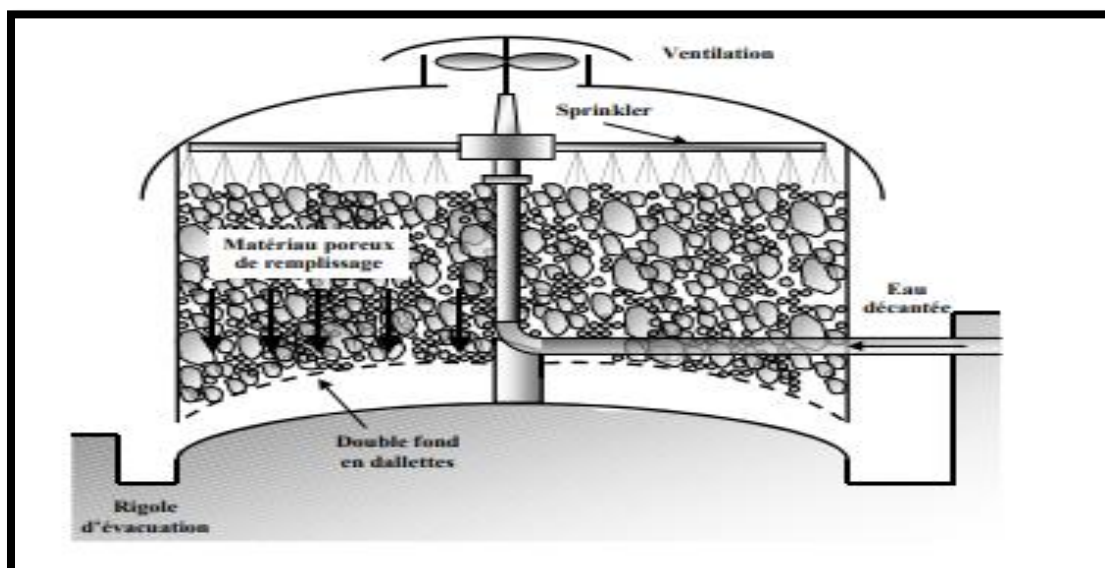


Figure 3: Schéma qui présente le principe d'un lit bactérien (Dhaouadi, 2008).

3.2.1.5. Lagunage

Le lagunage est un processus de traitement qui consiste à faire passer les eaux usées dans une série de bassins pendant une période suffisante pour compléter les processus naturels d'auto-purification. Ce système est appliqué dans des zones à fort rayonnement solaire, au sein de bassins peu profonds (Dhaouadi, 2008), il est à noter que cette technologie est utilisée dans la région de Kouinine (STEP-1) de la région d'El Oued. Le traitement par lagunage est classé en trois types : lagunage anaérobie, lagunage facultatif et lagunage de maturation (Ameera et al., 2023). La figure (figure 4) suivante donne Schéma typique d'un système de lagunage.

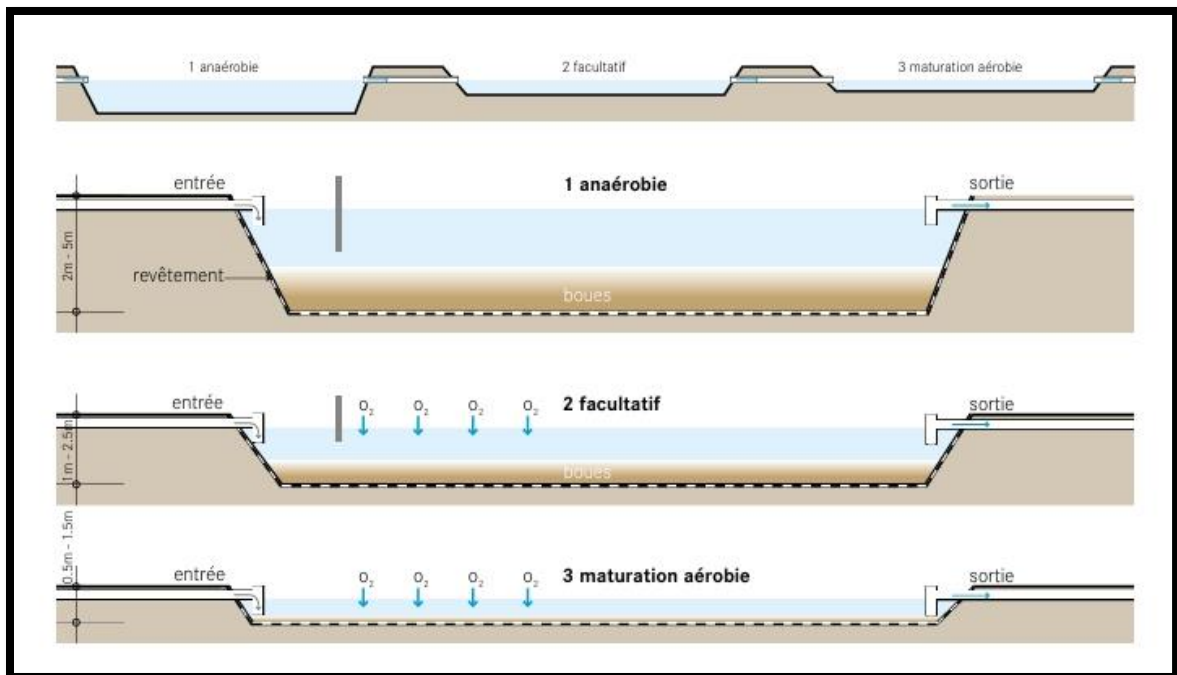


Figure 4 : Ssystème de lagunage : un bassin anaérobie, un bassin facultatif et un bassin pour la maturation aérobie (Tilley et al., 2009).

3.2.2 Technologies physico-chimiques

3.2.2.1. La décantation

Est un processus permettant d'éliminer jusqu'à 50 % des matières en suspension. Cette technique consiste à séparer les matières solides des liquides, où les particules solides se déposent au fond du bassin de décantation sous l'effet de leur masse (Bürger et Wendland, 2001).

3.2.2.2 La flottation

Est un procédé utilisé pour éliminer les particules qui sont moins denses que le liquide dans lequel elles se trouvent. Contrairement au dépôt, la flottabilité est une technique permettant de séparer les solides des liquides ou de séparer les liquides les uns des autres (Norström, 2005).

3.2.2.3 Coagulation et floculation

La coagulation est le processus physique par lequel les charges électriques à la surface des particules solides en suspension sont neutralisées par des charges opposées d'additifs des coagulants. Cela est suivi par la phase de floculation, qui entraîne l'agrégation des petites particules déchargées, conduisant ainsi à la formation de floes plus grands et plus denses (Vandermeersch, 2006).

4. Composition des eaux usées traitées

Les eaux traitées possèdent des compositions chimiques et physiques, on peut citer les suivant :

4.1. Macroéléments

4.1.1. Azote (N)

L'azote se trouve dans les eaux usées sous forme de composés organiques ou inorganiques, qu'ils soient réduits ou oxydés (Roig et al., 2001). Avec le durcissement des lois sur la quantité d'azote autorisée dans les eaux usées traitées, il est devenu important de mesurer différentes formes d'azote telles que les nitrates, les nitrites, l'ammoniac et l'azote glidal. La quantité d'azote dans les eaux usées varie généralement de 15 à 50 mg/L (Ghangrekar, 2022).

4.1.2. Phosphore (P)

Le phosphore est souvent présent dans les eaux usées sous forme de phosphate, qui se divise en : Orthophosphate, phosphates condensés et phosphates organiquement liés. Ces espèces se trouvent soit en solution, sous forme de particules ou de matériaux en décomposition, soit dans les corps d'organismes vivant en milieu aqueux. En ce qui concerne les eaux usées, les concentrations de phosphore varient généralement entre 4 mg/L et 15 mg/L (Maiti, 2004).

4.1.3. Potassium (K)

Le potassium est un nutriment essentiel qui contribue à améliorer la fertilité des sols et à accroître la productivité et la qualité des cultures. Les concentrations de potassium dans les eaux usées traitées peuvent être mesurées par l'analyse de K_2O . Il est donc important de tenir compte de ce montant lors de l'élaboration d'un programme d'engrais pour s'assurer que les besoins des cultures sont satisfaits de cet élément de manière équilibrée (FAO, 2003).

4.2. Microéléments

4.2.1. Métaux lourds

Les métaux lourds sont des éléments métalliques à haute densité qui sont potentiellement toxiques pour les organismes, même à de faibles concentrations. On le trouve dans les eaux usées provenant de sources naturelles (p. ex., dépôts minéraux) ou humaines (p. ex., déchets

industriels, produits agrochimiques...). Les métaux courants comprennent le plomb, le mercure, le cadmium, le chrome, le zinc et le cuivre. Leur présence est préoccupante car elles s'accumulent dans les organismes, affectant leur santé et leur bien-être (Tchounwou et al., 2012).

4.2.2. Pathogènes

Les eaux usées contiennent de nombreux micro-organismes, mais seulement une proportion limitée d'entre eux représentent une menace potentielle pour la santé humaine, en particulier ceux qui causent des maladies intestinales. Les types de microbes qui peuvent causer une infection comprennent les vers (parasites ressemblant à des vers), les parasites primaires, les bactéries et les virus. Certains de ces micro-organismes sont des agents pathogènes obligatoires, c.-à-d. qu'ils doivent provoquer la transmission d'une maladie d'hôte à hôte, tandis que d'autres sont des agents pathogènes opportunistes, Il peut parfois causer une maladie et pas d'autres fois (Press, 2012).

4.2.3. Résidues chimiques

Ce sont des produits pharmaceutiques qui sont classés comme polluants organiques émergents, se caractérisent par une grande diversité dans leurs propriétés physico-chimiques et sont utilisés dans différents domaines. Le nombre d'ingrédients actifs autorisés dans l'Union européenne est d'environ 3000. Ce qui distingue ces composés, c'est que la source de pollution est le consommateur lui-même, car ils sont transmis à l'environnement par la consommation puis éliminés par l'urine et les selles. Les eaux usées traitées dans les usines de traitement sont le principal outil qui transporte ces matériaux vers les environnements aquatiques, en plus de la présence d'autres sources telles que les industries pharmaceutiques et les médicaments vétérinaires (Thiebault, 2024).

5. Avantages de l'utilisation des eaux usées traitées

5.1. Réduction de la consommation des ressources en eau douce

La réutilisation des eaux usées traitée montre une ressource alternative qui augmente la ressource en eau et permet la flexibilité d'approvisionnement tout en diminuant la demande globale de population., exécution rapide et plus facile que la mobilisation de nouvelles ressources en eau de première main comme le dessalement des eaux de mer.Économiser l'eau potable pour la réserver aux usages domestiques .Recharge artificielle de nappe souterraine Contrôler la surexploitation des ressources, Prévenir les dommages aux écosystèmes aquatiques à la suite du déficit d'eau (Lazarova et Brissaud ,2003) .

5.2 Apport de nutriments pour les plantes

Utilisation des nutriments des eaux usées (Azote et Phosphore), Réduction de l'utilisation des, fertilisants synthétiques Amélioration des propriétés fertilisantes du sol Amélioration des propriétés chimiques du sol, Diminution des couts agricoles pour, l'approvisionnement en engrais grâce au, recyclage d'eau usée. (Fertilité et rendement du sol., Amélioration des caractéristiques physiques, du sol grâce à l'apport important de matière organique (Lazarova et Brissaud, 2003).

6. Limites et risques associés à l'utilisation des eaux usées traitées

6.1. Accumulation de contaminants dans les sols et les plantes

Dans le contexte de la réutilisation des eaux usées traitées en agriculture, plusieurs risques environnementaux doivent être pris en compte, notamment dans les régions arides et semi-arides. Parmi les risques les plus notables figure l'effet négatif de l'accumulation de certains éléments chimiques, tels que le bore, qui peut provoquer des brûlures foliaires et une réduction de la croissance des plantes, en particulier lorsqu'il est associé à une forte salinité, une condition connue sous le nom de "BorSal". L'excès de sodium constitue également un facteur de dégradation de la structure du sol, entraînant une diminution de sa capacité d'absorption et d'aération, ce qui nuit à la qualité agricole à long terme. De plus, l'irrigation avec des eaux riches en azote (nitrates et ammonium) et en chlore peut entraîner des accumulations nuisibles pour le sol et les nappes phréatiques, provoquant une baisse de la productivité agricole, en particulier pour les cultures sensibles. Bien que le sol possède une capacité naturelle d'absorption et d'auto-épuration, cette capacité demeure limitée, d'où la nécessité d'adopter des pratiques agricoles bien étudiées, telles que l'amélioration du drainage, le lessivage périodique des sols, ainsi que l'utilisation de matières organiques ou de chaux pour améliorer l'équilibre chimique et physique du sol. Les études récentes soulignent l'importance d'intégrer ces critères dans la conception de tout projet de réutilisation de l'eau, en mettant l'accent sur la surveillance de la salinité, de la toxicité et de la concentration des éléments nutritifs, afin d'éviter les dommages potentiels à l'environnement et à l'économie agricole (Legua, 2024).

6.2. Problèmes sanitaires : Pathogènes et métaux lourds

Les eaux usées, en particulier les eaux usées domestiques, contiennent des agents pathogènes qui peuvent provoquer la propagation de maladies lorsqu'elles ne sont pas gérées correctement.

Les projets d'épuration directe des eaux usées sont généralement concentrés à proximité des grandes zones urbaines. Ces projets n'utilisent souvent qu'un faible pourcentage des eaux

usées générées. Le résultat est que l'utilisation indirecte des eaux usées prévaut dans la plupart des pays en développement. L'utilisation indirecte se produit lorsque les eaux usées traitées, partiellement traitées ou non traitées sont rejetées dans des réservoirs, des rivières et des canaux qui alimentent l'agriculture en eau d'irrigation. Et ça forme L'utilisation indirecte présente les mêmes risques pour la santé que les projets de traitement des eaux usées planifiés, mais peut présenter un plus grand potentiel de problèmes de santé car l'utilisateur de l'eau n'est pas conscient de la présence des eaux usées. L'utilisation indirecte est susceptible de se développer rapidement à l'avenir, dans la mesure où la croissance de la population urbaine dépasse les ressources financières nécessaires à la construction de stations d'épuration suffisantes. En cas d'utilisation indirecte, cela doit être l'objectif principal L'objectif principal devrait également être de veiller à ce que cela se produise de manière à réduire ou à éliminer les risques potentiels pour la santé. Les risques sanitaires associés à l'utilisation directe et indirecte des eaux usées sont de deux types : le problème de santé et de sécurité dans les zones rurales pour ceux qui travaillent la terre ou vivent sur ou à proximité des terres où l'eau est utilisée, et le risque que les produits contaminés provenant de la zone d'utilisation des eaux usées puissent ultérieurement infecter les humains ou les animaux par la consommation ou la manipulation d'aliments ou par contamination humaine Secondaire en consommant de la nourriture provenant d'animaux qui utilisent la zone. Les eaux usées ou les sources d'eau naturelles dans lesquelles les eaux usées ont été rejetées sont susceptibles de contenir des organismes pathogènes similaires à ceux trouvés dans les déchets humains d'origine. Et j'étais concentré Les programmes de prévention des maladies se sont concentrés sur quatre groupes d'agents pathogènes potentiellement présents dans ces déchets : les bactéries, les virus, les protozoaires et les helminthes (fao.org, n.d).

Les eaux usées non traitées contient souvent une large gamme de contaminants provenant de sources municipales, agricoles et industrielles. Les agents pathogènes liés aux excréments, les irritants cutanés et les produits chimiques toxiques provenant de ces sources présentent des risques pour la santé pour les agriculteurs et les travailleurs agricoles, leurs familles, les communautés vivant à proximité de l'irrigation des eaux usées, ainsi que des consommateurs de cultures irritées par les eaux usées L'exposition aux eaux usées a été liée aux maladies virales, bactériennes et protozoaires telles que la salmonellose, la shigellose, le choléra, la giardiase, l'amibiase, l'hépatite A, l'entérite virale et d'autres maladies diarrhéiques En particulier, les infections aux helminthes telles que l'ascariase sont généralement associées à l'exposition aux eaux usées et sont liées à l'anémie et à un développement physique et cognitif altéré En raison du contact fréquent avec des eaux usées non traitées, les travailleurs agricoles souffrent

également de maladies cutanées telles que la dermatite et les éruptions cutanées. L'exposition à des métaux lourds, notamment l'arsenic, le cadmium, le plomb et le mercure en raison d'une consommation prolongée d'aliments contaminés ou d'une ingestion professionnelle ou de l'inhalation de sol irrigué est lié à un large éventail d'effets chroniques sur la santé. Par exemple, l'accumulation de cadmium, en particulier dans les reins, entraîne des lésions rénales et une ostéoporose. Ceci est connu sous le nom de maladie Itai-Itai au Japon, où la condition était à l'origine liée à l'irrigation des rizières avec de l'eau hautement contaminée. Les contaminants émergents des eaux usées, notamment des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), des produits de soins personnels et des produits chimiques perturbants endocriniens présentent des risques potentiels pour la santé; Cependant, des informations limitées sont disponibles sur leur adoption dans les aliments. En raison de ces risques généralisés pour la santé, des organisations telles que l'OMS ont élaboré des directives pour garantir que les niveaux de contaminants dans les eaux usées sont inférieurs aux limites nocives pour la santé humaine). Cependant, comme les étapes de traitement complètes peuvent ne pas être possibles, les directives de l'OMS fournissent des cibles progressives pour différentes situations d'eaux usées. Les industries rejettent dans l'environnement des polluants chimiques comme les métaux lourds, causant des effets nocifs en pathologie humaine avec dans certains cas des phénomènes toxiques. Entre 1953 et 1960 à MINAMATA au Japon, 111 personnes sont mortes ou ont été gravement intoxiquées à la suite de l'absorption de poissons, mollusques et crustacés renfermant des taux élevés de mercure organique. La maladie de ITAI-ITAI ou OUCH-OUCH au Japon, résultant d'une contamination par le cadmium. Depuis, l'idée d'une intoxication chronique causée par les métaux lourds a pris naissance chez les écotoxicologues et les toxicologues (Habib et El Rhazi, 2007).

6.3. Effets à long terme sur l'environnement

L'utilisation des eaux usées pour l'irrigation a des impacts potentiels sur la qualité des ressources en eau à long terme, car les sels et les métaux lourds peuvent s'infiltrer du sol dans les eaux souterraines, provoquant ainsi leur pollution. Certaines substances pouvant être présentes dans les eaux usées de telles concentrations qu'ils sont toxiques pour les plantes où conduire, à un dégât environnemental. En raison de la salinité élevée dans l'eau usée il peut résulter certains effets négatifs sur le sol et sur les plantes ce qui entraînerait une chute de la production végétale et même une dégradation des sols par accumulation de sel. Contamination de sol par salinité, métaux lourds et organismes pathogènes. Transfère des contaminants vers les cultures récoltées (Durán-Álvarez and Jiménez-Cisneros, 2014).

7. Utilisation des eaux usées traitées dans les zones sèches et désertiques

7.1 Possibilités d'utilisation dans les écosystèmes secs

Dans les régions arides et semi-arides, les eaux usées traitées sont une source environnementale, sociale et économique (Dawoud et al., 2012). L'arrosage des cultures agricoles en utilisant cette eau est une habitude courante dans ces régions et est de plus en plus acceptée dans les pays arabes (Dawoud et al., 2012). L'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation agricole a reçu une attention mondiale (Zang et al., 2021), avec environ 20 millions d'hectares actuellement irrigués avec des eaux usées traitées dans 50 pays (Mahfooz et al., 2025). Une étude a révélé que l'utilisation d'eaux usées traitées a provoqué des changements biochimiques, physiologiques et agronomiques significatifs dans les plantes d'orge, ce qui suggère que ce type d'eau pourrait être une alternative durable pour la production d'orge dans les régions arides et semi-arides (Alvarez-Holguin et al., 2022).

7.2. Etude de cas dans des environnements désertiques

Le volume des eaux usées domestiques en Iran dépasse 18 milliards de mètres cubes et devrait atteindre 40 milliards de mètres cubes. La capacité maximale des rivières à évacuer les eaux usées est de six milliards de mètres cubes, ce qui est nettement inférieur à la quantité d'eaux usées produite en Iran. La plupart des régions de l'Iran, en particulier le sud, sont arides et ont peu de précipitations annuelles, donc RRW pour l'agriculture est une stratégie adoptée pour augmenter l'approvisionnement en eau. En raison des pénuries d'eau dans différentes parties de l'Iran, il est pris en charge. Les besoins en nourriture et en eau des communautés urbaines en croissance exigent du secteur agricole non seulement d'augmenter la production alimentaire mais aussi de réduire son utilisation des ressources naturelles en eau. Les projets de réutilisation des eaux usées ont été d'une importance particulière. L'étude suivante a été menée dans la région du Sistan et du Baloutchistan, qui sont des zones désertiques avec un climat sec et chaud et caractérisées par des vents violents qui ont causé l'assèchement de nombreux lacs et rivières, ce qui a conduit à une pénurie de ressources en eau, car l'eau traitée a été réutilisée pour l'irrigation. Cette étude a conclu à la faisabilité de réutiliser les eaux usées traitées provenant des installations de traitement des eaux usées dans ces gouvernorats dans le cadre de la gestion des déchets. Cette étude a été menée dans l'application d'un modèle de réseau neuronal artificiel qui adopte un algorithme de rétropropagation avec impulsion et taux d'apprentissage adaptatif pour comparer l'effet de chaque paramètre sur la performance du projet. Les propriétés chimiques du sol après irrigation avec de l'eau traitée se sont améliorées pour atteindre la plage standard dans les deux zones, où le pourcentage de sels minéraux dans

le sol a augmenté, ainsi que la valeur PH. Une croissance et un développement optimaux de la plante pistache ont également été observés, avec quelques problèmes résolus en changeant le système d'irrigation)(Gholikandi et Khosravi, 2025)

8. Réglementation et gestion des eaux usées traitées

8.1. Normes nationales

La réutilisation des eaux usées non traitées est formellement interdite par la loi n° 83-03 du 5 février 1983, relative à la protection de l'environnement et la loi n° 83-17 du 16 juillet 1983, portant le code des eaux. Les valeurs maximales de rejets d'effluents liquides par les établissements industriels sont définies par le décret 93-160 du 10 juillet 1993 qui charge également les Inspections de l'Environnement des wilayas (IEW) d'effectuer les contrôles.

En 2012, l'Algérie a publié la décision ministérielle conjointe du janvier 2012, qui établit le cadre réglementaire pour les spécifications des eaux usées traitées utilisées à des fins d'irrigation. Cette décision vise à réglementer la réutilisation de cette eau dans l'ensemble du pays, tout en assurant les normes les plus élevées de sécurité et d'efficacité dans les applications d'irrigation agricole (Arrêté interministériel, 2012).

Les eaux usées épurées ont des spécifications utilisées à des fins d'irrigation comme les:

8.1.1. Paramètres microbiologiques

Ces paramètres présentés dans le tableau (1) donnent les critères microbiologiques exigés par l'état algérien. Les numéros ci-dessous montrent les détails liés à la réutilisation appropriée de ce type d'eau, en fonction des catégories de cultures et d'arbres pouvant être irrigués avec des eaux usées traitées :

(1) L'irrigation doit s'arrêter deux semaines avant la cueillette. Aucun fruit tombé ne doit être ramassé sur le sol. L'irrigation par aspersion est à éviter.

(2) Le pâturage direct est interdit et il est recommandé de cesser l'irrigation au moins une semaine avant la coupe.

(3) Pour les cultures industrielles et arbres forestiers, des paramètres plus permissifs peuvent être adoptés.

(4) Une directive plus stricte (<200 coliformes fécaux par 100 ml) est justifiée pour l'irrigation des parcs et des espaces verts avec lesquels le public peut avoir un contact direct, comme les pelouses d'hôtels.

(5) Exige une technique d'irrigation limitant le mouillage des fruits et légumes.

(6) A condition que les ouvriers agricoles et la population alentour maîtrisent la gestion de l'irrigation localisée et respectent les règles d'hygiène exigées. Aucune population alentour.

Tableau 1 : Standards algériennes microbiologiques de réutilisation des eaux usées en irrigation (Arrêté interministériel, 2012).

Groupes Cultures	Paramètres microbiologiques	
	Coliformes fécaux (CFU/100 ml) (moyenne géométrique)	Nématodes intestinaux (œufs/1) (moyenne arithmétique)
Irrigation non restrictive. Culture de produits pouvant être consommés crus.	<100	Absence
Légumes qui ne sont consommés que cuits. Légumes destinés à la conserverie ou à la transformation non alimentaire	<250	<0,1
Arbres fruitiers (1). Cultures et arbustes fourragers (2). Cultures céréalières. Cultures industrielles (3). Arbres forestiers. Plantes florales et ornementales (4).	Seuil recommandé <1000	<1
Cultures du groupe précédent (CFU/100ml) utilisant l'irrigation localisée (5) (6).	Pas de norme recommandée	Pas de norme recommandée

8.2.3. Paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques de l'eau usée (Tableau 2 et 3) caractérisent sa qualité et permettent de déterminer les méthodes de traitement appropriées de cette eau. Ces paramètres incluent des éléments physiques tels que la température, la couleur, la turbidité et les matières en suspension, et aussi des éléments chimiques tels que la demande chimique en oxygène (DCO), la demande biologique en oxygène (DBO), le pH, les nutriments (azote, phosphore...), les métaux lourds et les chlorures comme présente le tableau (2) et (3).

Tableau 2: Standards Algériennes physico-chimiques de réutilisation des eaux usées traitées (Arrêté interministériel, 2012).

Paramètres		Unité	Concentration maximale admissible
Physiques	PH	–	$6.5 \leq \text{pH} \leq 8.5$
	MES	mg/l	30
	CE	ds/m	3
	Infiltration le SAR = 0 - 3CE	ds/m	0.2
	3 – 6		0.3
	6 – 12		0.5
	12 – 20		1.3
20 – 40		3	
Chimiques	DBO5	mg/l	30
	DCO	mg/l	90
	CHLORURE (Cl)	meq/l	10
	AZOTE (NO ₃ - N)	mg/l	30
	Bicarbonate (HCO ₃)	meq/l	8.5

Tableau 3 : Standards Algériennes des éléments toxiques de réutilisation des eaux usées traitées pour les sols à texture fine, neutre ou alcalin (Arrêté interministériel, 2012).

Paramètres	Unité	Concentration maximale admissible	
Eléments toxiques (*)	Aluminium	mg/l	20.0
	Arsenic	mg/l	2.0
	Béryllium	mg/l	0.5
	Bore	mg/l	2.0
	Cadmium	mg/l	0.05
	Chrome	mg/l	1.0
	Cobalt	mg/l	5.0
	Cuivre	mg/l	5.0
	Cyanures	mg/l	0.5
	Fluor	mg/l	15.0
	Fer	mg/l	20.0
	Phénols	mg/l	0.002
	Plomb	mg/l	10.0
	Lithium	mg/l	2.5
	Manganèse	mg/l	10.0
	Mercure	mg/l	0.01
	Molybdène	mg/l	0.05
	Nickel	mg/l	2.0
	Sélénium	mg/l	0.02
	Vanadium	mg/l	1.0
Zinc	mg/l	10.0	

8.2. Normes internationales

Dans cas des normes internationales, on a visé 3 exemples : les normes européennes, les normes de Moyen-Orient, normes de l'Afrique du Nord.

8.2.1. Norme européenne

En 2020, l'Union européenne a adopté de nouvelles lois fixant les taux de concentration des éléments associés à la réutilisation des eaux usées traitée (Europ et al., 2020), comme le montrent les tableaux 4, 5 et 6.

Les étoiles ci-dessous présentent les précisions concernant la réglementation européenne de 2020 sur les taux de concentration liés à la réutilisation des eaux usées traitées, ainsi que les

conditions applicables selon les techniques et catégories d'irrigation mentionnées dans les tableaux 4.

(*) Si le même type de cultures irriguées relève de plusieurs catégories du tableau 1, les exigences de la catégorie la plus stricte s'appliquent.

(**) L'irrigation goutte-à-goutte est un système de micro-irrigation permettant d'apporter des gouttes d'eau ou de petits filets d'eau aux plantes et consistant à laisser goutter l'eau sur le sol ou directement sous sa surface à un débit très faible (2-20 litres/heure) à partir d'un système de tuyaux en plastique de petit diamètre équipés de sorties appelées émetteurs ou goutteurs.

(***) Dans le cas des méthodes d'irrigation par aspersion, il convient de veiller tout particulièrement à protéger la santé des travailleurs et des autres personnes présentes. Des mesures préventives appropriées sont appliquées à cet effet.

Tableau 4 : Classes de qualité de l'eau de récupération et usage et méthode d'irrigation agricoles autorisés (Europ et al., 2020).

Classe minimale de qualité d'eau de récupération	Catégorie de cultures (*)	Méthode d'irrigation
A	Toutes les cultures vivrières consommées crues dont la partie comestible est en contact direct avec l'eau de récupération et les plantes sarclées consommées crues	Tous les méthodes d'irrigation
B	Cultures vivrières consommées crues dont la partie comestible est cultivée en surface et n'est pas en contact direct avec l'eau de récupération, cultures vivrières transformées et cultures non vivrières, y compris cultures servant à l'alimentation des animaux producteurs de lait ou de viande	Toutes les méthodes d'irrigation
C	Cultures vivrières consommées crues dont la partie comestible est cultivée en surface et n'est pas en contact direct avec l'eau de récupération, cultures vivrières transformées et cultures non vivrières, y compris cultures servant à l'alimentation des animaux producteurs de lait ou de viande	Irrigation goutte-à-goutte (**) où autre méthode d'irrigation permettant d'éviter un contact direct avec la partie comestible des cultures
D	Cultures industrielles, cultures énergétiques et cultures semencières	Toutes les méthodes d'irrigation (***)

Tableau 5 : Exigences de qualité applicables à l'eau de récupération destinée à l'irrigation agricole (Europ et al., 2020).

Classe de qualité de l'eau de récupération	Objectif technologique indicatif	Exigences de qualité				
		E. coli (nombre/100 ml)	DBO 5 (mg/l)	MES (mg/l)	Turbidité (NUT)	Autre
A	Traitement secondaire, filtration et désinfection	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 5	Legionella spp.: < 1 000 ufc/l lorsqu'il existe un risque de formation d'aérosols Nématodes intestinaux (œufs d'helminthes): ≤ 1 œuf/l pour l'irrigation des pâturages ou des fourrages
B	Traitement secondaire et désinfection	≤ 100	Conformement à la directive 91/271/CEE	Conformément à la directive 91/271/CEE	–	
C	Traitement secondaire et désinfection	$\leq 1\ 000$			–	
D	Traitement secondaire et désinfection	$\leq 10\ 000$			–	

Tableau 6: Surveillance de validation de l'eau de récupération destinée à l'irrigation agricole (Europ et al., 2020).

Classe de qualité de l'eau de récupération	Microorganismes indicateurs (*)	Objectifs de performance de la chaîne de traitement (réduction log ₁₀)
A	E. coli	≥ 5,0
	Coliphages totaux/coliphages F-spécifiques/coliphages somatiques/coliphages (**)	≥ 6,0
	Spores de Clostridium perfringens/bactéries anaérobies sulfito-réductrices et leurs spores (***)	≥ 4,0 (dans le cas de spores de Clostridium perfringens) ≥ 5,0 (dans le cas de bactéries anaérobies sulfito réductrices et leurs spores)

(*) Les pathogènes de référence *Campylobacter*, rotavirus et *Cryptosporidium* peuvent aussi être utilisés pour la surveillance de validation, à la place des microorganismes indicateurs proposés. Les objectifs de performance suivants, exprimés en réduction log₁₀, doivent dans ce cas s'appliquer : *Campylobacter* (≥ 5,0), rotavirus (≥ 6,0) et *Cryptosporidium* (≥ 5,0).

(**) Les coliphages totaux sont choisis comme étant l'indicateur viral le plus approprié. Cependant, si l'analyse des coliphages totaux est impossible, au moins l'un d'entre eux (les coliphages F-spécifiques ou les coliphages somatiques) doit être analysé.

(***) Les spores de *Clostridium perfringens* sont choisies comme étant l'indicateur de protozoaires le plus approprié. Cependant, les bactéries anaérobies sulfito-réductrices et leurs spores offrent une solution de remplacement si la concentration de spores de *Clostridium perfringens* ne permet pas de valider la réduction log₁₀ requise (Europ et al., 2020).

8.2.2. Arabie Saoudite

Le tableau 7 présente les valeurs limites admissibles des eaux usées traitées qui sont réutilisées dans les opérations d'irrigation en Arabie saoudite.

Tableau 7 : Paramètres physico-chimiques de réutilisation d'eau usée traitée en irrigation en Arabie Saoudite (Alkhudhiri et al., 2019).

Paramètres	Unité	Valeur maximale
Turbidité – NTU	NTU	5
PH		6-8
Matériaux flottants		Absent
Demande biochimique d'oxygène (DBO)	Ppm	10
Demande chimique en oxygène (DCO)	Ppm	20
Total des solides en suspension (TSS)	Ppm	40
Huile et graisse	Ppm	Absent
Sel dissous totaux (TDS)	Ppm	2500
NO ₃ -N	Ppm	10
Phénol	Ppm	0.002
Arsenic (As)	Ppm	0.1
Plomb (Pb)	Ppm	0.1
Mercure (Hg)	Ppm	0.001
Zinc (Zn)	Ppm	0.2
Aluminium (Al)	Ppm	4
Fer (Fe)	Ppm	5
Argent (Ag)	Ppm	0.2
Cuivre (Cu)	Ppm	0.4
Chrome (Cr)	Ppm	0.1

8.2.3. Maroc

Le tableau 8 présente l'aspect bactériologiques, en indiquant les limites admissibles pour les concentrations de chaque élément examiné dans les eaux usées traitées dans le but d'utilisation à des fins d'irrigation.

Tableau 8: exigences bactériologiques marocaines pour l'irrigation avec les l'eaux usées traitées (SEEE, 2007).

Paramètres	Valeurs limites
Coliformes fécaux	1000/100 ml*
Salmonelle	Absence dans 5 L
Vibron Cholérique	Absence dans 450 ml

Sur le plan parasitologique, le tableau 8 ci-dessous présente les concentrations maximales autorisées pour chaque composant analysé dans les eaux usées traitées avant leur utilisation à des fins d'irrigation.

Tableau 9: norme marocaine des paramètres parasitologiques pour l'irrigation avec les l'eaux usées traitées (SEEE, 2007).

Paramètres	Valeurs limites
Parasites pathogènes	Absence
Œufs, kystes de parasites	Absence
Larves d'ankylostomides	Absence
Fluococercaires de <i>Schistosoma haematobium</i>	Absence

Pour l'aspect toxique, le tableau suivant (tableau10) présente les concentrations maximales admissibles de chaque élément examiné dans les eaux usées traitées avant leur utilisation à des fins d'irrigation.

Tableau 10: valeurs limites des éléments trace métalliques dans les eaux usées traitées pour l'irrigation (SEEE, 2007)

Paramètres	Valeurs limites
Mercure (Hg) en mg/l	0.001
Cadmium (Cd) en mg/l	0.01
Arsenic (As) en mg/l	0.1
Chrome total (Cr) en mg/l	1
Plomb (Pb) en mg/l	5
Cuivre (Cu) en mg/l	2
Zinc (Zn) en mg/l	2
Sélénium (Se) en mg/l	0.02
Fluor (F) en mg/l	1
Cyanures (CN) en mg/l	1
Phénols en mg/l	3
Aluminium (Al) en mg/l	5
Béryllium (Be) en mg/l	0.1
Cobalt (Co) en mg/l	0.5
Fer (Fe) en mg/l	5
Lithium (Li) en mg/l	2.5
Manganèse (Mn) en mg/l	0.2
Molybdène (Mo) en mg/l	0.01
Nickel (Ni) en mg/l	2
Vanadium (V) en mg/l	0.1

En termes physico chimique, le tableau suivant (tableau11) indique les concentrations maximales admissibles de chaque élément examiné dans les eaux usées traitées avant leur utilisation pour l'irrigation.

Tableau 11: normes marocaines des paramètres physico chimiques (SEEE, 2007).

Paramètres	Valeurs limites
Salinité total (STD) en ml/l	7680
Conductivité électrique (CE) en mS/cm à 25°C**	12
Infiltration	
Le SAR***=0-3 et CE=	<0,2
Le SAR***=3-6 et CE=.	<0,3
Le SAR***=6-12 et CE=	<0,5
Le SAR***=12-20 et CE=	<1,5
Le SAR***=20-40 et CE=	<3

(*) 1000 CF/100 ml pour les cultures consommées crues. (**) à partir d'une conductivité électrique de m mS/cm, une eau nécessite des restrictions sévères pour l'irrigation, mais des rendements de 50% du rendement potentiel peuvent être réalisés avec des eaux de 8,7 mS/cm (cas de l'orge). *** SAR = Sodium Absorption Ratio (coefficient d'absorption du sodium)(SEEE, 2007).

Conclusion

En résumé, ce premier chapitre a permis de poser les bases nécessaires à la compréhension des eaux usées traitées, en définissant leurs caractéristiques, leurs usages potentiels et les réglementations qui encadrent leur réutilisation. Ces éléments composent un socle important pour aborder, dans le chapitre suivant, lié à leur gestion et à leur valorisation.

Chapitre 02

Effets de la réutilisation des eaux usées traitée

Introduction partielle

L'Afrique du Nord et le Moyen-Orient sont parmi les régions les plus arides du monde, ne possédant que 1% des ressources mondiales en eau douce. Cette pénurie sévère a entraîné une dépendance du secteur agricole au eau usée traitée en raison du manque de sources alternatives d'eau douce pour l'irrigation (Qadir et al., 2010). De ce fait, la réutilisation des eaux traitées est devenue une solution prometteuse pour atténuer la crise de rareté de l'eau (M. A. Dawoud et al., 2012).

Bien que certaines régions touchées par la sécheresse soient obligées à l'utilisation des eaux usées traitées, cette pratique présente à la fois des aspects positifs et négatifs, parmi lesquels on peut citer les suivants :

1. Effets positifs sur le sol

1.1. L'augmentation de la teneur en matières organiques

Les eaux usées traitées sont connues pour être riches en substances organiques, tout en contenant des communautés bactériennes qui participent à l'amélioration de cette teneur organique dans le développement de sol (Condom et al., 2012). Farhadkhani et al. (2018) ont noté qu'une augmentation de la teneur en matière organique a été enregistrée dans le sol qui a été irrigué avec des eaux usées traitées.

1.2. Amélioration de la structure

la présence de matière organique et de micro-organismes dans les eaux usées aide à la formation et à la stabilité des agrégats dans le sol (Durán-Álvarez et Jiménez-Cisneros, 2014).

Martens et Frankenberger (1992) ont souligné dans ses études que l'augmentation de l'activité microbienne dans le sol en raison du pourcentage élevé de carbone organique résultant de l'utilisation des eaux usées affecte positivement la stabilité des amas de sol.

De plus, les eaux usées contiennent d'autres composantes qui contribuent aussi à la stabilité du sol, tels que le calcium et le magnésium. Ces éléments contribuent à la formation de substrats fins grâce aux liaisons cationiques entre l'argile et la matière organique (Durán-Álvarez et Jiménez-Cisneros, 2014).

1.3. Accroissement de l'activité microbienne

Plusieurs études ont montré que l'activité microbienne dans le sol irrigué avec des eaux usées est beaucoup plus élevée par rapport au sol irrigué avec l'eau naturelle. Il a été noté une augmentation remarquable du nombre de certains micro-organismes dans le sol irrigué avec des eaux usées comparé au sol non irrigué. Le pourcentage de bactéries polychètes a augmenté de 234 %, celui des bactéries oligotrophes de 217 %, et celui des actinomycètes également de 234% (Durán-Álvarez et Jiménez-Cisneros, 2014).

L'activité microbienne accrue aide à accélérer la décomposition de la matière organique et la formation de substances humiques, ce qui permet d'améliorer la fixation du carbone organique du sol et ainsi d'améliorer la fertilité du sol (Gans et al., 2005)..

1.4. Amélioration de la capacité de rétention d'eau

Selon plusieurs facteurs comme le type de sol, le climat, et la quantité d'eau utilisée, les eaux usées traitées affectent le taux d'humidité de sol. L'étude de Abdelrahman et al. (2011) a indiqué que les sols irrigués avec des eau usées traitées conservent une humidité plus élevée par rapport aux sols irrigués avec la même quantité d'eau douce. De plus, Abou Jaoude et al. (2025) ont montré que le taux moyen d'humidité du sol était d'environ 6 % dans les sols irrigués avec des eaux usées traitées et 4,8 % dans les sols irrigués avec les eaux fraîches.

2. Effets négatifs sur le sol

2.1. Risque de contamination du sol

L'un des inconvénients les plus notables de la réutilisation des eaux usées traitées est le risque de contamination du sol (Durán-Álvarez et Jiménez-Cisneros, 2014), car il contient des éléments chimiques nocifs dissous dans cette eau, tels que le chlorure et le sodium, peuvent s'accumuler et provoquent la salinité de sol irrigué (Isambert et al., 2023).

L'un des facteurs déterminants les plus importants pour déterminer si l'eau d'irrigation est appropriée est la salinisation. Plus le pourcentage de sels présents dans l'eau traitée est élevé, plus cela a un impact négatif sur la croissance des plantes. Les sels dissous dans l'eau, ou le total des sels dissous, provoquent une pression osmotique élevée, ce qui entraîne une diminution de la disponibilité en eau pour les plantes et un retard de croissance du sel Cultures intolérantes En raison des niveaux élevés d'ammoniac et de chlore et des concentrations toxiques de métaux lourds et de polluants organiques, on observe également une accumulation progressive de polluants dans les plans d'eau métabolisés qui ne devient visible qu'au-delà d'un certain seuil (Zainith et al., 2016).

Des problèmes de salinité se produisent lorsque ces sels sont concentrés dans la zone racinaire, ce qui limite la capacité des plantes à absorber l'eau et les nutriments. Ils affectent également négativement la stabilité des blocs et la structure du sol. Les niveaux élevés de sodium entraînent une diminution de la perméabilité, et le sodium se produit en raison des processus d'expansion et de dispersion sur l'argile à la suite de la destruction des blocs Certaines études ont également observé que les changements dans la salinité génèrent une augmentation de la compaction du sol et réduisent le taux d'infiltration d'eau, et, par conséquent, les microbes du sol sont affectés négativement (Jaramillo, 2017).

2.2. Accumulation de métaux lourds

Les métaux lourds contribuent à la détérioration systématique de la qualité du sol (Rezapour et al., 2019), entraînant une baisse de la productivité du sol. Cela est dû aux niveaux élevés de ces métaux dans les eaux usées traitées et à la difficulté de leur décomposition, ce qui conduit à leur présence prolongée dans le sol (Klay et al., 2010 ; Eckert et al., 2018), en particulier des éléments tels que le cuivre, le zinc et le cadmium (Singh et Kumar, 2006). Khaskhoussy et al., (2015) et Fang et al., (2017) ont confirmé que l'irrigation avec des eaux usées traitées entraînait une augmentation des concentrations de métaux lourds tels que le plomb et le nickel dans le sol. Cette augmentation des métaux lourds disponibles est un obstacle majeur, car elle a un impact négatif sur les propriétés et la qualité du sol.

3. Effets positifs sur le secteur agricole

Il ne fait aucun doute que l'utilisation des eaux usées pour l'irrigation présente de nombreux avantages, d'autant plus que cette eau est devenue une alternative puissante à l'époque actuelle pour résoudre le problème de la rareté de l'eau, mais les risques pour la santé de cette eau ne peuvent pas être ignorés. Parmi les effets positifs on a :

3.1. Réduction de l'utilisation des fertilisants chimiques

Les eaux usées traitées peuvent apporter des éléments nutritifs essentiels au sol, leur usage comme source de fertilisation doit être gérée avec précaution. Les cultures absorbent ces éléments sous forme d'ions. Les eaux usées traitées contiennent généralement de l'azote sous forme d'ammonium (NH_4^+) et de nitrate (NO_3^-), qui sont des formes facilement utilisables par les plantes. Aussi, le phosphore est souvent présent dans les eaux usées traitées sous forme de phosphates, qui peuvent être absorbés par les racines des plantes. Le potassium est un autre élément majeur trouvé dans les eaux usées traitées et est essentiel pour de nombreuses fonctions des plantes. (Ganjegunte, Ulery, Niu, et Wu, 2019; Saini, Kumar, Thomas, et Jayanthi, 2021)

Le pourcentage d'éléments minéraux dans l'eau traitée peut être de 50 mg/L pour l'azote, 10 mg/L pour le phosphore et 30 mg/L pour le potassium (FAO, 2002).

3.2. Amélioration du rendement

L'eau traitée contribue à fournir un moyen alternatif d'eau et à réduire le stress hydrique. Dans les zones où l'eau est rare, l'eau traitée fournit une source d'irrigation stable qui réduit la dépendance à l'égard des eaux souterraines, qui peuvent être limitées ou coûteuses (Ofori et al., 2024). L'irrigation par les eaux souterraines peut également améliorer la croissance des plantes, la biomasse ou la capacité de production, et dans de nombreux cas sans utiliser d'engrais supplémentaires et en plus petite quantité, qui améliore l'efficacité économique. Les matériaux organiques présents dans l'eau traitée peuvent également aider à améliorer la structure et la

cohésion du sol, améliorer la capacité de retenir l'eau et l'empêcher d'être perdue, et ainsi améliorer les conditions des racines, ce qui les protège contre l'érosion et d'autres conditions. Tous ces facteurs amélioreront la performance agricole (Tawfik et al., 2025).

4. Effets négatifs sur le secteur agricole

H. Liu, Whitehouse, et Li (2018) ont dit que l'irrigation avec des eaux usées soumises à un traitement médiocre expose des risques sanitaires pour les travailleurs agricoles, notamment la contamination par des agents pathogènes.

Le contact direct avec cette eau peut causer plusieurs maladies, en particulier avant le traitement (eau usée brute), par exemple pour les travailleurs dans les stations de traitement de l'eau et les ouvriers agricoles qui irriguent avec de l'eau mal traitée. Parmi les agents pathogènes qui peuvent être présents dans les eaux usées traitées, il y a des bactéries, des virus, des parasites, et des protozoaires qui peuvent causer des risques sanitaires et peuvent entraîner plusieurs maladies chroniques tels que les maladies cardiaques, les ulcères d'estomac, et autres.

En plus, les virus sont considérés comme l'un des agents pathogènes les plus dangereux trouvés dans les eaux usées non traitées. Ils sont les plus contagieux et résistants au traitement et les plus difficiles à détecter. Quant aux bactéries, ils sont les plus courants qui peuvent apparaître dans l'eau usée mal traitée, ils causent une large gamme d'infections telles que la diarrhée, la dysenterie, les infections de la peau et des tissus, etc. Les types de bactéries qui peuvent être présents sont : Salmonella, Escherichia coli, Listeria et d'autres types qui peuvent être inoffensifs (Qadir et al., 2010a).

Les niveaux de concentration et les types d'agents pathogènes et de substances chimiques présents dans les eaux usées varient selon les régions, en fonction des conditions sanitaires et socio-économiques d'une communauté donnée. La concentration de virus, de parasites protozoaires et d'helminthes dans les eaux usées peut être 10 à 1000 fois supérieure plus élevé dans les pays en développement que dans les pays développés. Le tableau 1 présente les principaux types des agents pathogènes entériques et des substances d'intérêt sanitaire que l'on peut trouver dans les eaux usées mal traitées utilisées pour l'irrigation (Jaramillo, 2017).

Tableau 12 :Principaux agents pathogènes que l'on peut trouver dans les eaux usées(Jaramillo, 2017).

Type de risque	Agent Pathogen				
Santitai- re	Bactéries E. coli, Vibrio cholerae, salmonella spp, Shigella spp	Helminthes, Ascaris, Ancylostoma, Tenia spp, , norovirus	Protozoaires Giardia intestinal, Crysptospridium, Entamoeba spp	Virus Hépatites A et E, adénovirus, rotavirus, norovirus	Schistosoma Douves du sang

En outre, il y a Les d'autres composés présents dans les eaux usées irriguées peuvent causer des risques pour la santé humaine, « les Contaminants Emergents (CE) ». Les CE sont des molécules ayant une activité biologique sur différents organismes, leurs propriétés physico-chimiques déterminent leur persistance dans l'environnement et facilitent leur bioaccumulation. Certains CE correspondent à des perturbateurs endocriniens, ces substances, de complexe la nature, n'ont pas été considérés comme des contaminants dans le passé, en raison d'un manque d'information sur leur accumulation dans le sol, l'eau, l'air et les tissus végétaux et animaux. Cependant, la concentration de ces composés a commencé à être quantifiée dans les eaux usées des pays tels qu'en Espagne, en Italie, en Allemagne, au Canada, au Brésil, en Grèce et en France. Ils ont découvert l'acide salicylique et le diclofénac qui sont atteint des concentrations élevées (Jaramillo, 2017)

5. Effets positifs sur la richesse hydrique

L'utilisation des eaux usées épurées peut entraîner des conséquences significatives sur les ressources hydriques. Elles maintiennent les niveaux d'eau souterraine en rechargeant les aquifères (Condom et al., 2012). De plus, elles améliorent l'écoulement naturel et artificiel dans les rivières et les étangs, ce qui contribue à atteindre des objectifs quantitatifs pour les masses d'eau de surface et à restaurer l'environnement aquatique (Institut national de l'économie circulaire, 2018). Elles peuvent réduire la pression sur les sources d'eau douce(Mishra et al., 2023). Dans le royaume d'Arabie saoudite, l'utilisation des eaux usées

traitées à des fins d'irrigation a contribué à réduire la dépendance aux eaux souterraines, ce qui a ainsi contribué à préserver environ 60 % de celles-ci (Balkhair et al., 2013). De même, peut relancer la recharge des nappes aquifères, qui peut contribuer à atteindre une bonne condition quantitative et éviter la détérioration des eaux souterraines, par l'étude préalable des caractéristiques des nappes aquifères (Institut national de l'économie circulaire, 2018). Ces eaux non conventionnelles peuvent être utilisées comme une méthode pour éviter la pollution des eaux de surface en évitant le déversement d'eaux usées dans les masses d'eau (Lekhal et Kherfi, 2022).

6. Effets négatifs sur la richesse hydrique

Il y a une possibilité que les eaux souterraines soient exposées à la pollution en raison des composants toxiques présents dans les eaux usées traitées (FAO, 2003).

Sengupta et al. (2015) ont affirmé qu'a réutilisation des eaux usées traitées contribue à des concentrations élevées d'azote et de phosphore, provoquant l'eutrophisation et la croissance des algues, ce qui contribue au blocage des systèmes d'irrigation et au manque d'oxygène lors du drainage de l'eau dans les barrages et les plans d'eau.

7. Effet sur le secteur économique

L'utilisation des eaux usées réduirait l'utilisation des engrais et la consommation d'eau douce pour l'irrigation et augmenterait également la productivité agricole, en particulier dans les zones souffrant de sécheresse, relançant ainsi l'économie locale de ces zones. Il est également connu que la protection des eaux usées est considérée comme une source de nutriments qui peut être convertie en biogaz pour une utilisation rentable. Un autre avantage de l'utilisation d'eau traitée peut être d'éviter le coût de l'extraction des ressources en eaux souterraines, qui peut atteindre 65 pour cent des coûts des activités d'irrigation (Trotta et al., 2024)

Les eaux usées sont également utilisées pour irriguer les forêts, car cela offre plusieurs avantages économiques, notamment l'augmentation des rendements économiques grâce à l'exploitation des arbres à bois dans diverses industries telles que l'ameublement et la transformation agricole telle que les huiles, fibres et aliments pour animaux Remplacer le bois importé par du bois local, ce qui améliore la balance des paiements et réduit l'inflation. En conséquence de tout cela, des postes supplémentaires sont créés, ce qui aide à éliminer le chômage (nom de fichier Jas Volem). Le traitement des eaux usées peut également attirer les investisseurs et ceux intéressés par ce projet, ce qui augmente la mobilité économique

L'utilisation de l'eau peut avoir des impacts négatifs sur l'économie, y compris le fait que les systèmes de traitement des eaux usées sont coûteux à exploiter et même à entretenir et à

effectuer les tests nécessaires pour assurer la conformité aux réglementations environnementales (Foad, 2017)

De nombreux pays ont adopté des stratégies de gestion de l'eau basées principalement sur le traitement des eaux usées et leur réutilisation en agriculture, dans le but d'alléger la pression sur les ressources en eau douce. Cependant, ces stratégies font face à des défis majeurs dans les pays en développement lors de l'adoption de systèmes intensifs tels que les bioréacteurs à membrane et les systèmes de boues activées, en raison de leur coût élevé à toutes les étapes d'exploitation, depuis la construction (y compris les grandes installations et les technologies complexes), à l'exploitation et à la maintenance, ainsi qu'à la nécessité de disposer d'un personnel technique spécialisé (Stefanakis, 2022). La région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord est la région la plus sèche du monde, avec seulement 1 % des ressources mondiales en eau douce. Dans cette région, la réutilisation des eaux usées traitées souffre de lenteur et d'irrégularité en raison de plusieurs restrictions, notamment : les coûts élevés et les faibles rendements financiers pour le développement des réseaux de collecte des eaux usées et des stations d'épuration, l'absence de mécanismes efficaces de récupération des coûts, et le manque d'infrastructure (Qadir et al., 2010b), qui est un obstacle à la réutilisation des eaux usées traitées, Comme c'est le cas en Cisjordanie (Mizyed, 2013).

8. Effets positifs sur le secteur social

Le secteur de réutilisation des eaux usées traitées peut jouer un rôle dans l'augmentation des activités économiques, ce qui deviendra possible peut à son tour contribuer à la réalisation d'avantages sociaux tels que la création d'emplois, en particulier dans les pays où la production agricole est menacée par la sécheresse ou dans les zones touristiques qui ont besoin de protection et de gestion durable de l'eau (Institut national de l'économie circulaire, 2018).

Promouvoir l'adoption d'une approche intégrée de la gestion de l'eau, qui tienne compte à la fois de l'eau conventionnelle et des eaux usées dans les programmes de développement, contribuant ainsi à améliorer l'équité sociale dans la distribution d'eau lorsque les deux services sont liés et garantis (Institut national de l'économie circulaire, 2018).

9. Effets négatifs sur le secteur social

Les eaux usées traitées peuvent présenter des risques pour la santé humaine si elles ne sont pas traitées correctement, car elles peuvent contenir des agents pathogènes tels que des bactéries et des virus, ainsi que des polluants chimiques tels que des métaux lourds (Ofori et al., 2021). L'une des préoccupations les plus importantes associées à cette utilisation est l'émergence et l'apparition de bactéries capables de résister aux antibiotiques, ce qui peut entraîner de graves dommages pour la santé humaine (Angelakis et al., 2018).

Dans certains pays, le public peut voir la réutilisation de l'eau usée de manière négative, ce qui conduit à un manque de confiance dans les pratiques de réutilisation de l'eau, et ça nécessite des efforts de sensibilisation et d'orientation au profit des citoyens, des individus et des autorités locales (Institut national de l'économie circulaire, 2018).

Conclusion

En résumé, ce deuxième chapitre met en évidence les conséquences associées à la réutilisation des eaux usées traitées, en abordant ses aspects agricoles, sociaux et sanitaires, en plus de ses répercussions sur le sol et l'eau. Ces résultats fournissent une vision globale qui constitue un point de départ pour approfondir, dans le chapitre suivant, les perspectives associées à cette pratique.

Partie pratique

Chapitres 03

1-Matériels et

Méthodes

Dans ce chapitre, et dans le but de mener une étude visant à une évaluation d'une des ressources en eau non conventionnelle de la région d'El-Oued et leur effet sur la plante, face aux défis climatiques actuels et aux problèmes liés à l'exploitation aiguë des eaux des nappes profondes dans cette wilaya, et la demande excessive d'eau pour compléter les besoins de la population locale. Nous avons présenté dans cette partie " Matériel et Méthodes", la région d'étude ainsi que les méthodes d'analyses, les caractéristiques physico-chimiques de l'eau usée traitée et de l'eau de forage utilisées pour l'irrigation, et l'effet de cette irrigation sur les plantes étudiées.

Nous avons ensuite évalué la fiabilité de ces caractéristiques afin de déterminer si elles permettent de répondre aux besoins hydriques de la wilaya, notamment dans le secteur agricole. Enfin, nous avons présenté les résultats d'analyses obtenues ainsi que leur discussion.

1.Caractéristiques de la région d'étude

1.1. Situation Géographique

La région d'El Oued est située dans le sud-est de l'Algérie. Elle a considérée comme une municipalité en 1957, puis devenu une wilaya en 1984.L'État s'étend sur une grande superficie de 44587 km² (Abidi et Touati, 2018), et est divisé en 30 communes. Sa population a atteint 900000 habitats, avec une densité de population estimée à 20,19 personnes par kilomètre carré, selon les statistiques du Bureau national des statistiques en 2019 (MICT, 2022).

Elle est limitée :

Au Nord par les wilayas de Biskra, khenchela et Tébessa ;

-A l'Est par la Tunisie ;

-A l'Ouest par les wilayas de d'El M'Ghair et de Touggourt ;

-Au Sud par la wilaya de Ouargla,

La figure n° 5 montre l'emplacement des frontières d'El Oued.

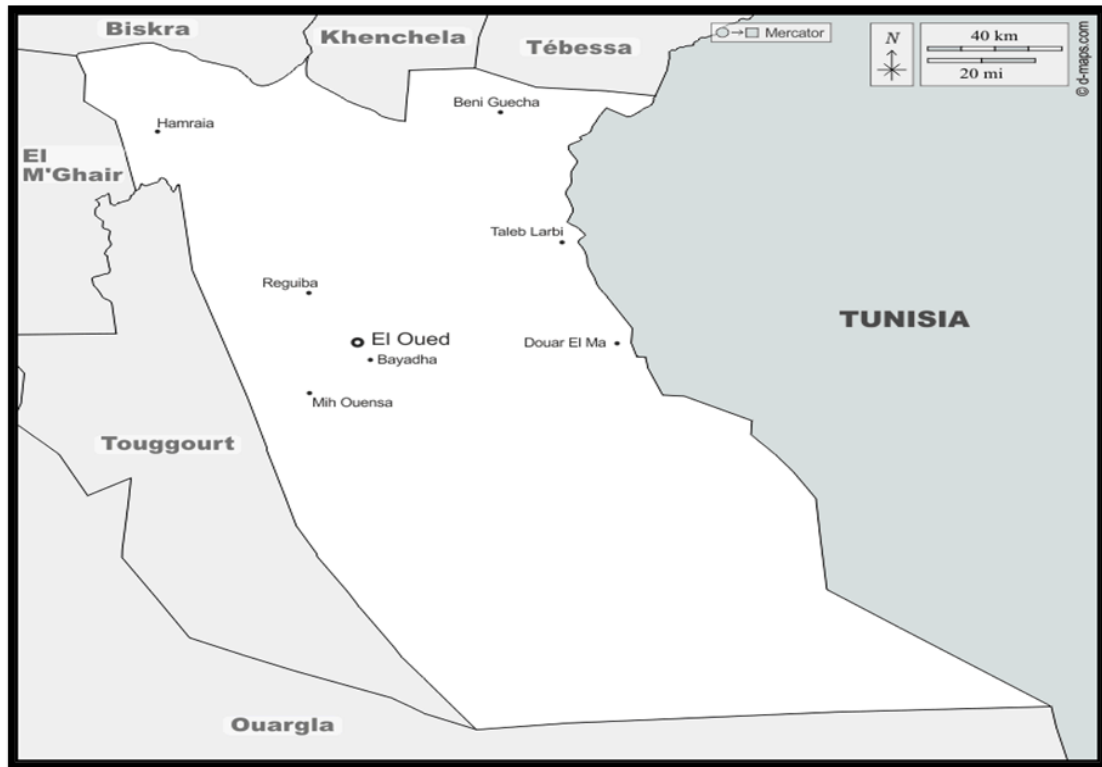


Figure 5 : Situation géographique de la wilaya El-Oued (d-maps, n.d)

1.2. Cadre géologique

El Oued est située au milieu des dunes de sable jaune, issues de gisements quaternaires (Figure 6), les conditions tectoniques et paléogéographiques dans la région d'El-Oued ont contribué à la formation d'une chaîne sédimentaire de nature rocheuse diversifiée et multiple au fil du temps, mais elle était caractérisée par le calme, la régularité et l'homogénéité dans l'espace. Ces caractéristiques ont conduit à la formation de plusieurs aquifères dans cette région qui étaient caractérisés par un comportement hydrodynamique variable en fonction de leurs caractéristiques sédimentaires.

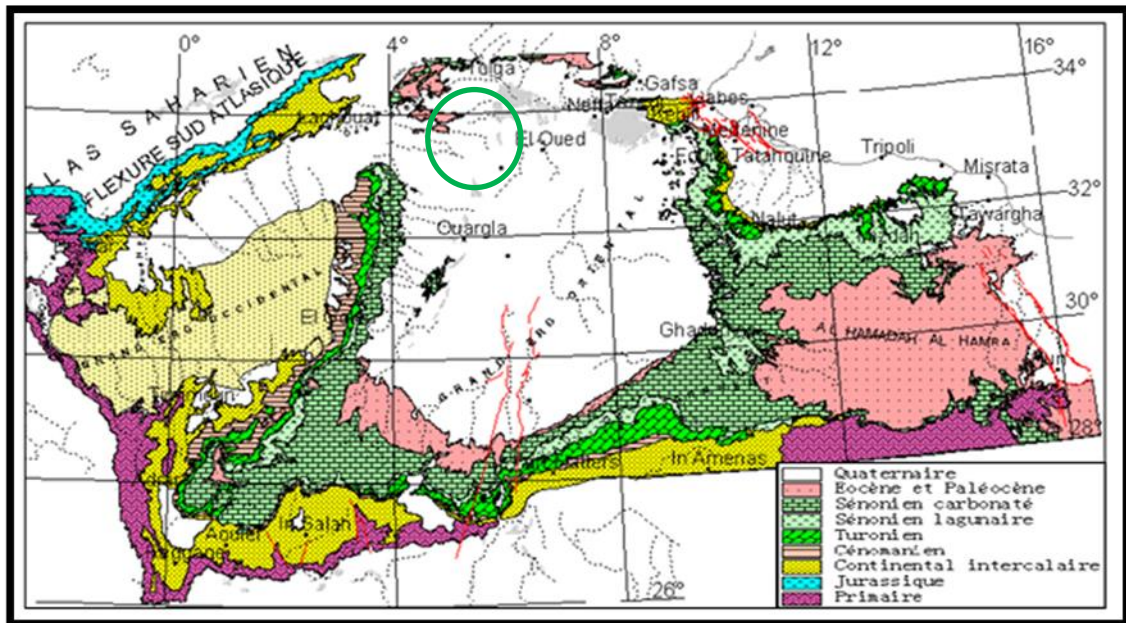


Figure 6: Plan géologique du région d'El-Oued dans le grand Erg Oriental (Miloudi, 2008).

1.3. Climat de la région d'étude

Le climat de la région d'étude est désertique sec. En été, il fait très chaud, tandis qu'en hiver, il est modéré. Les températures d'été atteignent 54°C , et en hiver elles peuvent descendre à environ 1°C . Le taux de précipitation est très faible, ne dépassant pas 80 mm/an en moyenne (Kholadi, 2005).

1.4. Relief

Selon Kholadi (2005), le terrain se compose de trois sections principales :

- Zone sablonneuse : couvre toute la région, Elle fait partie de la grande race orientale, et n'offre guère d'avantages à l'agriculture.
- Forme du plateau rocheux : Il est caractérisé par une extension le long de la route nationale n° 3 à l'ouest de la région d'El-Oued et se dirige vers le sud.
- Zone des basses terres (Shattout) : Elle est située dans la partie nord de la région et s'étend vers l'est. Il est caractérisé par une forte Salinité, ce qui le rend inadapté à l'exploitation agricole.

1.5. Caractères pédologiques

Le sol d'El-Oued prend deux formes principales, dont la première et la plus répandue est le caractère sableux représenté par des amas denses de dunes de sable. L'autre aspect est caractérisé par une surface de gravier recouverte de croûtes de gypse entourées de hautes dunes (sillons) qui lui donnent l'apparence de cratères. Tandis que du côté ouest, la présence de la

zone de pulvérisation (Tefza) est proéminente, qui est principalement composée de carbonate de calcium (CaCO_3).

De plus, selon Voisin (2004), a dit que le sable de la région est principalement composé de silice à un taux de 40–60%, de gypse à un taux de 10–40% et de carbonate de calcium à un taux de 2–20%, en plus d'un très faible pourcentage (0–5%) d'argile (Ben Doyem, 2015).

1.6. Hydrogéologie

Selon Mammeri et Laib (2019), la région d'étude est riche en réserves d'eau souterraine, qui sont réparties à trois niveaux différents. Le premier niveau, les eaux souterraines de surface, c'est-à-dire la nappe phréatique, est considéré comme le plus important pour le secteur agricole. Les premiers agriculteurs s'y sont appuyés pour créer des oasis en utilisant la technique Ghout. Dans El Oued il y a les aquifères suivants :

- Nappe phréatique (nappe de surface)
- Couche finale composée (CT)
- Couche barrière continentale (intercalaire continental).

2. Choix de zone d'échantillonnage

Cette étude a été menée dans la région d'El Oued, plus précisément dans la commune de Kouinine, pour tester les effets de l'irrigation avec des eaux usées traitées et d'eau forage sur les plantes de sorgho.

Nous avons choisi la commune de Kouinine car les eaux usées traitées ne se trouvent qu'à la station de traitement de Kouinine (STEP-1), où les eaux usées traitées sont réutilisées exclusivement au sein de la station. Immédiatement après le traitement, les eaux usées traitées sont transportées. Vers le rejet final a « chott Hallofa » hors de la région d'El-Oued.

Nous avons planté le Sorgho dans cette station et l'irrigué avec les eaux usées traitées sous autorisation de station. Pour la zone de prélèvement d'échantillons d'eau du forage et des plantes Sorgho irrigué par eau de forage, nous avons choisi des parcelles proches de la station d'épuration où il y a les mêmes propriétés édaphiques des plantes de Sorgho irriguées par l'eau usées traitées.

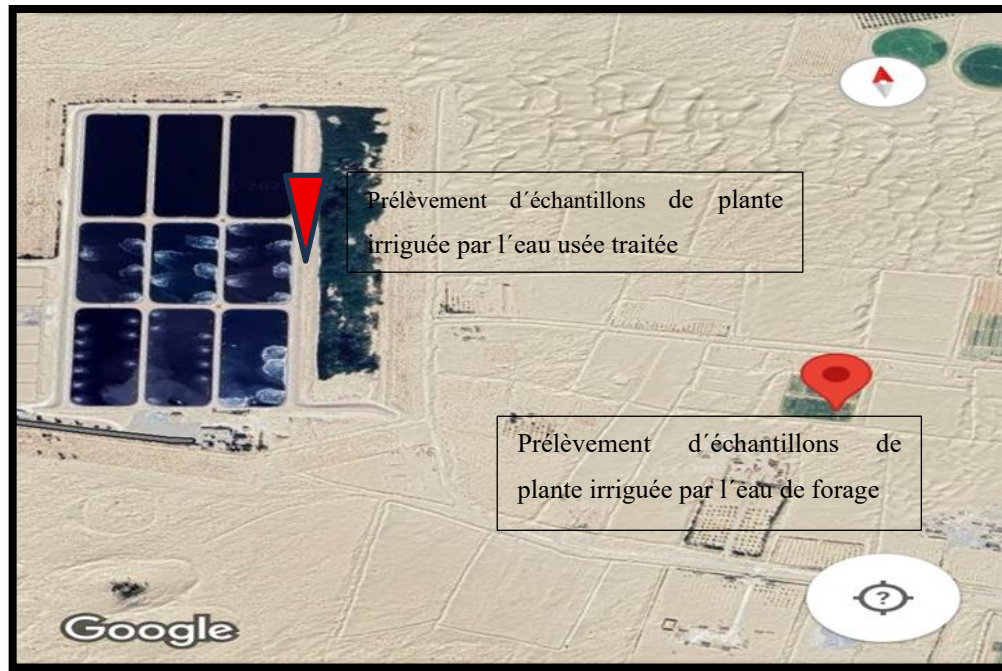


Figure 7 : Zone d'échantillonnage (Google earth, 2025)

3. Matériel Utilisé

Ce travail a été réalisé au niveau d'un champ expérimental où les mêmes pratiques culturales des fellahs soufis sont suivies pour la mise en place de la culture. Toutes les parcelles sont irriguées aux mêmes temps et par les mêmes quantités d'eau (160 ml/s), la seule différence entre les deux essais c'est la qualité de l'eau utilisé pour l'irrigation. Le 1er essai est irrigué par les eaux usées épurées filtrées provenant de la STEPE1 de Kouinine. Alors que le 2ème essai est irrigué par l'eau de forage. L'étude a été menée sur les cultures de sorgho.

Le sol des parcelles expérimentales est de texture grossière à pH neutre. Sa cohésion est très faibles, Ainsi il est peu compact, fortement calcaire. Pauvre en matière organique et très perméable. Le travail du sol dans le but de préparation du champ d'essai consiste à un labour à l'aide d'un cultivateur à dent à une profondeur aillant à 30 cm.

Après aménagement des parcelles expérimentales, nous avons installé un réseau d'irrigation et réalisé un pré-irrigation pendant 3jours successives. Nous n'avons aucun épandage appliqué. La technique d'irrigation adoptée été par système goutte à goutte, le débit en tête de réseau = 0.16 L/s. le débit des goutteurs = 0.57m³/h. Le nombre d'heures d'irrigation durant le cycle végétatif est 200 heures. La quantité d'eau apportée durant le cycle végétatif est 114 m³.

Dans nôtre protocole expérimental, les semences de sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) ont été utilisées.

La plantation est réalisée manuellement le 07-03-2025 sur six petites parcelles dans chaque essai, chaque parcelle à une surface de 12 mètre carré (12 m²). Les semences ont été installées en rangs, avec une dose de 63 plants /0.0012h. Les écartements sont de 20 cm entre les rangs est 15 cm entre les plants. La profondeur de plantation est de 10 cm. L'essai a été dénommé (P1R1ET, P2 R2ET, P3 R3ET) pour la 1ère partie irriguées par des eaux usées épurées filtrées (Essais I) et (P1R1Ef, P2 R2Ef, P3 R3Ef) pour la 2ème partie irriguées par l'eau de forage (Essais II).

4. Analyses

On a utilisé différents appareils et instruments pour notre analyse de recherche, les figures 8 jusqu'au 10 présentent quelques appareils et outils analytiques exploités le tableau montrent les paramètres, les appareils, et les méthodes d'analyses qu'on a suivi pour l'analyse de l'eau et de sorgho.



Figure8 : pH-mètre utilisé dans les analyses



Figure9 : Conductimètre utilisé dans les analyses



Figure 10 : Spectrophotomètre UV-Visible

4.1. Analyse de l'eau

Le tableau suivant présente les paramètres, les appareils et les méthodes d'analyse suivis pour notre échantillon de recherche selon les disponibilités de laboratoire de la répression des fraudes opérationnels d'El-Oued et les réactifs offerts pour notre étude.

Tableau 12 : Paramètres analysés dans l'étude des eaux expérimentaux.

Paramètre	Appareil	Methode de travail
Analyse physique		
PH	PH-mètre	NF T90-008
Conductivité électrique	Conductimètre	NF T90-031
Température	Thermomètre numérique / Sonde multiparamètres	NF EN ISO 10523
Dosage des cations solubles		
N-NH4	Spectrophotomètre UV- Visible	ISO N°7150
PO4	Spectrophotomètre UV- Visible	ISO N° 6878

4.2. Analyse de sorgho

Le sorgho a de nombreuses caractéristiques qui le rendent adapté à la culture dans des environnements secs et désertiques. C'est une plante à croissance rapide qui tolère la chaleur et la sécheresse, et montre également une bonne croissance avec des températures élevées. Il se caractérise par une grande capacité d'adaptation aux sols sableux pauvres, très perméables et faibles en matière organique. De plus, il ne nécessite pas de labour lourd en agriculture, ce qui en fait une plante économique et pratique. Cela soutient son rôle en tant qu'option stratégique pour renforcer la couverture végétale et augmenter la production de biomasse dans les zones désertiques.

Sur la base de toutes ces caractéristiques, nous avons choisi cette plante pour notre étude de terrain. À maturité physiologique, des échantillons de plantes ont été prélevés au hasard dans des parcelles expérimentales, et seules les parties aériennes de la plante ont été collectées puis transférées au laboratoire pour analyse. Après la récolte, les échantillons ont été pesés immédiatement afin de déterminer le poids frais. Les échantillons ont été séchés à l'extérieur pendant 24 heures, puis séchés dans un four à 45 °m pendant 48 heures. Ensuite, les parties

aériennes séchées du sorgho ont été pesées. Les analyses de biomasse ont été effectuées dans le laboratoire de contrôle qualité et de suppression des fraudes.

4.3. Analyses statistiques

Le logiciel Microsoft Excel a été utilisé pour organiser, traiter et visualiser les données brutes recueillies lors des deux types d'eau analysées (eaux de forage et eaux usées traitées). Les paramètres physico-chimiques mesurés (température, pH, conductivité électrique, orthophosphate (PO_4), et azote ammoniacal (N-NH_4) ont été consignés dans des tableaux structurés, puis traités pour obtenir des moyennes, des minimums, des maximums des données, et de représentations graphiques été barplots avec barres d'erreur qui présentent l'écart-type pour les 2 types d'eaux étudiées. Donc, le logiciel Excel a permis de comparer visuellement les deux types d'échantillons sélectionnées et comparer les moyennes trouvées.

2- Résultats et discussion

Résultats et discussion

Dans cette partie on traite nos résultats de recherches après les prélèvements et les analyses des échantillons d'eaux et de plante au laboratoire. À partir de notre étude, nous sommes parvenus aux résultats suivants :

1. Résultats d'analyses physico-chimiques des eaux

1.1. Résultat d'analyse de potentiel hydrique (pH)

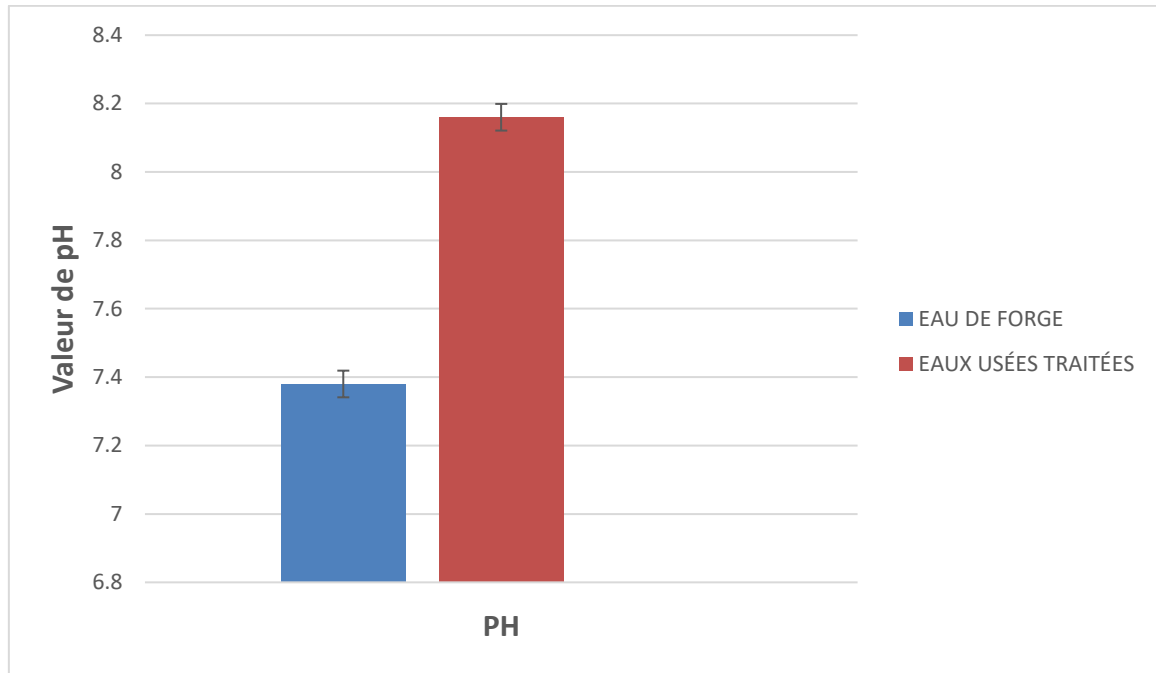


Figure11 : Concentration moyenne de pH dans les deux types d'eaux analysés

À travers les graphiques représentés par la figure 11 on note que la valeur du pH est alcalin dans les eaux usées traitées avec une moyenne de 8.16. Le maximum est de 8.31 et le minimum est de 8.04.

Le pH des eaux de forage a un moyen de 7.38 .il est légèrement alcalin rapport aux eaux usées traitées analysées. Le pH des eaux de forage est entre un minimum de 7.32 et un maximum de 7.42.

La valeur de pH obtenue dans tous les deux types d'eaux est comparée à la norme algérienne (6,5 - 8,5), alors elle se situe dans la plage requise.

1.2. Résultat d'analyse de conductivité électrique (CE)

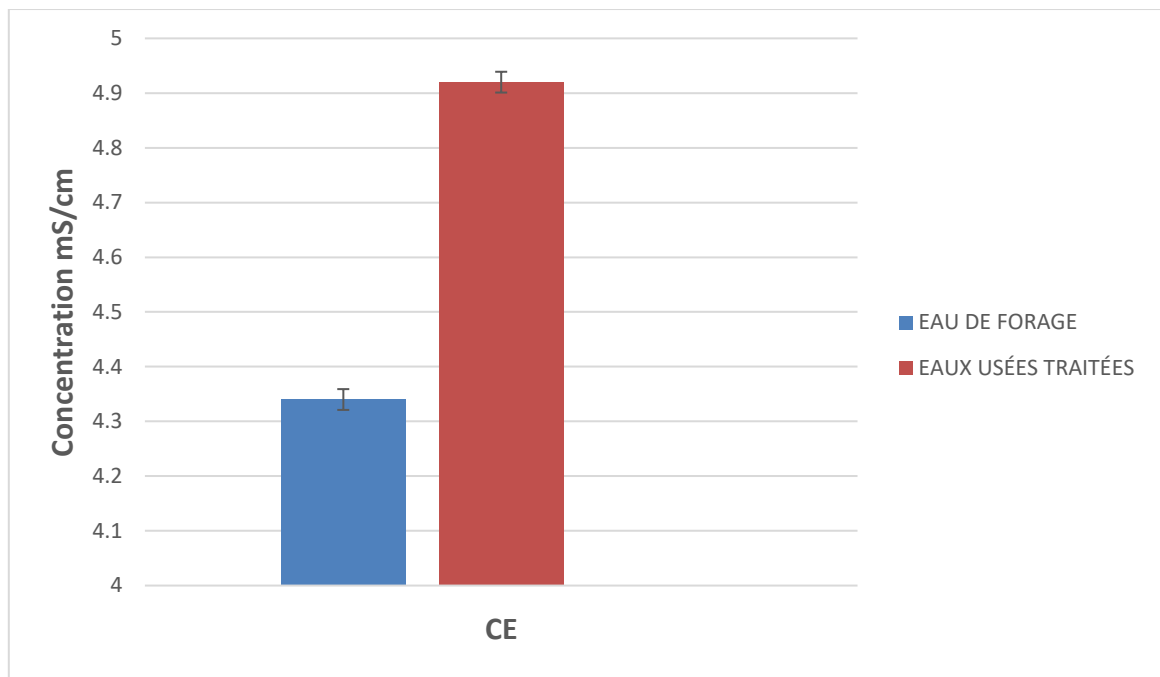


Figure 12 : Concentration moyenne de conductivité électrique dans les deux types d'eaux analysés.

Dans la figure 12, nous notons que la valeur de conductivité électrique est plus élevée dans les eaux usées traitées que dans l'eau de puits analysée, atteignant une moyenne de 4,92 mS/cm, une valeur minimale de 4,89 mS/cm et une valeur maximale de 4,96 mS/cm.

La valeur de conductivité électrique des eaux usées traitées est très élevée et ne respecte pas la norme algérienne (3 mS/cm).

1.3.Résultat d'analyse de température (T)

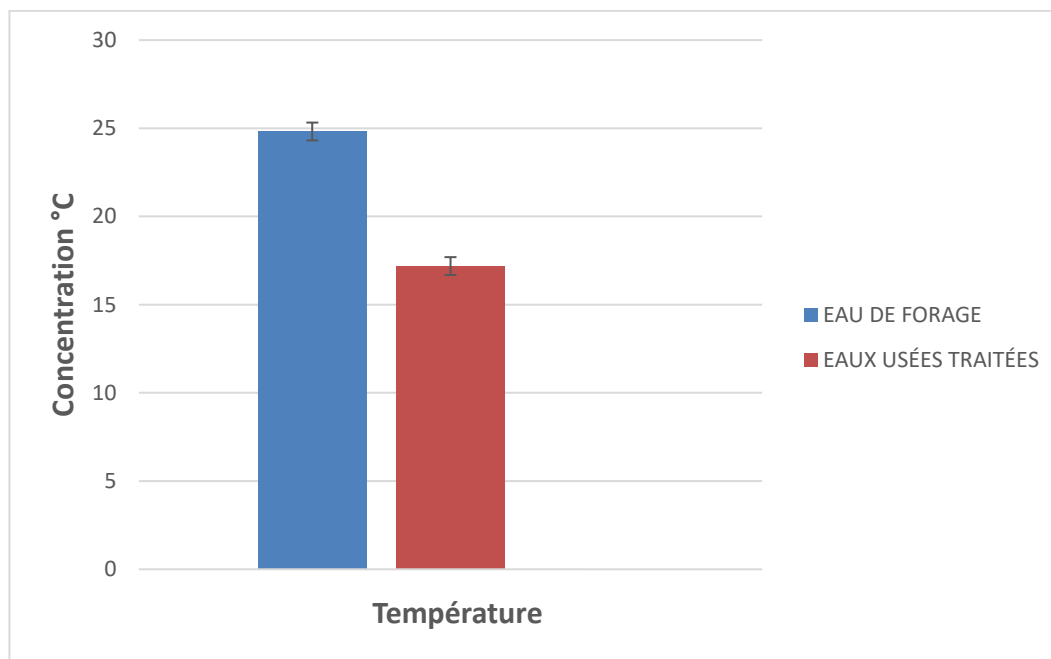


Figure 13 : Concentration moyenne de température dans les deux types d'eaux analysées.

À partir des graphiques représentés dans la Figure 13, nous notons que la valeur de température dans les eaux usées traitées a atteint une moyenne de 17,19°C, avec un maximum de 17,61°C et un minimum de 17°C.

La valeur de température des eaux de forage a un moyen de 24.82°C. Le pH des eaux de forage est entre un minimum de 24°C et un maximum de 25.3°C.

1.4. Résultat d'analyse de l'orthophosphate (PO₄)

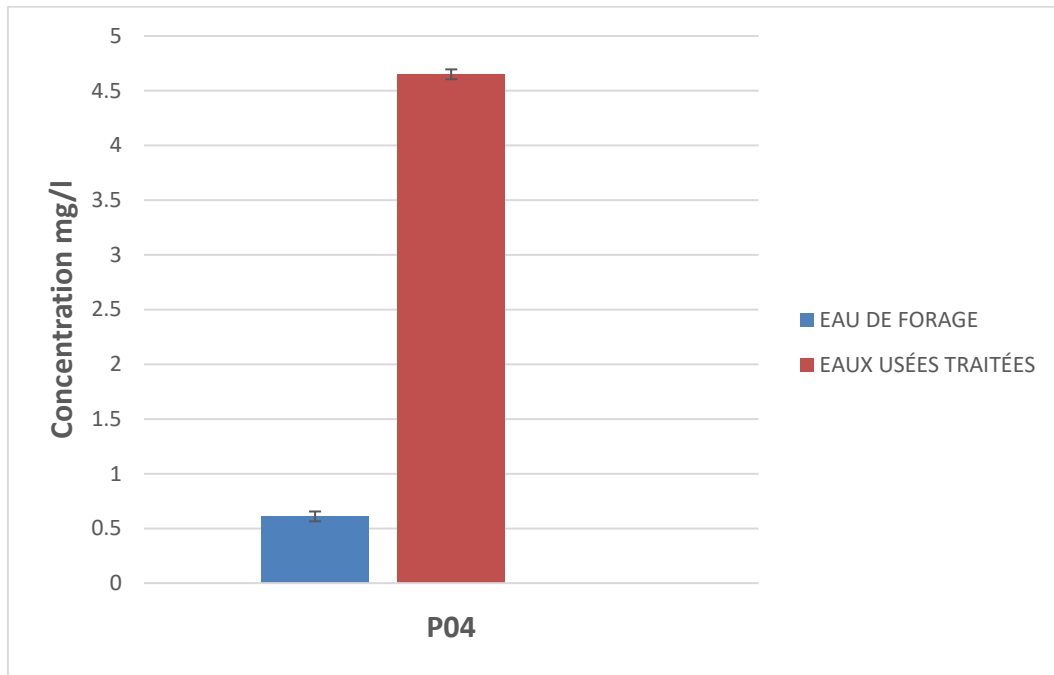


Figure 14 : Concentration moyenne de PO₄ dans les deux types d'eaux analysées

Dans la figure 14 on note que la valeur du PO₄ est neutre dans les eaux usées traitées avec une moyenne de 4.65 mg/l. Le maximum est de 4.7 mg/l et le minimum est de 4.6 mg/l.

Nous notons également que la concentration de PO₄ dans l'eau des puits a atteint une moyenne de 0.61mg/l, avec un maximum 0.65 mg/l et un minimum 0.56 mg/l.

1.5. Résultat d'analyse de l'azote ammoniacal (N-NH₄)

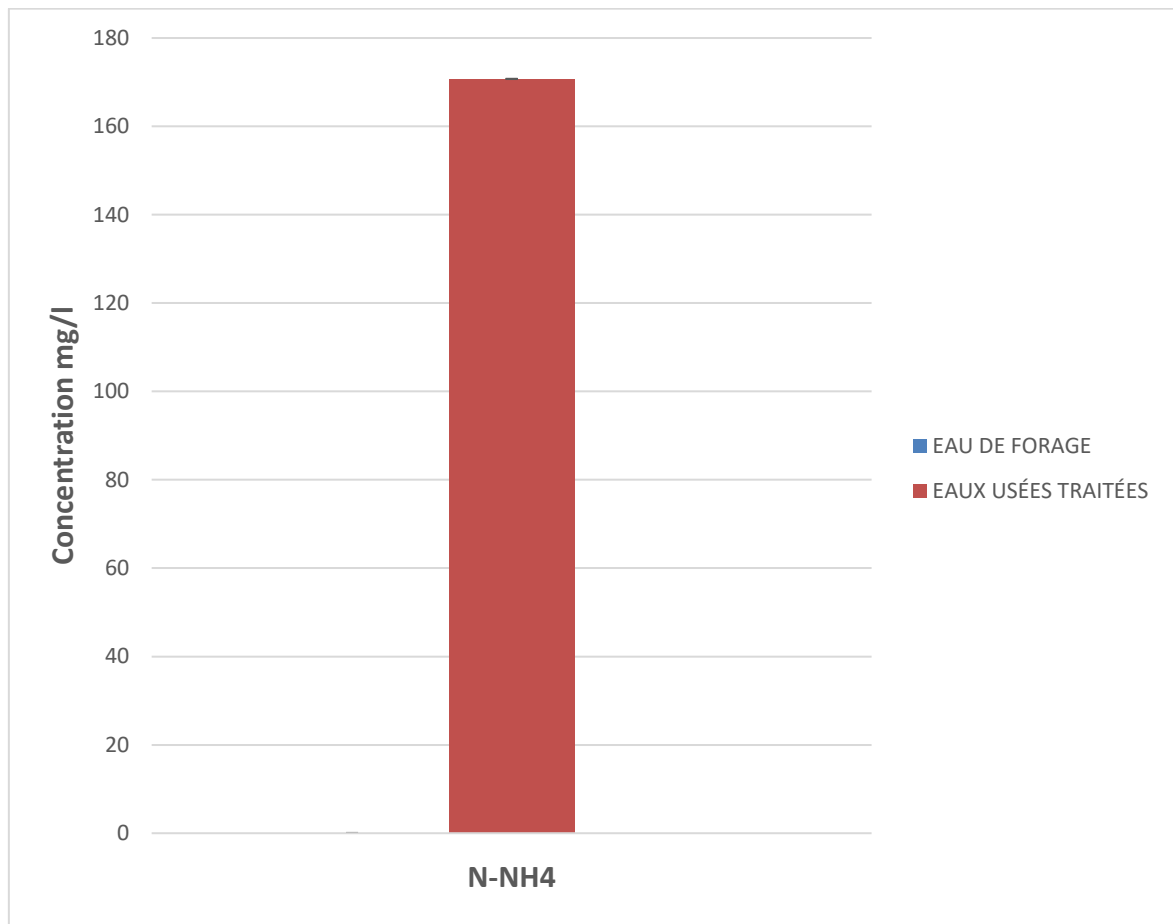


Figure 15 : Concentration moyenne de N-NH₄ dans les deux types d'eaux analysées

Dans la figure 15, on observe que la concentration de N-NH₄ dans les eaux usées traitées est très élevée par rapport à l'eau de forage. Il était en moyenne de 170,74 mg/l. Le maximum est 171,2 mg/l et le minimum est 170 mg/l.

Alors que la concentration de N-NH₄ dans l'eau de forage atteignait une moyenne de 0,04 mg/l, un maximum de 0,09 mg/L et un minimum de 0,04 mg/l.

2. Résultats d'analyses de plante

2.1. Biomasse fraîche

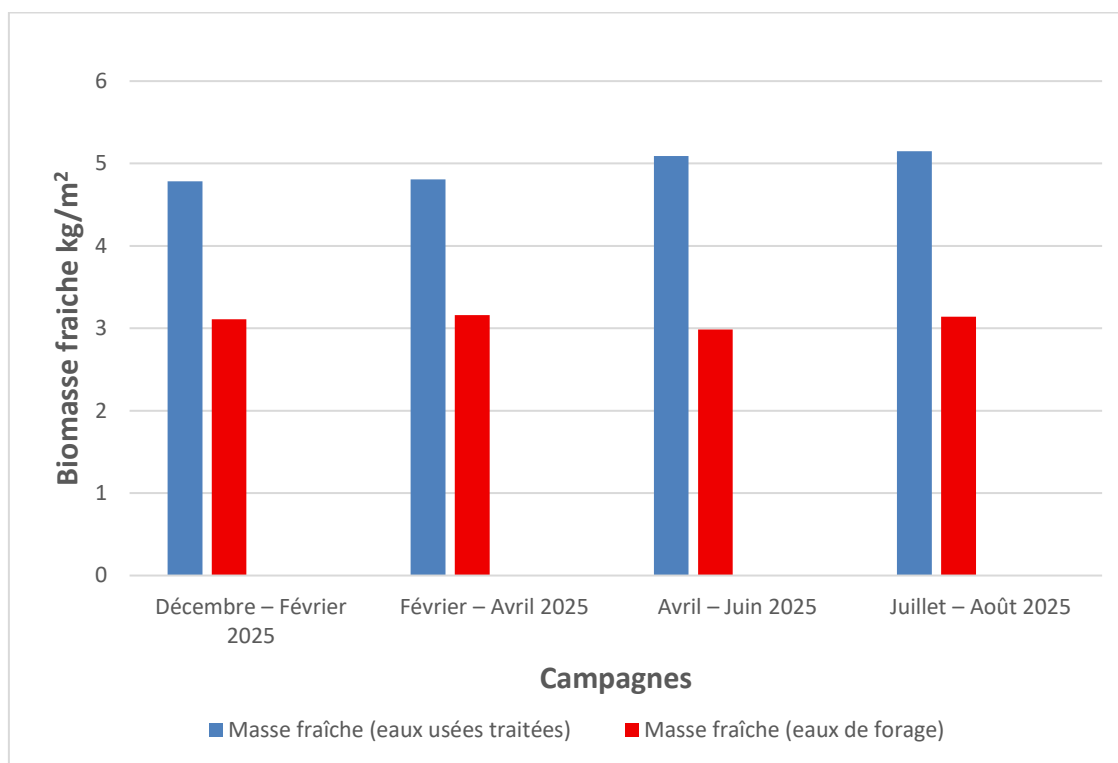


Figure 16 : Biomasse fraise de sorgho sous deux types dans quatre campagnes

Les résultats d'analyse montrent la variation de la biomasse fraîche du sorgho sur quatre saisons de culture (décembre–février, février–avril, avril–juin, juillet–août) de l'année 2025 sous deux systèmes d'irrigation différents : l'irrigation avec des eaux usées traitées et l'irrigation avec de l'eau de forage (Figure16). Nous avons obtenu dans chaque campagne les suivants :

Décembre –Février 2025 : La biomasse fraîche était plus élevée 4,9 kg/m² dans les parcelles irriguées avec des eaux usées traitées, tandis que les parcelles irriguées avec de l'eau de puits étaient relativement faibles 3,1 kg/m².

Février – Avril 2025 : Nous avons noté une augmentation remarquable de la biomasse fraîche enregistrée dans les plantes de sorgho irriguées par les eaux usées traitées dans le champ expérimental. Nous avons obtenu le même pourcentage que la période précédente (Décembre – Février 2025), qui s'élevait à 4,9 kg/m² pour les eaux usées traitées, tandis qu'il s'élevait à 3,1 kg/m² pour l'eau de forage.

Avril-juin : Nous avons remarqué une légère augmentation de la biomasse fraîche pour le sorgho irrigué avec de l'eau usée traitée, qui s'élevait à 5,1 kg/m², tandis qu'il y avait une légère diminution de la biomasse fraîche dans le sorgho irrigué avec de l'eau de forage, qui était de 3 kg/m² par rapport aux autres campagnes précédentes.

Juillet-août : Durant cette saison, un développement a été enregistré dans la valeur de la biomasse fraîche de sorgho était 5,15 kg/m² irrigué avec de l'eau usée traitée. Alors que nous avons enregistré une valeur de 3,1 kg/m² de la biomasse fraîche dans les parcelles irriguées avec l'eau de forage.

Ces résultats montrent que l'irrigation avec des eaux usées traitées contribue de manière significative à augmenter la masse fraîche de la plante de sorgho par rapport à l'irrigation avec l'eau de forage dans toutes les saisons de culture.

Les résultats obtenus par l'analyse de développement des biomasses fraîches de la plante de sorgho indiquent la supériorité des biomasses fraîches de sorgho irrigué avec de l'eau des eaux usées traitées pendant les différentes campagnes étudiées. Cette augmentation est principalement due au fait que les eaux usées traitées contiennent des proportions importantes de macronutriments, tels que le phosphore et le potassium, et le nitrogène nous pouvons dire que cette augmentation est due à la présence de quantités de matières organiques qui se trouve dans les eaux usées traitées. Ces nutriments dans cette eau non conventionnelle peuvent améliorer la nutrition des plantes et en plus améliorer la photosynthèse. Elles peuvent également soutenir la croissance végétative, ce qui se traduit par une augmentation de la teneur en eau des tissus et une augmentation significative de la masse fraîche par rapport aux plantes de sorgho irrigué avec de l'eau de forage.

2.2. Biomasse sèche

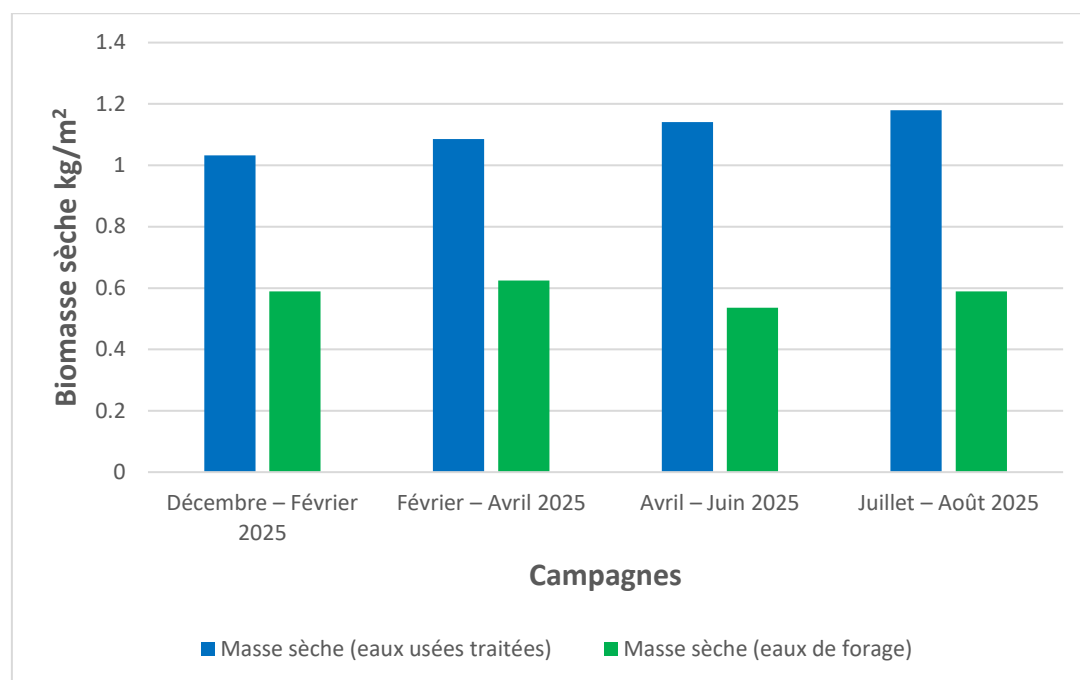


Figure 17 : Biomasse sèche du sorgho change sous deux types d'irrigation dans quatre campagnes

L'analyse montre la variation de la biomasse sèche du sorgho sur quatre campagnes de culture (décembre–février, février–avril, avril–juin, juillet–août) durant l'année 2025 et sous deux systèmes d'irrigation différents : l'irrigation avec des eaux usées traitées et l'irrigation avec de l'eau de forage (Figure17). Nos résultats obtenus dans chaque campagne sont comme suit:

Décembre –Février 2025 : La biomasse sèche de la plante de sorgho était plus élevée (1,03 kg/m²) dans les parcelles irriguées avec des eaux usées traitées, tandis que les parcelles irriguées avec de l'eau de forage étaient relativement faibles (0,59 kg/m²).

Février – Avril 2025 : Une légère augmentation de la biomasse sèche a été enregistrée dans les deux systèmes d'irrigation dans cette campagne par rapport à la première campagne. Elle a atteint un minimum de 1.020 mg/l et un maximum de 1.130 mg/l avec une moyenne de 1,08 kg/m² dans le cas de sorgho irrigué avec les eaux usées traitées. En revanche elle a atteint un minimum de 0.610 kg/m² et un maximum de 0.640 kg/m² avec une moyenne de 0,62 kg/m² dans le cas de sorgho irrigué avec l'eau de forage.

Avril –Juin 2025 : Cette période a été caractérisée par une valeur de biomasse sèche avec une moyenne de 1,13 kg/m² pour les sites expérimentaux irrigués avec de l'eau usée traitée, avec un minimum de 1.100kg/m², et un maximum de 1.120kg/m². Cette valeur est supérieure à la biomasse sèche trouvée dans les parcelles irriguées avec de l'eau de forage avec une moyenne de

0,55 kg/m². D'après ces résultats, nous avons indiqué un effet positif remarquable de l'irrigation avec de l'eau usée traitée pendant cette saison de culture.

Juillet –Août : Pendant dans cette campagne nous avons noté la plus grande valeur de biomasse sèche par rapport aux autres campagnes d'étude. La valeur enregistrée pour les parcelles irriguées avec les eaux usées traitées été une moyenne de 1,18 kg/m² et un minimum de 1.148kg/m² et un maximum de Nous avons noté que cette campagne a la plus élevée biomasse sèche par rapport à toutes les campagnes d'étude.

Pour les parcelles irriguées avec les l'eau de forage, nous avons marqué une moyenne de 0,59 kg/m² avec un minimum 0.588kg/m² et un maximum de 0.591kg/m².

Les résultats indiquent que le développement de la biomasse sèche de la plante de sorgho est affecté par la qualité d'eau d'irrigation, avec les eaux usées traitées elle atteint des valeurs plus élevées par rapport à celles irriguées avec de l'eau de puits. Cela est dû au fait que les eaux usées traitées contiennent une plus grande quantité de nutriments importants pour la croissance des plantes.

Cependant, l'accumulation de la biomasse sèche n'est pas seulement basée sur la disponibilité des nutriments et de l'eau, mais nécessite également la capacité de la plante à convertir les produits résultant de la photosynthèse et à les stocker dans les tissus.

Dans une étude menée par Serraye et al. (2025) sur le sorgho, il a été révélé que l'irrigation avec des eaux usées traitées a un effet positif évident sur la dynamique de la croissance de la biomasse, car des valeurs élevées ont été enregistrées par rapport à l'irrigation avec de l'eau de forage pendant toutes les campanes d'étude. D'après notre étude, nous pouvons dire que les éléments majeurs de phosphore et de l'azotes analysés dans les eaux expérimentales sont très essentiels pour la croissance des plantes, par sa grande quantité dans les eaux usées traitées, ils ont considérablement amélioré la croissance du sorgho sous irrigation avec de l'eau usée traitée par rapport à l'eau de forage.

Conclusion générale et Recommandations

Conclusion générale

D'après notre travail, nous avons conclu plusieurs points comme suit :

L'irrigation a un effet très primordial dans les cultures irriguées. Les eaux usées traitées peuvent avoir des positifs impacts sur la plante dans la région d'El-Oued.

Les analyses chimiques et physiques de l'eau ont montré que les valeurs de pH et de température étaient dans les limites autorisées selon les normes algériennes, tandis que les valeurs de conductivité électrique ont enregistré des niveaux élevés dépassant les normes nationales. Des concentrations élevées de l'azote ammoniacal (N-NH₄) ont également été enregistrées, ce qui peut poser un risque environnemental à long terme.

Les concentrations d'orthophosphate (PO₄) dans les eaux usées traitées et l'eau de forage ont varié dans les limites autorisées, reflétant leur contribution potentielle à la nutrition des plantes sans dépasser le risque.

Les résultats ont enregistré une nette supériorité dans la production de biomasse de sorgho sec et frais lorsque l'irrigation a été réalisée avec des eaux usées traitées dans toutes les campagnes agricoles par rapport à l'irrigation avec de l'eau de puits. Cela est dû au fait que cette eau contient des quantités importantes de macronutriments analysés (l'azote et le phosphore) et de matières organiques qui ont joué un rôle dans l'amélioration et le renforcement de la croissance végétative et de la photosynthèse.

Nos résultats confirment l'importance d'adopter les eaux usées traitées comme une option stratégique alternative pour l'irrigation des plants de sorgho comme plante fourragère dans les zones sèches et pauvres en eau telles que la région d'El-Oued. Cette irrigation peut être utilisée dans l'irrigation à condition que la qualité des eaux usées traitées utilisées soit surveillée quotidiennement pour éviter tout impact négatif potentiel sur les plantes irriguées, ainsi que sur les consommateurs.

Recommandations

Quelques recommandations peuvent être apportées selon notre étude :

- Ajouter un traitement tertiaire pour améliorer l'enlèvement de certains polluants ou nutriments afin de répondre aux normes nationales d'irrigation par eaux usées et au besoin des cultures cultivées.
- Lancer des techniques économiques et efficace pour diminuer la salinité des eaux usées traitée, qui permettra de voir l'impact au cours du temps sur les plantes irriguées.
- Réaliser une étude technico-économique complète de la filière de traitement développée des eaux usées en considérant les potentiels nationaux de réalisation des recommandations de ces études.
- Lancer des projets de plantation des cultures autorisées par la loi nationale algérienne de la réutilisation des eaux usées traitées pour les fins d'irrigation. Ces cultures doivent s'adapter aux conditions climatiques locales et servir le secteur agricole dans la région d'El-Oued.

Références bibliographiques

- Abd El-Sabour, M.F., 2000. Techniques de traitement des eaux usées et leur réutilisation à des fins agricoles.
- Abdelrahman, H.A., Alkhamisi, S.A., Ahmed, M., Ali, H., 2011. Effects of treated wastewater irrigation on element concentrations in soil and maize plants. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 42, 2046–2063.
- Abou Jaoude, L., Kamaledine, F., Bou Said, R., Mohtar, R.H., Dbaibo, R., Yanni, S.F., 2025. Treated wastewater reuse and its impact on soil properties and potato and corn growth. *Sci. Total Environ.* 958, 178130.
- Alkhudhiri, A., Darwish, N. Bin, Hilal, N., 2019. Analytical and forecasting study for wastewater treatment and water resources in Saudi Arabia. *J. Water Process Eng.* 32, 100915.
- Alvarez-Holguin, A., Sosa-Perez, G., Ponce-Garcia, O.C., Lara-Macias, C.R., Villarreal-Guerrero, F., Monzon-Burgos, C.G., Ochoa-Rivero, J.M., 2022. The Impact of Treated Wastewater Irrigation on the Metabolism of Barley Grown in Arid and Semi-Arid Regions. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 19.
- Ameera, M.A., Husham, T.I., Al-Aboodi, A.H., 2023. Improvement of Wastewater Treatment Using Lagoons Technology. *Basrah J. Eng. Sci.* 23, 114–125.
- Angelakis, A.N., Asano, T., Bahri, A., Jimenez, B.E., Tchobanoglous, G., 2018. Water reuse: From ancient to modern times and the future. *Front. Environ. Sci.* 6.
- Arrêté interministériel, du 8 S. 1433 correspondant au 2 janvier 2012 fixant les spécifications des eaux usées s utilisées à des fins d'irrigation, 2012. Les spécifications des eaux usées épurées utilisées à des fins d'irrigation. *J. Off. La Repub. Alger.* 41, 2012.
- Asfari A, 2004. Lignes directrices pour la conception, l'exploitation et l'entretien des stations d'épuration.
- Bali, M., 2024. Traitement des eaux usées.
- Balkhair, K.S., Ismail, F.S.E.-N., Al-Solimani, S.G., Ismail, S.M., 2013. Treated Wastewater Use and Its Effect on Water Conservation , Vegetative Yeild , Yield Components and Water Use Efficiency of Some Vegetable Crops Grown Under Two Different Irrigation Systems in Western Region , Saudi Arabia. 1 st Annu. Int. Interdiscip. Conf. AIIC 24–26.
- Bassompierre, C., 2007. Proc ´ e ` a boues activ ´ ees pour le traitement d ´ effluents papetiers : de la conception d ´ un pilote ` a la validation de mod ` eles To cite this version :
- Ben Doyem, S., 2015. Contribution à l'étude de l'hyperfluoruration des eaux souterraines de région d'EL –Oued (souf) et ses conséquences sur la santé humaine. Univ. Echahid

Hamma Lakhdar-El-Oued.

- Bürger, R., Wendland, W.L., 2001. Sedimentation and suspension flows: Historical perspective and some recent developments. *J. Eng. Math.* 41, 101–116.
- Chachuat, B., Roche, N., Latifi, M.A., 2003. Reduction of the ASM 1 model for optimal control of small-size activated sludge treatment plants | Réduction du modèle ASM 1 pour la commande optimale des petites stations d'épuration à boues activées. *Rev. des Sci. l'Eau* 16, 5–26.
- Dawoud, Mohamed A, Sallam, O.M., Abdelfattah, M.A., 2012. Treated Wastewater Management and Reuse in Arid Regions: Abu Dhabi Case Study. 10th Gulf Water Conf. 22-24 April 2012, Doha – Qatar.
- Dawoud, M. A., Sallam, O.M., Abdelfattah, M.A., 2012. Treated Wastewater Management and Reuse in Arid Regions. 10th Gulf Water Conf. 22-24 April 2012, Doha – Qatar.
- Dhaouadi, H., 2008. Traitement des Eaux Usées Urbaines Les ppoédés iologiues d'épuuation.
- djeddi hamsa, 2007. Utilisation des eaux d'une station d'épuration pour l'irrigation des essences fortières urbaines. Mémoire.
- Durán-Álvarez, uan C., Jiménez-Cisneros, B., 2014. Beneficial and Negative Impacts on Soil by the Reuse of Treated/Untreated Municipal Wastewater for Agricultural Irrigation – A Review of the Current Knowledge and Future Perspectives, Environmental Risk Assessment of Soil Contamination. InTech.
- Eckert, E.M., Di Cesare, A., Kettner, M.T., Arias-Andres, M., Fontaneto, D., Grossart, H.P., Corno, G., 2018. Microplastics increase impact of treated wastewater on freshwater microbial community. *Environ. Pollut.* 234, 495–502.
- Eme, C., Boutin, C., 2015. Composition des eaux usées domestiques par source d'émission à l'échelle de l'habitation - Etude bibliographique 90.
- Europ, L.E.P., De, E.C., Europ, U., 2020. RÈGLEMENT (UE) 2020/741 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 25 mai 2020 relatif aux exigences minimales applicables à la réutilisation de l'eau. *J. Off. l'Union Eur.* 2019, 32–55.
- Fang, W., Delapp, R.C., Kosson, D.S., van der Sloot, H.A., Liu, J., 2017. Release of heavy metals during long-term land application of sewage sludge compost: Percolation leaching tests with repeated additions of compost. *Chemosphere* 169, 271–280.
- FAO, 2002. Crops and Drops.
- FAO, 2003. L'irrigation avec des eaux usées traitées : Manuel d'utilisation 73.
- Farhadkhani, M., Nikaeen, M., Yadegarfar, G., Hatamzadeh, M., Pourmohammadbagher, H., Sahbaei, Z., Rahmani, H.R., 2018. Effects of irrigation with secondary treated wastewater

- on physicochemical and microbial properties of soil and produce safety in a semi-arid area. *Water Res.* 144, 356–364.
- Fidele, M.K., 2020. Conception d'une station expérimentale de traitement des eaux usées par filtres plantés des macrophytes.
- Foad, M. ahmed, 2017. Une étude économique de l'utilisation des eaux usées dans l'irrigation forestière 3.
- Ganjegunte, G., Ulery, A., Niu, G., Wu, Y., 2019. Soil organic carbon balance and nutrients (NPK) availability under treated wastewater irrigation for bioenergy sorghum production in an arid ecosystem. *Arch. Agron. Soil Sci.* 65, 345–359.
- Gans, J., Wolinsky, M., Dunbar, J., 2005. Microbiology: Computational improvements reveal great bacterial diversity and high toxicity in soil. *Science* (80-.). 309, 1387–1390.
- Ghangrekar, M.M., 2022. *Wastewater to Water, Wastewater to Water*. Springer Nature Singapore, Singapore.
- Gholikandi, G.B., Khosravi, M., 2025. EVALUATION OF AGRICULTURE SOIL QUALITY BY TREATED WASTEWATER REUSE IN ARID REGIONS : CASE STUDY IN SISTAN AND BALUCHESTAN PROVINCE , IRAN 5, 392–406.
- Habib, R.; El Rhazi, O., 2007. Impact sanitaire de la réutilisation des eaux usées. Université Cadi Ayyad, Marrakech.
- Hamid, B., Belarbi, F., Saadi, H., 2014. Etude des performances d'un lit bactérien classique à garnissage en pouzzolane de Beni Saf.
- Hauduc, H., 2010. Modèles biocinétiques de boues activées de type ASM: Analyse théorique et fonctionnelle, vers un jeu de paramètres par défaut. *Pastel.Archives-Ouvertes.Fr*.
- Hocine, A., Saci, T., 2018. Application du SIG pour déterminer la qualité physico-chimique des eaux des forages destinées. *Mem. Fin D'Etude*.
- Institut national de l'économie circulaire, 2018. *Etude-Leconomie-Circulaire-Dans-Le-Petit-Cycle-De-Leau-Reut-Inec*.
- Isambert, M., Lei, E., Louard, J., Schmutz, Q., Toulemonde, Q., Rapin, L., Gardies, R., Kamoun, O., 2023. Les controverses de Mines Paris La Réutilisation des Eaux Usées Traitées dans un contexte de stress hydrique croissant ?
- Jaramillo, F., 2017. *Wastewater Reuse in Agriculture : A Review about Its Limitations and Benefits*.
- Khaoula, M., Laib Mohammed, 2019. M émoire de fin d ' étude s :Amélioration du Sol Agraire Saharien par l'Addition d'Hydrogel dans la Culture des oignons – Cas Oued Sou.
- Khaskhoussy, K., Kahlaoui, B., Messoudi Nefzi, B., Jozdan, O., Dakheel, A., Hachicha, M.,

2015. Effect of Treated Wastewater Irrigation on Heavy Metals Distribution in a Tunisian Soil. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.* 5, 805–810.
- Kholladi, M., 2005. SIG pour le suivi de la remontée des eaux de la wilaya d'El Oued Souf 10.
- Klay, S., Charef, A., Ayed, L., Houman, B., Rezgui, F., 2010. Effect of irrigation with treated wastewater on geochemical properties (saltiness, C, N and heavy metals) of isohumic soils (Zaouit Sousse perimeter, Oriental Tunisia). *Desalination* 253, 180–187.
- Legua, P., 2024. applied sciences Evaluation of Agricultural Soil-Improving Zeolite for Improving Irrigation Water Quality.
- Lekhal, N., Kherfi, W., 2022. Réutilisation de l'eau traitée. Université Kasdi Merbah Ouargla.
- Liu, H., Whitehouse, C.A., Li, B., 2018. Presence and Persistence of Salmonella in Water: The Impact on Microbial Quality of Water and Food Safety. *Front. Public Heal.* 6, 1–13.
- Mahfooz, Y., Yasar, A., Gujjian, L., Islam, Q.U., 2025. Critical risk analysis of metals toxicity in wastewater irrigated soil and crops : a study of a semi - arid developing region. *Sci. Rep.* 1–10.
- Maiti, S.K., 2004. Water and wastewater analysis, ABD Publis. ed. Elsevier, Jaipur (India).
- Martens, D.A., Frankenberger, W.T., 1992. Modification of infiltration rates in a organic amended irrigated soil. *J. Agron.* 84, 707–717.
- Metahri, M.S., 2012. Elimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées, par des procédés mixtes. Cas la STEP Est la V. Tizi-Ouzou. Thèse Dr. Univ. tizi-Ouzou.
- Miloudi, A.-M., 2008. Par Abdel-Monem MILOUDI Thème des eaux dans la région d ' Oued Souf.
- Mishra, S., Kumar, R., Kumar, M., 2023. Use of treated sewage or wastewater as an irrigation water for agricultural purposes- Environmental, health, and economic impacts. *Total Environ. Res. Themes* 6, 100051.
- Mizyed, N.R., 2013. Challenges to treated wastewater reuse in arid and semi-arid areas. *Environ. Sci. Policy* 25, 186–195.
- Moussaoui, R., A Benhabib, P., 2015. LA REUTILISATION DES EAUX USEE TRAITÉES ET L'AGRICULTURE. *Les Cah. du mecas* 82–97.
- Nicolas Condom, Marianne Lefebvre, L.V., 2012. Les Cahiers du Plan Bleu 10.
- Norström, A., 2005. Treatment of domestic wastewater using microbiological processes and hydroponics in Sweden. Royal Institute of Technology.
- Ofori, S., Puškáčová, A., Růžicková, I., Wanner, J., 2021. Treated wastewater reuse for irrigation: Pros and cons. *Sci. Total Environ.* 760.

- Oliveira, P., Coufort-Saudejaud, C., Alliet, M., Frances, C., 2017. Journal of Water Science Procédé de traitement des eaux usées par boues activées : lien entre les propriétés morphologiques des floes et l'âge de boue Activated sludge systems for wastewater treatment : Relation between floc morphological properties and 28–32.
- Press, T.N.A., 2012. Water reuse: Potential for expanding the nation's water supply through reuse of municipal wastewater, Water Reuse: Potential for Expanding the Nation's Water Supply Through Reuse of Municipal Wastewater.
- Qadir, M., Bahri, A., Minhas, P.S., 2010a. The challenges of wastewater irrigation in developing countries.
- Qadir, M., Bahri, A., Sato, T., Al-Karadsheh, E., 2010b. Wastewater production, treatment, and irrigation in Middle East and North Africa. *Irrig. Drain. Syst.* 24, 37–51.
- Qadir, M., Bahri, A., Sato, T., Al-Karadsheh, E., Isambert, M., Lei, E., Louard, J., Schmutz, Q., Toulemonde, Q., Rapin, L., Gardies, R., Kamoun, O., 2010c. Wastewater production, treatment, and irrigation in Middle East and North Africa, *Irrigation and Drainage Systems*.
- Rezapour, S., Atashpaz, B., Moghaddam, S.S., Damalas, C.A., 2019. Heavy metal bioavailability and accumulation in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) irrigated with treated wastewater in calcareous soils. *Sci. Total Environ.* 656, 261–269.
- Riffat, R., 2013. Fundamentals of Treatment and.
- Rouibah, K., Belabbas, M., 2022. Modeling and monitoring surface water dynamics in the context of climate changes using remote sensing data and techniques: case of Ain Zada Dam (North-East Algeria). *Arab. J. Geosci.* 15, 1–9.
- Saini, V., Kumar, K.A., Thomas, J., Jayanthi, J., 2021. IMPACT OF THE FLY ASH, VERMICOMPOST AND INORGANIC FERTILISERS ON SOIL NUTRIENTS, CARBON POOLS, GROWTH AND YIELD OF SORGHUM FODDER (*Sorghum bicolor* L). *Orig. Res. Artic. Plant Cell Biotechnol. Mol. Biol.* 22, 34–48.
- SEEE: Secrétariat d'Etat auprès du Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et l'Environnement), 2007. Normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation. Arrêté n°1276-01 1520.
- Sengupta, S., Nawaz, T., Beaudry, J., 2015. Nitrogen and Phosphorus Recovery from Wastewater. *Curr. Pollut. Reports* 1, 155–166.
- Serraye, A., Idder, T., Bouhoun, M.D., Diatta, J.B., Tani, A., Genz, P., Ackermann, M., Nili, M.S., 2025. Dynamics of Eucalyptus and Sorghum biomass growth and nitrogen assessment at a Saharan sandy soil irrigated with treated wastewater 1–11.

- Singh, S., Kumar, M., 2006. Heavy metal load of soil, water and vegetables in peri-urban Delhi. Environ. Monit. Assess. 120, 79–91.
- Stefanakis, A., 2022. Constructed wetlands for wastewater treatment in hot and arid climates.
- Tawfik, R., Turk, K.G.B., Alomair, M., Sidahmed, S., Alqurashi, R.M., Ebrahim, A., El-Kafrawy, M., Hamad, S., Al-Karablieh, E., 2025. Enhancing Treated Wastewater Reuse in Saudi Agriculture: Farmers' Perspectives. Sustain. 17, 1–15.
- Tchounwou, P.B., Yedjou, C.G., Patlolla, A.K., Sutton, D.J., 2012. Molecular, Clinical and Environmental Toxicology, Molecular, Clinical and Environmental Toxicology, Experientia Supplementum. Springer Basel, Basel.
- Thiebault, T., 2024. Les produits pharmaceutiques dans les environnements anthropisés, de la mesure de la contamination à l'information sur les usages.
- Tilley, E., Lüthi, C., Reymond, P., Ulrich, L., Zurbrügg, C., Schwertenbeig, R., 2009. Compendium des Systèmes et Technologies d'Assainissement. Solut. Intégrées d'Assainissement 158.
- Trotta, V., Baaloudj, O., Brienza, M., 2024. Risks associated with wastewater reuse in agriculture : investigating the effects of contaminants in soil , plants , and insects 1–7.
- Vandermeersch, S., 2006. Etude comparative de l'efficacité des traitements d'épuration des eaux usées pour l'élimination des micro-organismes pathogènes.
- Woodard, F., 2001. Industrial Waste Treatment Handbook, Industrial Waste Treatment Handbook. Elsevier.
- Zainith, S., Mishra, S., Mani, S., Saxena, G., 2016. Microbes : An Ecofriendly Tools for the Treatment of Industrial Wastewaters.
- Zang, J., Kumar, M., Werner, D., 2021. Real-world sustainability analysis of an innovative decentralized water system with rainwater harvesting and wastewater reclamation. J. Environ. Manage. 280, 111639.

Sites Web

<https://d-maps.com/> (12-08-2025/ 19 :16)

<https://earth.google.com/> (14 -08-2025 / 16 :40)

<https://www.fao.org/> (20-07-2025/ 20 :38)

<https://www.interieur.gov.dz/> (03-09-2025/ 12 :10)