

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA - Bejaia

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Sciences Alimentaires
Filière : Sciences Alimentaires
Spécialité : Qualité des Produits et Sécurité Alimentaire



Réf :

Mémoire de Fin de Cycle
En vue de l'obtention du diplôme

MASTER

Thème

***Valorisation des eaux usées traitées pour la culture d'une
herbe aromatique dans le cadre de la sécurité
alimentaire***

Présenté par :

Khemis Nourdine & Galoul Amar

Soutenu le : 04/07/2024

Devant le jury composé de :

Mme. OUCHMOUKH N.

Professeur

Présidente

Mme. GUEMGHAR H.

Professeur

Encadrante

Mme. HAMRI S.

Professeur

Examinatrice

Année universitaire : 2023 / 2024

Remerciement

En premier lieu, je souhaite exprimer ma gratitude envers Dieu pour m'avoir accordé la force et la persévérance indispensables pour mener à bien ce projet.

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance envers notre promotrice, **Mme. GUEMGHAR HAYATE**, pour son précieux soutien, ses précieux conseils et sa grande disponibilité. Sa compétence et son dévouement ont joué un rôle crucial dans la réalisation de cette recherche.

Nous tenons à remercier chaleureusement le directeur du Centre de recherche des technologies agroalimentaire (CRTAA) **Mr. KHODIR MADANI** pour son accueil au sein de centre. Toute l'équipe du centre est également reconnaissante pour leur collaboration.

Nous souhaitons également remercier le directeur de la direction de l'ONA **Mr. ATMA-NIOU** pour nous avoir permis d'accéder à la station d'épuration, ainsi que le chef de la STEP et la technicienne de laboratoire **Mme. ADOUANE** pour leur soutien et leur assistance. Toute l'équipe de la station de Sidi Ali Lebher est également reconnaissante pour leur collaboration.

Nos reconnaissances à l'égard de membre de jury **Mme. OUCHMOUKHE** d'avoir accepté la présidence de jury. **Mme. HAMRI** d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Enfin, nous exprimons notre gratitude et notre reconnaissance envers tous les professeurs du Département des Sciences Alimentaires pour leur enseignement et leur soutien tout au long de notre cursus scolaire.

Dédicace

A mon très cher père **OMAR**

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

A ma très chère mère **OUARDIA**

Quoi que je fasse ou quoi que je dise, je ne saurai point de te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A mes deux frères **AKLI** et **ANIS**

Merci pour votre soutien affectueux et vos mots d'encouragement ont été une source de réconfort et de motivation.

À mes sœurs **SABRINA, LINDA, SANA, ILHAM** et **OUACILA**

Dont la gentillesse et le soutien indéfectible m'ont permis de surmonter les moments difficiles de cette recherche. Votre présence réconfortante et votre encouragements constants ont été inestimables tout au long de ce voyage académique. Et bien sûr aux deux petites anges que j'aime **BOUCHRA** et **ALAE**

A mes amis **MOHAMMED, NADIR, DJAMEL, LOUNES, KAMEL, RAFIK, KHELLAF, KIKI, LAHLOU** et tous les amis que j'ai connu jusqu'à maintenant. Merci pour votre amour et votre encouragement.

Et enfin, à mon ami qui a partagé avec moi la recherche de fin d'études et m'a toujours accompagné dans mon chemin : "**AMAR.**"

Nourdine

Dédicace

Au début, je remercie Allah qui m'a donné la force et le courage de terminer mes études.

Je dédie ce modeste travail avec tout mon amour, ma sincérité et ma fierté :

À mon père :

"Le pilier solide et l'œil vigilant, la personne la plus digne de mon estime et de mon respect. Aucun remerciement ne pourrait exprimer mes sentiments. Que Dieu te protège et t'accorde santé et longue vie **"EL HAMID "**.

À ma mère :

"Celle qui a souffert sans jamais me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes besoins, et qui n'a jamais ménagé ses efforts pour me rendre heureux : ma chère mère **"MARBOUHA "**.

À mon frère aîné ;

"Tu es mon modèle dans la vie, tu as été comme un second père pour moi. Avec tes conseils et ton soutien, tu as grandement contribué à la réussite de ce travail. Je suis fier de t'avoir dans ma vie. Que Dieu te garde pour nous et je te souhaite tout le bonheur, le succès et une bonne santé. **"HELAL "**.

À mes chères sœurs ;

"Karima, Fahima, Yasmina" et à l'épouse de mon frère, **Nabila**, en témoignage de fraternité et de soutien tout au long de mes études.

À mes neveux ; **"Nabil, Reda"** et à la petite princesse **Ikram** : Que Dieu les protège et leur accorde bonheur et succès.

À mes nièces et neveux ; **"Amine, Katia, Ryan, Amine, Aileen, Mohand Taher, Maryam "** et au petit prince **Adam**.

À mes amis : **"Yahya, Abderrahmane, Lahlou, Arezki, Kaci"**, merci pour votre amour et votre soutien.

. Et enfin, à mon ami qui a partagé avec moi la recherche de fin d'études et m'a toujours accompagné dans mon chemin : **"NOURDINE."**

Amar

Table des matières

Introduction

Chapitre 1

1 Définition des eaux usées	3
2 Origine et composition des eaux usées.....	4
2.1 Origine des eaux usées	4
2.1.1 Eaux usées domestiques	4
2.1.2 Eaux ruissellement	4
2.1.3 Eaux industrielles	4
2.1.4 Eaux agricoles	4
2.2 Composition des eaux usées	4
2.2.1 Substances chimiques.....	4
2.2.2 Masse bactériologique	4
3 Les différents types de pollution des eaux.....	5
4 Utilisation des eaux usées traitées en agriculture.....	6
4.1 Objectif principal du traitement des eaux usées.....	6
4.2 Définition de l'eau usée traitée	6
4.3 Formes et domaines de la réutilisation des EUT.....	7
5 Définition de station d'épuration STEP	8
5.1 Prétraitements	8
5.2 Traitement primaire (physico-chimique)	8
5.3 Traitement secondaire (biologique)	8
5.4 Traitement tertiaire (avancé)	9
6 des eaux de rejet.....	10
7 Réutilisation des eaux usées traitées (REUT) en agriculture.....	11
7.1 Etat actuel de la REUT en Algérie	11
7.2 Les bénéfices de la REUT (spécifique pour l'irrigation).....	12

Chapitre 2

1 Définition de l'hydroponie	13
2 Aperçu historique.....	13
3 Différents système d'hydroponie	14
3.1 Technique de film nutritif (NFT) (Figure 6)	14
3.2 Système de culture en solution ouverte (aquiculture) (Figure 7)	15
3.3 Système de culture en mèche	15
3.4 Système de culture aéroponique (Figure 8)	15
3.5 Système de culture en tour vertical	16

4 Composantes d'un système hydroponique	16
4.1 Substrat	16
4.2 Conteneurs	16
4.3 Sels nutritifs	16
5 Avantages et inconvénients	16
5.1 Avantages	17
5.2 Inconvénients	17
6 Comparaison entre l'hydroponie et la culture sur sol.....	17
Matériels et méthodes	
1 Récolte et analyse de l'eau	19
1.1 Analyses de l'eau	19
1.2 Traitement de l'eau par les matrices végétales	20
2 Mode opératoire.....	21
2.1 Récolte et séchage des matériaux végétaux.....	21
2.2 Activation de la matrice végétale.....	21
3 Culture	22
3.1 Choix des cultures.....	22
3.2 Mise en place de la culture hydroponique	22
3.3 Préparation de la solution nutritive	24
4. Enquête et Recueil de Données.....	24
Résultats et discussion	
1 Analyse des eaux d'irrigation	26
2 Développement de la culture hydroponique.....	27
2.1 Développement de la taille de la culture	27
2.2 Développement de nombre de feuilles de la culture	28
3 Analyses des plans de mélange	29
3.1 Analyses des métaux lourds	29
4 Analyse des variances ANOVA	31
4.1 Optimisation des variables pour l'extraction des métaux lourds	33
4.2 Analyse de l'accumulation des métaux lourds	34
5 Evaluation des perceptions et des attitudes du citoyen.....	34
Conclusion.....	40
Références bibliographiques	
Annexes	

Liste des abréviations

CE : conductivité électrique

COV : Composées organique volatils

DBO5 : Demande biochimique en oxygène pendant 5jours

DCO : Demande chimique en oxygène

DS/cm, mS/cm : Des- siemens par centimètre, millisiemens par centimètre

EDTA : Ethyle Diamine Tétra Acétique

EU : Eaux usées

EUT : Eaux usées traitées

FAO : Organisation des Nations Unis pour l'Alimentation et l'Agriculture

FRX : Spectrométrie fluorescence X (rayons X)

HCL : acide chlorhydrique

ISO : Organisation internationale de normalisation

JORA : Journal officiel de la république algérienne

MES : matière en suspension

NASA : Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace

NFT : Technique de film nutritif

NPK : Azote, phosphore, potassium

OMS : Organisation mondiale de la santé

REUT : Réutilisation des eaux usées traitées

STEP : Station d'épuration

Liste des figures

Figure 1 : Eaux usée	3
Figure 2 : Schéma intégration des eaux usées traitées dans le cycle général des ressources en eau	7
Figure 3 : Schéma résumant les grandes étapes de l'épuration des eaux usées (SFRP) ...	9
Figure 4 : Station d'épuration des eaux usées	10
Figure 5 : Culture hydroponique	13
Figure 6 : Système de film nutritif	14
Figure 7 : Schéma de système d'Aquiculture	15
Figure 8 : Schéma de système d'Aéroponie	15
Figure 9 : Conception du plan de mélange simplex-centroïde	22
Figure 10 : Système hydroponique	24
Figure 11 : Schémas ternaires.....	27
Figure 12 : Model quadratique des désirabilité et concentration des métaux lourds	30
Figure 13 : Développement de la taille des feuilles de la culture.....	31
Figure 14 : Développement de nombre de feuilles de la menthe	32
Figure 15 : Pourcentage des wilayas participants au sondage.....	34
Figure 16 : Répartition des participants selon le sexe.....	35
Figure 17 : Utilisations alimentaires et agricoles potentielles des eaux usées traitées	35
Figure 18 : Pourcentages des connaissances des gens sur les eaux usées traitées.....	36
Figure 19 : Pourcentages sur l'intention de consommateur a consommé les produits issus des eaux usées	37
Figure 20 : Pourcentage de la consommation attendue de produits agricoles issus des eaux usées traitées	38
Figure 21 : Opinions des consommateurs sur le coût des produits issus des eaux usées	39

Liste des tableaux

Tableau I. Différentes catégories de réutilisation des eaux usées épurées	7
Tableau II. Normes internationales de rejet	10
Tableau III. Norme nationale de la qualité des eaux usées traitées selon le journal officiel national.....	11
Tableau IV. Caractéristiques de la culture sur sol et de la culture hydroponique	18
Tableau V. Comparaison des résultats des analyses d'eau.....	25
Tableau VI. Concentration en métaux lourds absorbé par chaque mélange	28
Tableau VII. Variance ANOVA.....	29
Tableau VIII. Accumulation des métaux lourds dans la menthe récolter.....	33

Introduction

Le réchauffement climatique a le potentiel de perturber la disponibilité des aliments, de limiter l'accès à la nourriture et d'avoir un impact sur la qualité des aliments. La rareté des ressources en eau douce et le manque de pratiques optimales de gestion des eaux usées entraînent une irrigation de près de 3,5 millions d'hectares de terres avec des eaux non traitées ou partiellement traitées à travers le monde (**Thebo, et al. 2017**).

A cet effet, l'agriculture moderne est confrontée à de nombreux défis, dont les plus pressants sont la gestion durable des ressources en eau et la recherche de méthodes de culture efficaces et respectueuses de l'environnement. Dans ce contexte, la réutilisation des eaux usées traitées (REUT) et l'hydroponie émergent comme des solutions innovantes et complémentaires pour répondre à ces problématiques (**Pedrero, et al. 2010, Savvas and Passam 2002**). En Algérie, pays semi-aride, où l'eau est une ressource précieuse et limitée, ces technologies offrent des perspectives prometteuses pour l'agriculture et la sécurité alimentaire (**Hamlat, et al. 2013**).

La réutilisation des eaux usées, aussi appelée recyclage de l'eau, est le processus de traitement des eaux usées afin de les rendre adaptées à un nouvel usage, en particulier agricole. Cette méthode aide à diminuer la pression sur les ressources en eau douce, à réduire les émissions polluantes dans l'environnement et à garantir un approvisionnement en eau plus stable pour l'irrigation. La réutilisation des eaux usées représente une opportunité importante pour améliorer la durabilité des pratiques agricoles en Algérie, où les ressources hydriques sont particulièrement soumises à un stress particulier (**Hamlat, et al. 2013**).

En même temps, l'hydroponie, processus de culture des plantes sans sol, à l'aide de solutions nutritives aqueuses, offre de nombreux bénéfices par rapport à l'agriculture classique. Son utilisation optimisée permet de diminuer les maladies liées au sol et d'augmenter les rendements. L'hydroponie convient surtout aux zones arides et aux zones urbaines où l'espace cultivable est restreint. Selon (**Resh, 2022**), l'utilisation de l'hydroponie en Algérie pourrait faire de zones non cultivables des zones agricoles viables, ce qui aidera à assurer la sécurité alimentaire et à stimuler l'économie locale. Il est novateur et synergique d'intégrer la réutilisation des eaux usées dans les systèmes hydroponiques. L'exploitation des eaux usées traitées pour l'alimentation des systèmes hydroponiques permet d'optimiser l'utilisation de l'eau tout en minimisant les conséquences sur l'environnement. Le résultat de cette combinaison pourrait être essentiel pour faire face aux changements climatiques et

encourager l'agriculture durable en Algérie. Selon les travaux de (**Savvas and Passam 2002**), il a été démontré que les systèmes hydroponiques qui utilisent des eaux usées traitées peuvent non seulement maintenir des niveaux de production élevés, mais également améliorer la qualité des cultures.

En Algérie, des études et des projets pilotes commencent à étudier les possibilités de ces technologies. Dans les régions de Blida et d'Oran, par exemple, des projets de réutilisation des eaux usées pour l'irrigation sont en cours, tandis que des installations hydroponiques expérimentales sont en cours de développement à Alger et dans les régions sahariennes. Selon (**Hamlat, et al. 2013**), ces initiatives reflètent l'engouement grandissant pour des solutions agricoles novatrices et durables dans le pays (**Hamlat, et al. 2013**).

Notre étude vise à l'utilisation des eaux usées traitées (EUT) de la station d'épuration de Sidi Ali-Ibhar (Bejaia) (STEP) pour la culture de la menthe, une herbe aromatique très utilisée dans la gastronomie Algérienne, à l'aide d'un système hydroponique.

Notre travail comporte quatre parties :

- La bibliographique composée de deux chapitres portant sur les généralités sur les eaux usées, (la réutilisation des eaux usées traitées en agriculture) et la culture hydroponique.
- Optimisation du traitement de l'eau usée par adsorption sur une matrice végétale en utilisant un plan de mélange.
- Une culture en hydroponie avec une eau usée traitée.
- Une enquête sur l'avis du consommateur Algérien envers l'utilisation des eaux usées traitées.

Généralités sur les eaux usées

La contamination des eaux de surface et souterraines par les eaux usées, qu'elles soient d'origine domestique, industrielle ou agricole, pose en effet de sérieux problèmes environnementaux et sanitaires. La mauvaise gestion de ces eaux usées amplifie ces problèmes, entraînant plusieurs conséquences négatives (**Belaid, 2010**).

1 Définition des eaux usées

Les eaux usées désignent l'eau qui a été affectée par l'utilisation humaine, devenant ainsi impropre à la consommation directe sans traitement préalable (Figure 1). Cette catégorie comprend plusieurs types d'eaux altérées (**Tchobanoglus, et al. 2003**).

Selon la FAO (2008) ; l'eau, lorsqu'elle est jugée inadaptée ou inutile pour son usage initial ou sa production à cause de sa qualité, de sa quantité, ou du timing de sa disponibilité, peut sembler dépourvue de valeur immédiate. Toutefois, ce qui est considéré comme des eaux usées pour un utilisateur peut s'avérer une ressource utile pour un autre, dans un contexte différent (**FAO 2008**).



Figure 1 : Eaux usées (Photographie 1)

2 Origine et composition des eaux usées

Les eaux usées sont des eaux qui ont été affectées en qualité par l'utilisation humaine, provenant de diverses sources (Pons, et al. 2008).

2.1 Origine des eaux usées

2.1.1 Eaux usées domestiques

Elles proviennent des activités quotidiennes dans la maison, telles que la vaisselle, la lessive, les douches et les toilettes. Ces eaux contiennent souvent des détergents, des matières organiques, des bactéries et parfois des substances chimiques dangereuses (Pons, et al. 2008).

2.1.2 Eaux ruissellement

Ce sont des eaux qui s'écoulent sur les surfaces lors des précipitations, emportant avec elles des débris, des produits chimiques, des déchets et d'autres polluants des rues, des toits et des jardins vers les systèmes d'égouts ou directement dans les cours d'eau naturels.

2.1.3 Eaux industrielles

Provenant des processus industriels, elles peuvent contenir une grande variété de polluants, tels que des métaux lourds, des composés organiques volatils (COV), des huiles et des produits chimiques toxiques, en fonction du type d'industrie (Pons, et al. 2008).

2.1.4 Eaux agricoles

Elles incluent l'eau de drainage et le ruissellement provenant des terres agricoles, qui peuvent être chargées de pesticides, d'engrais chimiques et de sédiments (Pons, et al. 2008).

2.2 Composition des eaux usées

2.2.1 Substances chimiques

La majeure partie des eaux usées est constituée d'eau (99%), 1% de solides bien que ce pourcentage paraisse faible, ces solides sont classés en :

- ✓ Solides Organiques : se divisent en substances azotées : les protéines, des urées, acides aminés. Et de substances sans azote : cellulose, graisse et savon
- ✓ Solides Inorganiques : Azote, phosphore, chlorure, sulfate, carbonate, bicarbonate, ajoutant des substances toxiques comme cadmium, chrome, cuivre, mercure, etc.

2.2.2 Masse bactériologique

La quantification de la masse bactériologique est cruciale pour évaluer la charge microbienne des eaux usées avant et après traitement. Cela permet de déterminer l'efficacité des processus de traitement des eaux usées, en particulier la réduction des bactéries pathogènes pour protéger la santé publique et l'environnement (Tabet, 2014).

3 Les différents types de pollution des eaux

Selon le type de pollution en distingue :

- **Pollution chimique** : provient principalement des substances chimiques non biodégradables rejetées par les activités industrielles (**Rahou, 2014**).
- **Pollution organique** : fait partie de la pollution chimique et inclut les polluants à base de carbone, tels que la matière organique déversée dans l'environnement.
- **Pollution radioactive** : provient de retombées atmosphériques, de rayonnements industriels ou de contaminations accidentelles, notamment par des rejets de centrales nucléaires (**Ladjel, 2012**).
- **Pollution thermique** : résulte des variations de température de l'eau causées par les rejets de systèmes de refroidissement de centrales thermiques ou nucléaires, ce qui peut diminuer la teneur en oxygène de l'eau et nuire à la faune aquatique (**Kerambrun, 1983**).
- **Pollution microbienne** : due aux pathogènes présents dans les eaux usées urbaines d'origine humaine et animale, pouvant entraîner des maladies infectieuses (**Ladjel, 2012**).
- **Pollution agricole** : causée par l'emploi de produits phytosanitaires et d'engrais chimiques (**Raissi, 2014**).
- **Pollution hydrocarbure** : englobe les hydrocarbures aromatiques polycycliques issus des effluents industriels pétroliers, des usines à gaz et des réservoirs (**Ladjel, 2012**).

La préservation de la santé humaine et la protection de la biodiversité exigent un traitement rigoureux des eaux usées avant leur rejet ou réutilisation dans divers domaines.

4 Utilisation des eaux usées traitées en agriculture

Confrontée à une raréfaction de ses ressources en eau, l'Algérie doit envisager l'exploitation des vastes quantités d'eaux usées disponibles. L'agriculture se présente comme un secteur privilégié pour l'utilisation de ces eaux, à condition qu'elles soient traitées de manière à garantir leur innocuité pour les citoyens et l'environnement. Les stations d'épuration jouent un rôle crucial en atténuant les niveaux de pollution de ces eaux, permettant ainsi leur réutilisation en toute sécurité (**LARAB, 2019**).

4.1 Objectif principal du traitement des eaux usées

Le traitement des eaux usées contribue à la lutte contre les maladies hydriques et réduit les mauvaises odeurs en éliminant la charge organique et les microorganismes nuisibles. De plus il protège l'environnement et la biodiversité en évitant la dégradation et la pollution des écosystèmes naturels. Contribuant au développement de nouvelles approches pour l'utilisation et la valorisation de l'eau dans divers secteurs, optimisant ainsi les ressources en eau (BOUZIDI, 2020).

4.2 Définition de l'eau usée traitée

L'eau usée traitée est définie comme une eau qui a été soumise à divers processus de purification afin d'en éliminer les impuretés, les contaminants, et les agents pathogènes, la rendant ainsi apte à être réutilisée pour diverses applications. Ce traitement peut inclure des étapes physiques, chimiques, et biologiques pour assurer que l'eau atteigne les normes de qualité requises pour son nouvel usage prévu, qu'il s'agisse d'irrigation, d'usages industriels, ou même de certains usages domestiques en cas de traitement avancé. La réutilisation de l'eau usée traitée est une pratique clé dans la gestion durable des ressources en eau, en réduisant la pression sur les sources naturelles d'eau douce et en contribuant à la protection de l'environnement (BOUZIDI, 2020).

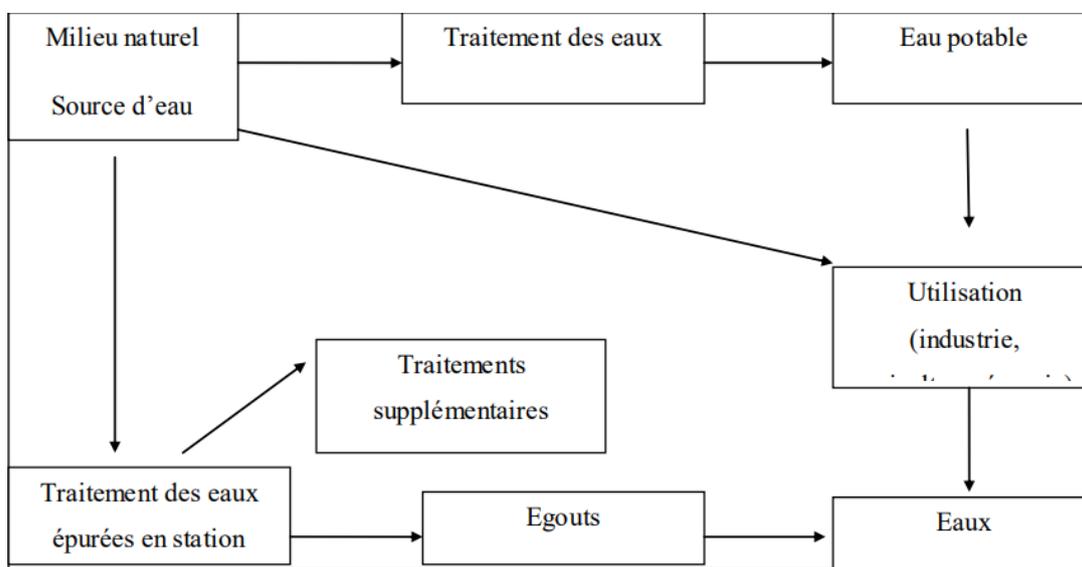


Figure 2 : Schéma intégration des eaux usées traitées dans le cycle général des ressources en eau (Belaid, 2010).

4.3 Formes et domaines de la réutilisation des EUT

Elle implique le traitement et la réutilisation de l'eau provenant de sources domestiques, industrielles, ou agricoles qui a été utilisée et qui, sans traitement, serait considérée comme polluée ou non potable. Le tableau I montre un aperçu des différentes formes et domaines de la réutilisation des EUT. Cette pratique offre plusieurs avantages, notamment la réduction de la pression sur les ressources en eau douce, la diminution du rejet des eaux usées dans l'environnement, et la contribution à la sécurité hydrique.

Tableau I. Différentes catégories de réutilisation des eaux usées épurées (FAO, 2003)

Forme de Réutilisation	Domaine d'Application	Exemples d'Utilisation
Agricole	Agriculture	Irrigation des cultures, arbres fruitiers, parcs
Urbaine	Municipal	Arrosage des espaces verts, terrains de golf
Industrielle	Industrie	Refroidissement des machines, processus de fabrication
Recharge des aquifères	Environnemental	Recharge des nappes phréatiques, gestion des eaux souterraines
Usages domestiques non potables	Domestique	Rinçage des toilettes, irrigation résidentielle

5 Définition de station d'épuration STEP

Une station d'épuration, aussi connue sous l'acronyme STEP (Station d'épuration des Eaux Usées), joue un rôle crucial dans le traitement des eaux usées avant leur rejet dans le milieu naturel. Elle est typiquement située à l'extrémité d'un réseau de collecte, servant de point final avant que les eaux ne rejoignent les rivières, lacs ou océans. Ce processus de dépollution est vital pour maintenir les standards de santé publique et protéger l'environnement. Le traitement des eaux usées au sein d'une STEP passe par différentes étapes (Figure 3) :

5.1 Prétraitements :

Ces opérations initiales visent à préparer l'eau usée pour les étapes suivantes en retirant les éléments qui pourraient endommager l'équipement ou interférer avec les traitements ultérieurs. Les méthodes comprennent :

- **Dégrillage** : Utilisation de grilles pour filtrer et éliminer les débris volumineux des eaux usées.
- **Dessablage et déshuilage** : Les eaux passent dans des bassins où le sable se dépose sous l'effet d'une faible vitesse d'écoulement tandis que les graisses sont extraites en surface grâce à la flottation.

5.2 Traitement primaire (physico-chimique) :

Cette étape implique la décantation des solides en suspension grâce à la gravité. Des adjuvants chimiques tels que les sels de fer ou d'aluminium sont ajoutés pour favoriser la coagulation et la floculation, formant des agrégats qui se déposent au fond du bassin.

5.3 Traitement secondaire (biologique) :

Ce traitement repose sur l'action de microorganismes, soit en présence d'oxygène (aérobie), soit en son absence (anaérobie). Ces organismes dégradent la matière organique soluble, transformant les polluants en dioxyde de carbone, en nitrates, ou en azote gazeux. La boue et l'eau épurée sont ensuite séparées dans un clarificateur, et une partie de la boue est recyclée vers le bassin biologique pour maintenir la population microbienne.

5.4 Traitement tertiaire (avancé) :

Cette phase cible les polluants résiduels difficiles à biodégrader, tels que l'azote, le phosphore, les pesticides, les détergents et les germes pathogènes. Elle peut inclure des méthodes de désinfection, telles que l'ajout de chlore, bien que cette pratique puisse présenter des risques pour la faune aquatique en raison de la toxicité du chlore.

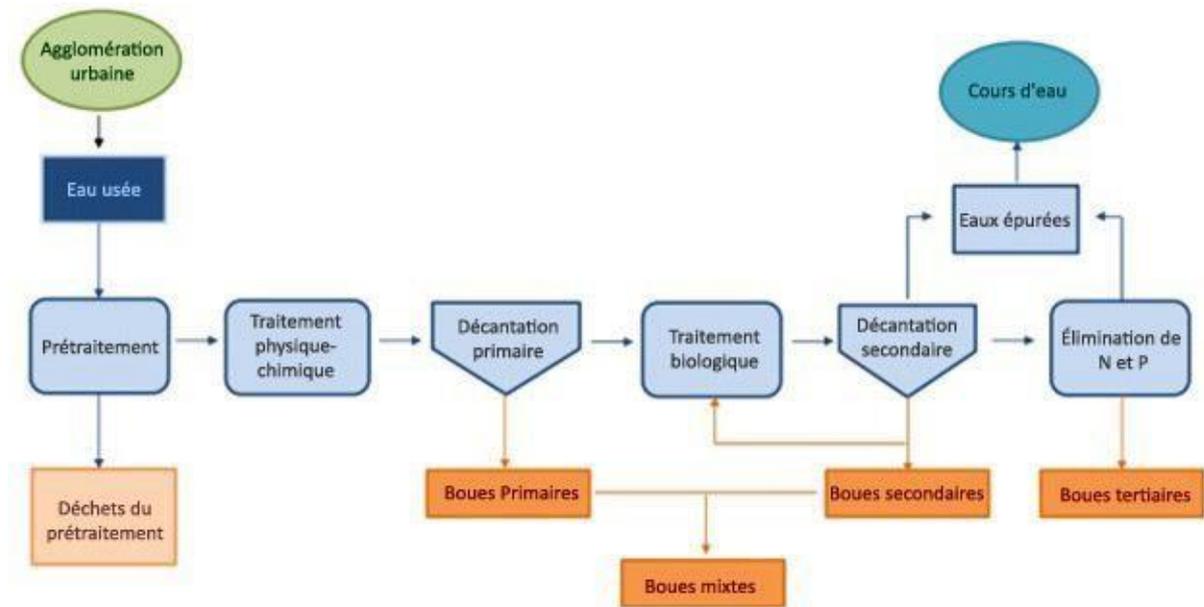


Figure 3 : Schéma résumant les grandes étapes de l'épuration des eaux usées (SFRP) (Photographie 2)

Une STEP (Figure 4) est une infrastructure essentielle pour le traitement des eaux usées, permettant de réduire significativement les impacts environnementaux et de santé publique liés aux eaux souillées. Ces étapes de traitement assurent que les eaux rejetées dans l'environnement respectent les normes réglementaires, minimisant ainsi les risques pour l'écosystème et la santé humaine.



Figure 4 : Station d'épuration des eaux usées (Photographie 2)

6 Normes des eaux de rejet

Les normes légales de rejet des eaux usées sont établies pour protéger les ressources en eau et l'environnement. L'OMS fournit des lignes directrices pour la qualité de l'eau (Tableau

II), y compris des recommandations pour le traitement des eaux usées, surtout dans les pays en développement.

Tableau II. Normes internationales de rejet FAO (2008)

Caractérisation	Normes utilisée OMS
pH	6,5 -8,5
DBO5	30 mg/l
DCO	90 mg/l
MES	20 mg/l
NH ₄	0,5 mg/l
NH ₂	1 mg/l
NH ₃	1 mg/l
P ₂ O ₅	2 mg/l
T°	30c°
Couleur	Incolore
Odeur	Inodore

7 Réutilisation des eaux usées traitées (REUT) en agriculture

La valorisation des eaux usées traitées est essentielle pour répondre aux défis de la pénurie d'eau, comme le soulignent plusieurs études (**Mebarki, 2010**). Cette approche met en lumière l'importance de réutiliser ces ressources non conventionnelles. En Algérie, le plan national de développement agricole a clairement opté pour l'exploitation de ces eaux dans le secteur agricole, conformément aux travaux de (**Khiati, 2007**). Les éléments nutritifs présents dans les eaux usées traitées sont considérés comme des fertilisants. Plusieurs recherches ont confirmé leurs effets bénéfiques sur la qualité et le rendement des cultures (**Rezapour, et al. 2018**).

7.1 Etat actuel de la REUT en Algérie

L'Algérie est confrontée à des défis majeurs en raison de la pénurie d'eau, aggravée par les pressions démographiques et les changements climatiques. Il est donc essentiel de gérer les ressources en eau de manière plus durable (Kessira, 2018).

Cadre réglementaire et initiatives : L'Algérie a mis en place un cadre réglementaire qui favorise la réutilisation des eaux usées comme l'un des piliers de sa stratégie nationale de gestion de l'eau. Les normes de qualité pour les eaux réutilisées sont définies pour garantir leur sécurité et leur efficacité dans divers usages, notamment l'irrigation agricole (Tableau III) (Conseil Mondial de l'Eau, 2012).

Tableau III. Norme nationale de la qualité des eaux usées traitées selon le journal officiel national (JORA, 2006)

Paramètre	Norme de Rejet
pH	5,5 - 8,5
Demande Biochimique en Oxygène (DBO5)	≤ 30 mg/ml
Demande Chimique en Oxygène (DCO)	≤ 90 mg/L
Solides en Suspension (SES)	≤ 35 mg/L
Huiles et Graisses	≤ 10 mg/L
Azote Total (NTK)	≤ 30 mg/L
Phosphore Total	≤ 2 mg/L
Ammoniac (NH ₃)	≤ 5 mg/L
Composés Phénoliques	≤ 0,5 mg/L
Cadmium (Cd)	≤ 0,01 mg/L
Plomb (Pb)	≤ 0,1 mg/L

Investissements et projets

Des investissements significatifs ont été réalisés pour moderniser les infrastructures existantes et en construire de nouvelles. Cela inclut la mise en œuvre de stations d'épuration avancées capables de fournir des eaux de qualité adéquate pour la réutilisation. Des projets comme

celui de la station de traitement de Baraki montrent un engagement envers l'innovation technologique et la durabilité (**Drouiche et al., 2012**).

7.2 Les bénéfices de la REUT (spécifique pour l'irrigation)

- La REUT permet une augmentation des ressources en eau disponibles pour l'irrigation, essentielle dans les régions arides (**Asano 1998, Jiménez and Asano 2008**).
- Les eaux usées traitées fournissent des nutriments essentiels qui améliorent la fertilité du sol et réduisent le besoin de fertilisants chimiques (**Angelakis, et al. 1999**).
- L'utilisation des eaux usées traitées peut diminuer les coûts liés à l'extraction et au traitement de l'eau, ainsi que l'achat de fertilisants (**Lazarova and Bahri 2004**).
- La REUT aide à la gestion durable des ressources en eau en réduisant les prélèvements d'eau douce et en limitant les rejets d'eaux usées (**Asano and Levine 1996**).
- Réduit la quantité de pollution rejetée dans les cours d'eau, améliorant la santé des écosystèmes aquatiques (**Scott, et al. 2004**).
- Offre une source d'eau plus fiable pour l'irrigation, augmentant la résilience des systèmes agricoles face aux changements climatiques (**Marecos do Monte et Bjornlund, 2011**).
- Facilite le développement de l'agriculture urbaine, contribuant à la sécurité alimentaire urbaine et à la verdurisation des villes (**Rusan, et al. 2007**).

Chapitre 2 : Culture hydroponique

1 Définition de l'hydroponie

La culture hydroponique (Figure 5) est une technique de culture hors-sol qui utilise une solution nutritive fraîche et un substrat inerte (minéral ou végétal) pour éliminer les supports et apports du sol ; Ce système permet un contrôle précis de l'apport en eau, en nutriments et en oxygène, favorisant ainsi une croissance rapide et vigoureuse des plantes (**Savvas and Passam 2002**).



Figure 5 : Culture hydroponique (Photographie 3)

2 Aperçu historique

Bien que souvent considérée comme une innovation contemporaine, l'hydroponie a en réalité des origines historiques profondes. Les Babyloniens, les Égyptiens et les Aztèques étaient déjà des civilisations anciennes qui utilisaient des formes primitives d'hydroponie. L'un des sept merveilles du monde antique, les jardins suspendus de Babylone, étaient sans doute alimentés par des systèmes hydroponiques (**Resh, 2022**).

Toutefois, l'hydroponie a réellement commencé à se développer au XXe siècle avec les travaux pionniers du botaniste allemand Julius von Sachs et du chimiste américain William Henry Gericke. Avec son expérience sur la culture sans sol, il a élaboré le concept d'hydroponie moderne dans les années 1920 et 1930. En 1937, il a introduit le concept d'hydroponie dans son ouvrage "Guide complet à la jardinière sèche" (**Gericke, 1937**).

La recherche et le développement de l'hydroponie se sont accélérés dans les années qui ont suivi, en particulier pendant la Seconde Guerre mondiale, où l'hydroponie a été perçue comme une solution possible pour assurer la sécurité alimentaire dans les zones affectées par les conflits (**Savvas and Passam 2002**). Dans les années 1960 et 1970, la NASA a mené des recherches approfondies sur l'utilisation de l'hydroponie dans l'espace, dans le cadre des programmes Apollo (**Jones Jr 2016**).

À partir de cette date, l'hydroponie a connu une évolution continue, avec des progrès technologiques comme l'automatisation des systèmes de contrôle et l'emploi de techniques de culture en couverture. De nos jours, la technique de l'hydroponie est couramment employée dans le domaine de l'agriculture commerciale, de la recherche scientifique et par les passionnés de jardinage à domicile à travers le globe (**Resh, 2022**).

3 Différents système d'hydroponie

Il existe plusieurs systèmes hydroponiques utilisés dans la culture des plantes. Voici quelques-uns des systèmes les plus couramment utilisés :

3.1 Technique de film nutritif (NFT) :

Dans ce système (Figure 6), une fine couche d'eau riche en nutriments se déplace en permanence le long des racines des plantes, leur apportant les nutriments dont elles ont besoin pour leur croissance. Les racines sont exposées à l'air et l'oxygène est absorbé (**Jones Jr, 2016**).



Figure 6 : Système de film nutritif (Photographie 3)

3.2 Système de culture en solution ouverte (aquiculture) :

Ce système (Figure 7) implique de cultiver les plantes dans une solution nutritive liquide, souvent contenue dans des bacs ou des réservoirs. Les racines des plantes sont immergées dans la solution, et l'excès de solution est drainé ou recyclé (Van Os, et al. 2019).

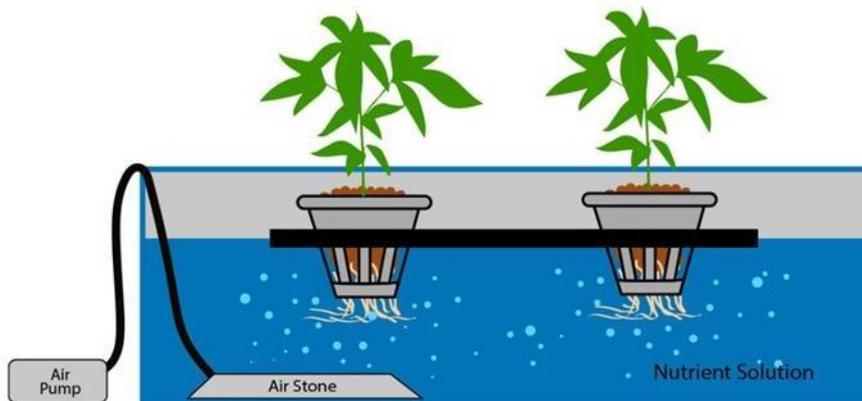


Figure 7 : Schéma de système d'Aquiculture (Photographie 3)

3.3 Système de culture en mèche :

Dans ce système, les plantes sont placées dans un substrat inerte comme la laine de roche ou la fibre de coco, qui agit comme une mèche pour transporter l'eau et les nutriments vers les racines des plantes (Resh, 2022).

3.4 Système de culture aéroponique :

Ce système (Figure 8) implique de pulvériser une solution nutritive directement sur les racines des plantes suspendues dans l'air. Les racines sont maintenues dans un environnement aéré, favorisant ainsi une absorption efficace des nutriments (Belbachir, 2017).

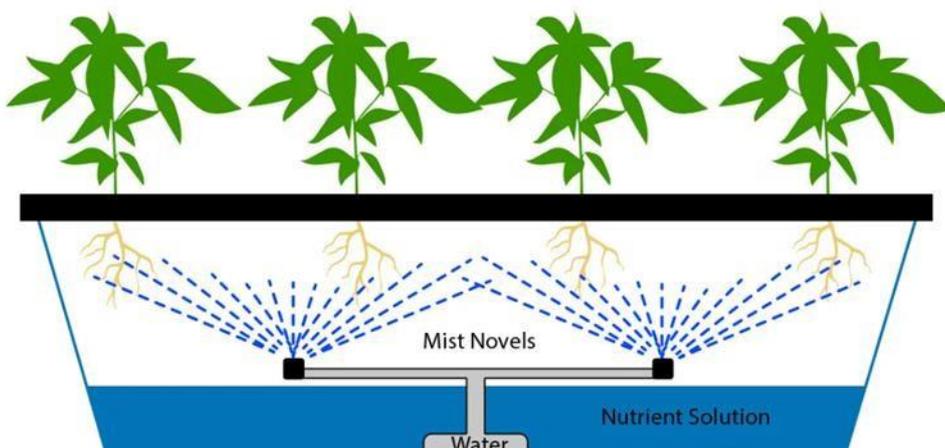


Figure 8 : Schéma de système d'Aéroponie (Photographie 3)

3.5 Système de culture en tour vertical :

Ce système utilise des tours ou des colonnes verticales pour cultiver les plantes. Une solution nutritive est pompée ou pulvérisée sur les racines des plantes, qui poussent le long des parois de la tour (Savvas and Passam 2002, Resh 2022).

4 Composants d'un système hydroponique :

4.1 Substrat

En agriculture, il concerne n'importe quel matériau, qu'il soit naturel ou artificiel, pur ou mélangé. Il favorise la fixation du système racinaire et assure le soutien de la plante cultivée. Le substrat doit permettre un développement normal du système (Blanc, 1987). D'une manière globale, la nature et les propriétés physiques, chimiques et biologiques, permettent le classement d'un substrat (Vitre, 2013).

4.2 Conteneurs

Il s'agit des contenants qui renferment le substrat. Ils sont plus ou moins grands selon l'espèce cultivée et le système racinaire. En règle générale, ils sont fabriqués en plastique, chimiquement inertes, imperméables, abordables, durables et leur installation doit être simple, comme c'est le cas des gobelets en plastique (Mahdjouba, 2018).

4.3 Sels nutritifs

Il est essentiel qu'elles répondent aux besoins en eau et en nutriments de l'espèce cultivée pendant la phase de développement envisagée, en prenant en compte l'environnement climatique actuel. Les composants présents dans la solution comprennent :

- **Sels minéraux** : Azote, Phosphore, Potassium, Calcium, Sodium et Soufre.
- **Oligo-éléments** : Fer, Cuivre, Brome, Cobalt, Zinc, Aluminium, Silicium, Manganèse, Molybdène et Sélénium.

5 Avantages et inconvénients

5.1 Avantages

Grâce à un système de recyclage de l'eau, l'hydroponie offre de nombreux bénéfices, tels qu'une utilisation optimale de l'eau, ce qui permet de réduire la consommation jusqu'à 90 % par rapport aux méthodes en sol traditionnelles. L'accès direct et constant aux nutriments essentiels favorise la croissance plus rapide des plantes cultivées en hydroponie. Ce système offre aussi une surveillance précise des niveaux de nutriments, ce qui favorise l'amélioration de la croissance des plantes. La culture sans sol permet de réduire considérablement les risques de

maladies du sol, ce qui réduit la nécessité d'utiliser des pesticides. En outre, les hydroponiques offrent une utilisation optimale de l'espace, pouvant être implantés dans des espaces limités tels que les serres urbaines, ce qui permet une production alimentaire intense dans des zones peuplées (Maucieri, et al. 2018).

5.2 Inconvénients

La création d'un système hydroponique comporte divers obstacles. En premier lieu, le prix initial est élevé en raison de l'acquisition d'équipements spécialisés tels que des pompes, des systèmes d'éclairage et des nutriments. En outre, il est essentiel de surveiller et de maintenir ces systèmes de manière régulière, en surveillant les niveaux de pH et de nutriments, afin d'assurer leur efficacité. Il est également possible que les systèmes hydroponiques rencontrent des problèmes techniques, ce qui peut mettre en péril la croissance des plantes. Les pompes et les systèmes d'éclairage nécessitent souvent une alimentation électrique constante, ce qui peut poser problème en cas de coupure de courant. Finalement, la mise en œuvre et la gestion de ces systèmes nécessitent une certaine compétence et une formation, ce qui peut poser un défi pour les débutants (Maucieri, et al. 2018).

6 Comparaison entre l'hydroponie et la culture sur sol

L'hydroponie et la culture sur sol sont deux méthodes de culture des plantes qui présentent des avantages et des inconvénients distincts. Cette comparaison met en évidence les principales différences entre ces deux approches (Tableau IV), en tenant compte des aspects tels que l'efficacité de l'utilisation des ressources, la croissance des plantes et la facilité de mise en œuvre (Jones Jr, 2016).

Tableau IV. Caractéristiques de la culture sur sol et de la culture hydroponique (Maucieri, et al. 2018)

Caractéristique	Hydroponie	Culture sur sol
Milieu de croissance	Utilise une solution nutritive liquide	Utilise le sol comme support de croissance
Contrôle des nutriments	Nutriments directement administrés à la plante	Dépend de la composition naturelle du sol
Gestion de l'eau	Utilise moins d'eau que la culture traditionnelle	Peut nécessiter plus d'eau, sujette à l'évaporation et à

Contrôle des maladies et des parasites	Moins de risques de maladies et de parasites	Risques potentiellement plus élevés de maladies et de parasites
Productivité	Peut-être plus productive en termes de rendement	Peut-être moins prévisible en termes de rendement
Espace et logistique	Peut-être installé dans des espaces restreints	Requiert généralement plus d'espace
Consommation d'énergie	Peut nécessiter des pompes et des lumières supplémentaire	Moins de besoin en énergie pour le fonctionnement

Matériel et Méthodes

1 Récolte et analyse de l'eau

L'eau usée utilisée dans la présente étude a été récupérée à partir de la station d'épuration des eaux usées de Sidi-Ali Ibhar (Bejaïa) après traitement secondaire. Des analyses ont été réalisées au niveau de la STEP. Ces analyses comprennent des mesures physico-chimiques pour surveiller et contrôler la pollution de l'eau.

1.1 Analyses de l'eau

1. Demande Biochimique en Oxygène sur 5 jours (DBO5)

La DBO5 est une méthode couramment utilisée pour évaluer la quantité de matière organique biodégradable présente dans un échantillon d'eau. L'analyse de la Demande Biochimique en Oxygène sur 5 jours (DBO5) a été réalisée (**Mouni, et al. 2009**). L'échantillon a été incubé dans une bouteille fermée pendant 5 jours à une température de 20°C dans le noir afin d'éviter la photosynthèse. La quantité d'oxygène dissous restant dans l'échantillon a été mesurée par un oxymètre et comparée à celle de l'échantillon initial afin de déterminer la quantité d'oxygène consommée, ce qui a permis d'obtenir une indication de la DBO5 à la fin de la période d'incubation (**Baird, et al. 2017**).

2. Matière en suspension (MES)

L'analyse des Matières en Suspension (MES) est une méthode utilisée pour évaluer la quantité de solides en suspension présents dans un échantillon d'eau. Les particules solides, telles que des sédiments, des débris organiques et des matières en suspension non dissoutes dans l'eau, ont été comprises dans les MES. Un volume de 500 ml a été filtré à travers un filtre à membrane de 0,45 micromètre. Le filtrat a ensuite été séché et la masse des particules retenues sur le filtre a été mesurée. Cette masse a été rapportée à la quantité d'eau filtrée pour exprimer les MES en mg/L (milligrammes par litre) ou en ppm (parties par million) (**Baird, et al. 2017**).

3. Conductivité

La conductivité de l'eau est une évaluation de sa capacité à transporter l'électricité, qui est calculée en fonction de la concentration des ions dissous tels que les chlorures, les sulfates et les fibrines. D'après la norme **ISO 7888 :1985 "Qualité de l'eau - Détermination de la conductivité"**, La procédure a débuté en calibrant le conductimètre avec des solutions étalons spécifiques. Par la suite, la sonde a été rincée avec de l'eau distillée afin d'éviter toute contamination croisée, puis elle a été plongée dans l'échantillon d'eau à tester. La suppression de toute bulle d'air sur la sonde a été essentielle, car elles pouvaient altérer les mesures. Une fois la lecture

stabilisée, la conductivité a été enregistrée, en tenant compte de la température de l'eau, qui a souvent été compensée automatiquement par les appareils modernes. Les résultats obtenus ont été exprimés en micro siemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$), fournissant une indication précise de la qualité de l'eau.

4. Mesure du pH

Le pH est une évaluation de l'acidité ou de l'alcalinité de l'eau, avec une échelle de 0 à 14. Après le calibrage du pH-mètre avec des solutions tampons de pH connu (pH 4, 7 et 10) le pH de l'échantillon d'eau est enregistré. Le maintien d'une température constante est essentiel, car le pH peut fluctuer en fonction de la température.

5. Demande Chimique en Oxygène (DCO)

Il est essentiel de mesurer la Demande Chimique en Oxygène (DCO) dans les eaux usées afin d'évaluer la quantité de polluants organiques présente. Le protocole de ce test a été défini selon l'Organisation internationale de normalisation (ISO). Un volume mesuré de l'échantillon filtré a été placé dans un ballon de titrage, auquel on a ajouté une solution de dichromate de potassium en excès et un mélange d'acide sulfurique et d'acide phosphorique pour assurer un milieu acide. Le mélange a été chauffé à reflux pendant deux heures, permettant au dichromate de réagir avec la matière organique présente dans l'échantillon. Après refroidissement, l'excès de dichromate n'ayant pas réagi a été titré avec une solution de sulfate ferreux ammoniacal (FAS) standard en présence d'un indicateur, tel que le féroïen, jusqu'à atteindre le point de virage, signifiant la fin du titrage, puis on calcule la DCO fonction de la quantité de dichromate consommée par la matière organique **ISO 6060 :1989**.

1.2 Traitement de l'eau par les matrices végétales

Trois matrices végétales ont été choisi pour traiter l'eau usée avant son exploitation dans le système d'hydroponie pour la culture de la menthe. Une optimisation par plan de mélange a été utilisé pour déterminer la matrice végétale ayant le pouvoir adsorbant le plus élevé sur trois métaux lourds à savoir le plomb (Pb), le cuivre (Cu) et le zinc (Zn)

- 1. Feuille d'ortie** : Les feuilles d'ortie proviennent principalement de l'ortie dioïque (*Urtica dioica*), une plante herbacée vivace appartenant à la famille des Urticacées. Les feuilles de cette plante sont caractérisées par leur forme dentelée et leur surface recouverte de petits poils urticants contenant des substances irritantes comme l'histamine, la sérotonine et l'acide formique. Lorsqu'elles sont touchées, ces poils peuvent provoquer des démangeaisons et des rougeurs sur la peau (**Shakya, 2016**).

2. **Grignon d'olive** : un sous-produit obtenu lors de l'extraction de l'huile d'olive. Il s'agit du résidu solide qui reste après le pressage des olives et l'extraction de l'huile. Le grignon comprend les peaux, les pulpes, les noyaux et parfois les restes d'huile. Ce matériau peut être utilisé de différentes façons, notamment pour la production de biocarburants, d'engrais, de biomasse pour la production d'énergie, et comme aliment pour le bétail après traitement (**Shakya, 2016**).
3. **Ecorce d'orange** : Elle se définit par la partie externe du fruit de l'oranger (*Citrus sinensis*). Elle se compose de deux couches principales (**Shakya, 2016**).

Le zeste : La couche externe colorée, riche en huiles essentielles et en composés aromatiques. Elle est souvent utilisée comme agent aromatisant en cuisine et dans les produits de confiserie.

Le mésocarpe (ou albédo) : La couche interne blanche, plus amère et moins utilisée en cuisine mais riche en fibres et en flavonoïdes.

2 Mode opératoire

2.1 Récolte et séchage des matériaux végétaux

Les parties végétales utilisées (grignon d'olive, écorce d'orange et feuilles d'ortie) ont été récoltées puis séchées dans une étuve ventilée à une température de 50°C pendant 24h. Après séchage, les matériaux végétaux ont été broyés en fine poudre et tamisés (250 µm).

2.2 Activation de la matrice végétale

Pour stimuler l'activité de la matière végétale sèche, un échantillon de ces matrices ont été exposées à une solution d'acide chlorhydrique (HCl) à une concentration de 0,1 M pendant 3 heures à température ambiante. Une fois ce temps de contact terminé, la matrice activée a été rincée à l'eau distillée pour éliminer tout excès d'acide, puis le contenu a été filtré. Ensuite, la matrice activée a été séchée dans une étuve ventilée à une température de 60°C jusqu'à ce qu'elle devienne un matériau sec (**Kadirvelu, et al. 2001**).

L'emploi du HCl dans cette procédure offre de nombreux bénéfices. D'abord, la manipulation à l'acide a la capacité d'ouvrir les pores de la matrice végétale, ce qui augmente sa surface spécifique et améliore sa capacité d'adsorption. Ensuite, l'acide chlorhydrique a la capacité d'introduire des groupes acides fonctionnels sur la surface de la matrice, comme des groupes carboxyles (-COOH) et hydroxyles (-OH), qui peuvent former des complexes avec les ions métalliques, ce qui accroît la capacité d'acquisition. Finalement, l'emploi du HCl permet de purifier la matrice végétale des impuretés inorganiques et organiques susceptibles d'interférer avec le processus d'adsorption (**Gupta, et al. 2009**).

3 Optimisation de l'adsorption des métaux lourds par plan de mélange

Un plan de mélange simplex-centroïde a été réalisé (Figure 9) pour déterminer la constitution de la matrice végétale qui a la propriété optimale d'adsorber les métaux lourds étudiés.

Une fois que les matériaux végétaux ont été séchés, les proportions suggérées par le plan d'expérience ont été réalisées. 10 g de la poudre obtenue ont été ajoutés à 100 ml d'eaux usées traitées. La dispersion de la poudre a été assurée en agitant le mélange pendant 20 minutes (Senthilkumaar, et al. 2000). Puis, le mélange a été laissé reposer pendant 5 heures afin que la poudre puisse absorber efficacement les métaux lourds présents dans les eaux usées. Par la suite, la solution a été minutieusement filtrée en utilisant un papier filtre afin de récupérer la poudre. Ensuite, cette poudre a été séchée dans une étuve ventilée à haute température afin de supprimer toute humidité résiduelle. (Senthilkumaar, et al. 2000).

Après séchage, la poudre est analysée par spectrométrie fluorescence X (FRX) afin de mesurer la quantité de métaux lourds absorbés et de déterminer le mélange ayant le plus grand pouvoir adsorbant.

Les proportions du mélange

Essais	Les proportions du mélange		
	Ortie	Ecorce d'orange	Grignon d'olive
1	0,50	0,50	0,00
2	0,00	1,00	0,00
3	0,33	0,33	0,33
4	0,00	0,00	1,00
5	0,50	0,00	0,50
6	1,00	0,00	0,00
7	0,00	0,50	0,50

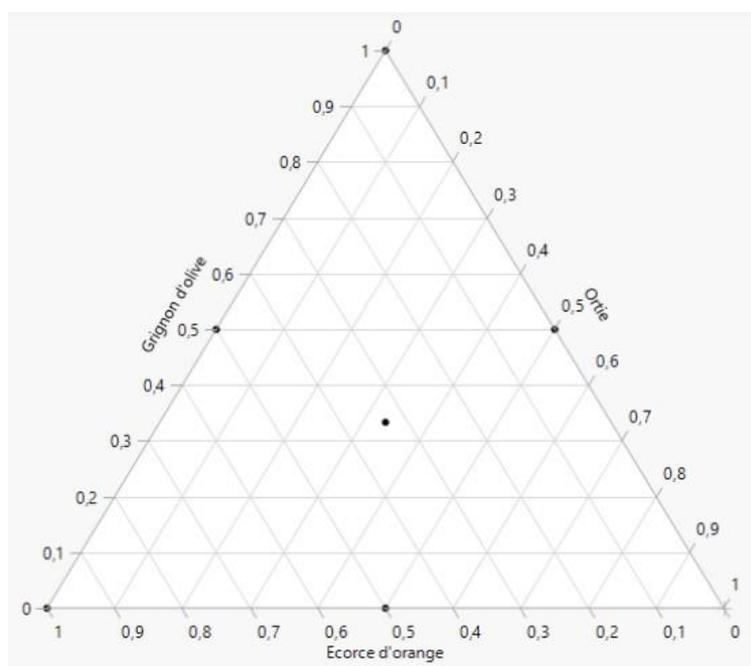


Figure 09 : Conception du plan de mélange

4 Culture

4.1 Choix des cultures

Menthe : La menthe est une plante herbacée vivace de la famille des Lamiacées, connue sous le nom scientifique *Mentha*. Ses feuilles aromatiques au goût rafraîchissant sont célèbres. La menthe peut mesurer de 30 à 90 centimètres de haut. (Galea, L. E. 2019).

4.2 Mise en place de la culture hydroponique

Le 25 avril 2024, les graines de la menthe ont été plantées dans des plaques alvéolées remplies de terreau et arrosées régulièrement avec de l'eau potable afin de stimuler la germination. Une germination fructueuse a été constatée après 35 jours (Figure 10), avec des feuilles de 1,2 cm et 2 à 3 feuilles. Le 5 juin 2024, ces jeunes plants ont été transplantés dans un système hydroponique novateur (Figure 10) comprenant trois niveaux. Les racines ont été bien rincer avec de l'eau potable afin de nettoyer ces derniers du terreau. Tous les niveaux renferment de la menthe, mais sont différents en fonction du type d'eau utilisé pour l'irrigation. Le premier étage est arrosé avec de l'eau ordinaire, comme point de référence. Le niveau suivant utilise des eaux usées traitées, ce qui permet de tester l'efficacité de la réutilisation des eaux pour l'irrigation. Les eaux usées retraitées par une matrice végétale ont été utilisées pour arroser le troisième niveau, afin d'absorber les métaux lourds et d'améliorer la qualité de l'eau. Des nutriments ont été ajouté afin d'assurer que les plantes reçoivent tous les éléments essentiels à leur croissance optimale. Cela favorise l'optimisation de la santé des plantes et de la productivité globale du système hydroponique.

Pour garantir une culture hydroponique optimale, il a été primordial de surveiller et de réguler soigneusement les conditions de l'eau utilisée pour l'irrigation des plantes. Les principaux paramètres à contrôler étaient le pH et la conductivité électrique de la solution nutritive. Dans notre cas, les plantes nécessitent des valeurs de pH comprises entre 6.5 et 7.5, ce qui assure une absorption efficace des nutriments essentiels. La conductivité électrique doit se situer entre 1.2 et 1.8 mS/cm, garantissant une concentration adéquate en sels nutritifs sans risque de toxicité.

En plus de ces paramètres hydriques, il est crucial de fournir une exposition adéquate à la lumière. Les plantes hydroponiques nécessitent généralement entre 12 et 16 heures de lumière par jour. Une bonne aération des racines par circulation de l'eau qui est indispensable pour prévenir les maladies fongiques et favoriser une oxygénation optimale a été mis en place grâce à un système de pompage discontinu contrôlé.



Figure 10 : Système hydroponique

4.3 Préparation de la solution nutritive

Dans 300 ml d'eau, 7,5 g de nitrate de potassium, 3 g de KH_2PO_4 (phosphate monopotassique), 3 g de MgSO_4 (sulfate de magnésium) et 0,3 g de Fe-EDTA ont été dissous pour préparer la solution nutritive. Cette solution a été agitée à l'aide d'une plaque agitatrice (**velp scientifica AM4**) pendant une durée de 15 minutes. Par la suite, chaque portion de 100 ml de cette solution a été ajoutée à 10 litres d'eau utilisée pour l'irrigation des plantes du système hydroponique. Cette méthode a assuré une répartition uniforme des nutriments indispensables à la croissance optimale des plantes hydroponiques.

5 Analyse de l'accumulation des métaux lourds dans les feuilles de Menthe

Après 18 jours de culture, les feuilles de menthe ont été récoltées à partir des trois niveaux. Les feuilles ont été ensuite séchées, broyées, puis analysées par FRX afin de déterminer la présence des métaux lourds dans la menthe.

6 Enquête et Recueil de Données

Afin de se rapprocher du consommateur et de connaître son avis, une enquête a été lancée sur les réseaux sociaux. Cette enquête vise à comprendre les perceptions et les attitudes des consommateurs algériens face à l'irrigation par les eaux usées. L'objectif est de recueillir des données sur leur niveau de connaissance, leurs préoccupations sanitaires, et leur disposition à acheter des produits issus de cette pratique. Les résultats de ce questionnaire permettront d'informer les politiques agricoles et de sensibiliser le public à des pratiques durables.

Résultats et discussion

1 Analyse des eaux d'irrigation

Toutes les mesures effectuées sur les eaux usées traitées sont conformes aux normes de qualité établies par le Journal Officiel de la République Algérienne (JORA) de 2006 (Tableau V). La valeur de pH de 7,39 est dans la plage acceptable de 6,5 à 8,5, et la Demande Biologique en Oxygène (DBO5) mesurée à 13 mg/L est nettement inférieure à la limite maximale de 25 mg/L. Également, la Matière en Suspension (MES) à 20 mg/L est dans les normes ne dépassants pas la limite de 35 mg/L. En conclusions, les résultats montrent que les eaux usées traitées respectent les normes de qualité établies, garantissant ainsi une gestion sécuritaire et efficace des émissions. La valeur de conductivité est de 1,287 μ S/cm et la température est de 25,9 °C bien que non spécifiquement normées dans le JORA 2006, complètent le profil favorable de ces eaux usées traitées (**JORA 2006**).

Tableau V. Comparaison des résultats des analyses d'eau

Paramètres	Résultats obtenus	Normes (JORA, 2006)	Conformité
DBO5	13 mg /l	≤ 25 mg/L	Conforme
MES	20 mg/l	≤ 35 mg/L	Conforme
Conductivité	1,287 μ S/cm	2.546 μ S/cm	Conforme
pH	7,39 ...	6,5 - 8,5	Conforme
T°	25,9C°	$\leq 27,3$ C°	Conforme

2 Analyses des plans de mélange

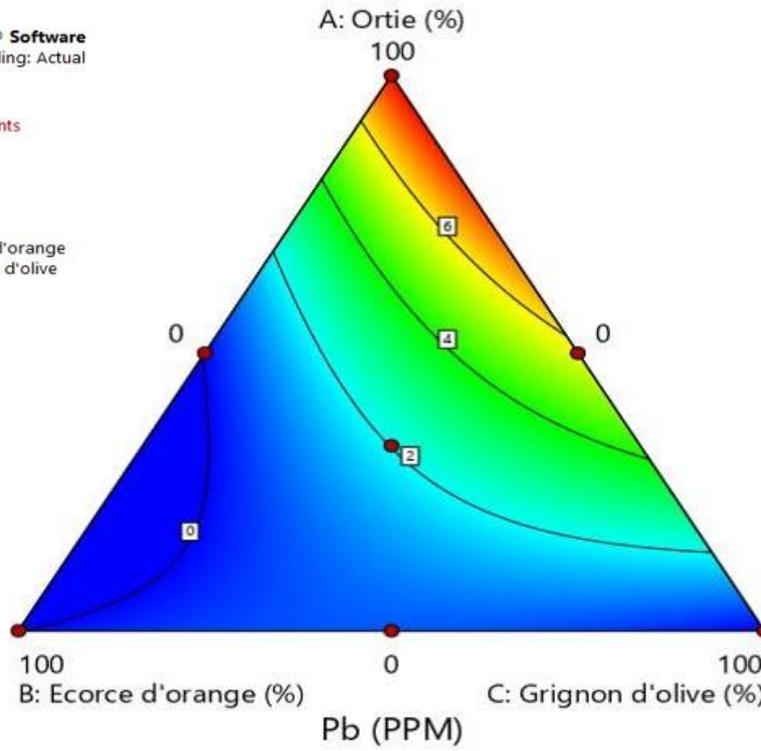
Une optimisation par un plan de mélange simplex-centroïde a été réalisée afin de déterminer la matrice végétale ayant le pouvoir adsorbant optimale envers les métaux lourds étudiés.

La figure 11 illustre des schémas ternaires créés par le logiciel Design-Expert® pour évaluer les teneurs en plomb (Pb), en cuivre (Cu) et en zinc (Zn) en PPM dans des mélanges de trois éléments : Ortie, Écorce d'orange et Grignon d'olive. Chaque sommet de triangle correspond à une composition à 100 % d'un des composants, avec des points à l'intérieur représentant des mélanges. Les teintes varient du bleu (concentration faible) au rouge (concentration élevée). Pour le cuivre, les concentrations les plus élevées (jusqu'à 970,3 PPM) sont retenus par une matrice constituée de près de 100 % d'Ortie, tandis que les plus faibles sont autour de 100 % de Grignon d'olive et d'Écorce d'orange, indiquant que les feuilles d'ortie ont un pouvoir absorbant du cuivre (Cu) plus élevé (**Rascio and Navari-Izzo 2011**). Le diagramme ternaire de Zn montre des concentrations allant jusqu'à 400 PPM pour l'Ortie, avec les plus faibles concentrations près de 100 % de Grignon d'olive et d'Écorce d'orange. Les couleurs intermédiaires (vert, jaune) identifient les zones de transition, confirmant l'efficacité de l'ortie dans l'adsorption du zinc, conformément aux recherches récentes sur la phytoremédiation des métaux lourds (**Dhankher and Foyer 2018, Rizwan, et al. 2017**). Pour le plomb, les proportions de chaque composant influencent la concentration en Pb, avec des niveaux plus élevés dans les zones à forte proportion d'Ortie et plus faibles dans les mélanges riches en Écorce d'orange et Grignon d'olive (**Du-pont, J., Martin, L., et Bernard**).

Design-Expert® Software
Component Coding: Actual

Pb (PPM)
● Design Points
0 7,8

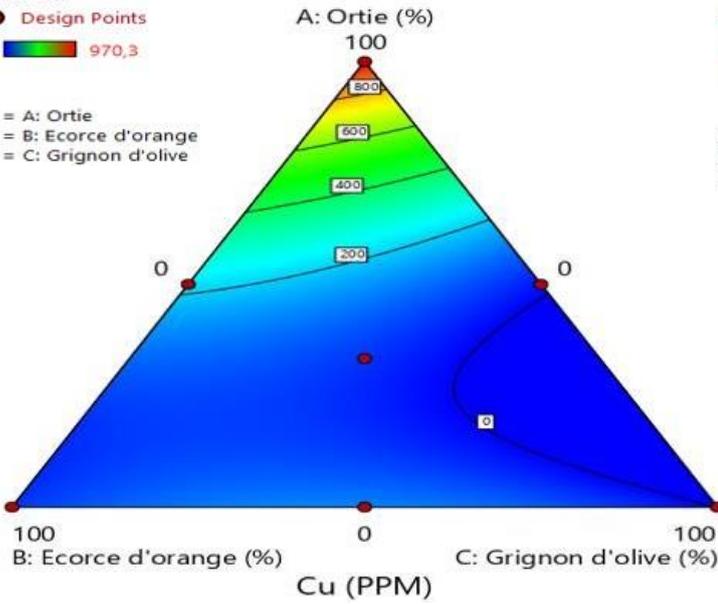
X1 = A: Ortie
X2 = B: Ecorce d'orange
X3 = C: Grignon d'olive



Design-Expert® Software
Component Coding: Actual

Cu (PPM)
● Design Points
0 970,3

X1 = A: Ortie
X2 = B: Ecorce d'orange
X3 = C: Grignon d'olive



Design-Expert® Software
Component Coding: Actual

Zn (PPM)
● Design Points
0 516,9

X1 = A: Ortie
X2 = B: Ecorce d'orange
X3 = C: Grignon d'olive

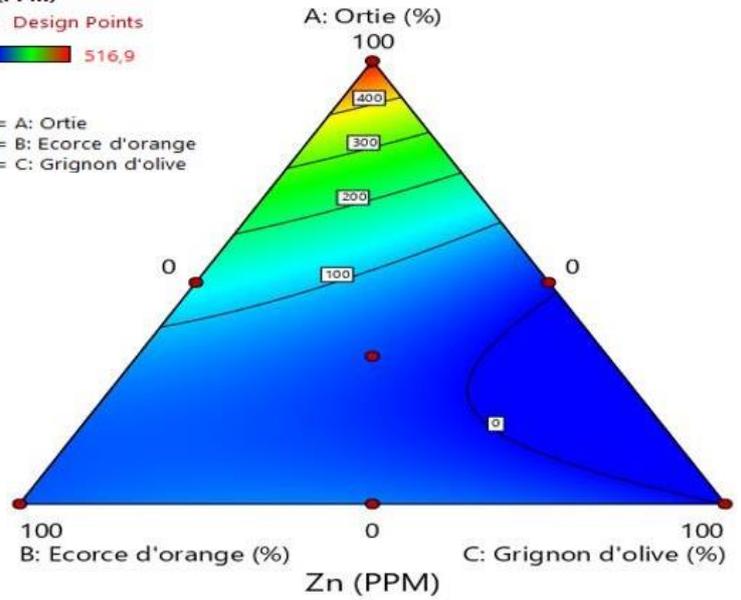


Figure 11 : Schémas ternaires

3 Résultats d'analyses des métaux lourds

Les proportions de mélanges de trois matériaux (ortie, écorce d'orange et grignon d'olive) et leur capacité à adsorber des métaux lourds (Pb, Cu, Zn) dans les eaux usées, en comparaison avec les prévisions fournies par le logiciel JMP pro 17 sont présentés dans le tableau ci-dessous. Les valeurs mesurées pour le mélange 50% ortie et 50% écorce d'orange sont très proches des prévisions, ce qui témoigne d'une précision élevée du modèle. Comparativement, ces résultats sont cohérents avec les recherches de **Babel and Kurniawan (2003)** qui ont montré que des matériaux biosorbants peu coûteux comme les déchets végétaux peuvent être très efficaces pour l'adsorption des métaux lourds.

Tableau VI. Concentration en métaux lourds absorbé par chaque mélange

Ortie (%)	Ecorce d'orange	Grignon d'olive	Pb	Cu	Zn	Prévue Pb	Prévue Cu	Prévue Zn
50	50	0	0,5	217,3	139,7	0,50	221,82	141,87
0	100	0	0	52,2	45,3	0,00	51,07	44,76
33,33	33,33	33,33	2,16	58,6	38,3	2,16	48,43	33,41
0	0	100	0	0	0	0,00	-1,13	-0,54
50	0	50	5,7	15,7	9,3	5,70	20,22	11,47
100	0	0	7,8	970,3	516,9	7,80	969,17	516,36
0	50	50	0,6	117,2	59,8	0,60	121,72	61,97

3 Analyse des variances ANOVA

Le tableau ANOVA fourni ci-dessous aide à comprendre la variance entre les différents traitements et leurs interactions.

La colonne source et somme des carrés identifie les différentes sources de variation dans les données. Chaque source est associée à une somme des carrés, qui quantifie la variance totale attribuée à cette source (**Sullivan, 2016**). Par exemple, "Ortie (Mélange)" a une somme des carrés de 61,061737 pour l'élément (Pb), ce qui indique une variation substantielle expliquée par ce facteur.

La valeur F (Rapport F) est une statistique de test utilisée pour déterminer si la variance observée est significative. Elle est calculée en divisant le carré moyen de chaque source par le carré moyen de l'erreur résiduelle. Des valeurs F plus élevées indiquent une plus grande probabilité que la variance soit significative. Par exemple, "Ortie (Mélange)" a une valeur F de 1936,791 pour l'élément (Pb), ce qui est assez élevé (**Sullivan, 2016**).

La valeur p (Prob. > F) indique la probabilité que la valeur F observée se produise si l'hypothèse nulle était vraie. Une valeur p plus faible (< 0,05) suggère que l'effet est statistiquement significatif. Les valeurs p de "Ortie (Mélange)" et "Ortie*Ecorce d'orange » sont respectivement de 0,0145 et 0,0338 pour l'élément (Pb), ce qui indique des effets significatifs. Par contre, la colonne "Signification" indique si la valeur p est inférieure au seuil de signification choisi (généralement 0,05). Les sources significatives sont marquées en conséquence.

La valeur R² (Coefficient de détermination) mesure la proportion de la variance de la variable dépendante qui est prévisible à partir des variables indépendantes. Il est compris entre 0 et 1. Un R² proche de 1 indique que le modèle explique une grande partie de la variance de la variable réponse, ce qui implique une bonne adéquation (Sullivan, 2016). Dans le tableau fourni, une valeur de 0,9995 indique que 99,95 % de la variance de la concentration de Pb est expliquée par le modèle. Cela suggère un très haut degré de précision dans les prédictions du modèle.

La valeur de Coefficient de Variation (C.V. %) est une mesure de la variabilité relative des données, exprimée en pourcentage. Elle est calculée comme le rapport entre l'écart-type et la moyenne, multiplié par 100. D'autre part, un C.V. % faible indique une variabilité relative moindre des données, tandis qu'un C.V. % élevé indique une plus grande variabilité. Cette mesure est particulièrement utile pour comparer le degré de variation entre des ensembles de données ayant des unités différentes ou des moyennes très différentes.

Tableau VII. Variance ANOVA

Source	Cuivre (Cu)		Zinc (Zn)		Plomb (Pb)	
	Rapport F	Prob. >F	Rapport F	Prob. >F	Rapport F	Prob.>F
Ortie(Mélange)	5619,81	0,01	6898,237	0,01	1936,791	0,0145
Ecorce d'orange(Mélange)	15,6049	0,16	51,8271	0,09	0,0076	0,9445
Grignon d'olive(Mélange)	0,0076	0,94	0,0076	0,94	0,0076	0,9445
Ortie*Ecorce d'orange	376,5673	0,03	376,8051	0,03	353,6617	0,0338
Ortie*Grignon d'olive	974,5682	0,02	1189,775	0,02	85,2896	0,0687
Ecorce d'orange*Grignon d'olive	42,4061	0,1	31,1363	0,11	11,1012	0,1856
R ²	0,9997		0,9998		0,9995	
C.V. %	6,34		5,39		7,64	

3.1 Optimisation des variables pour l'extraction des métaux lourds

Les modèles mathématiques des paramètres analysés obtenus par le mélange des matrices végétales peuvent être présentés comme des polynômes du premier ordre. Les modèles mathématiques prenant en compte les effets linéaires et les effets d'interaction des variables ayant une influence significative peuvent être présentés comme les équations suivantes :

$$Y_{Pb} = 0,07 A - 0,0001 B - 0,0001 C - 0,001 AB + 0,0007 AC + 0,0002 BC$$

$$Y_{Cu} = 9,69 A + 0,51 B - 0,01 C - 0,11 AB - 0,18 AC + 0,03 BC$$

$$Y_{Zn} = 5,16 A + 0,44 B - 0,005 C - 0,05 AB - 0,09 AC + 0,01 BC$$

La maximisation de la fonction de désirabilité en utilisant ces modèles mathématiques nous permet de définir les mélanges optimaux pour l'adsorption maximale des trois métaux lourds. Les résultats obtenus montrent un optimum d'adsorption obtenu avec une matrice végétale constituée de 100 % d'ortie avec une désirabilité de 0.94.

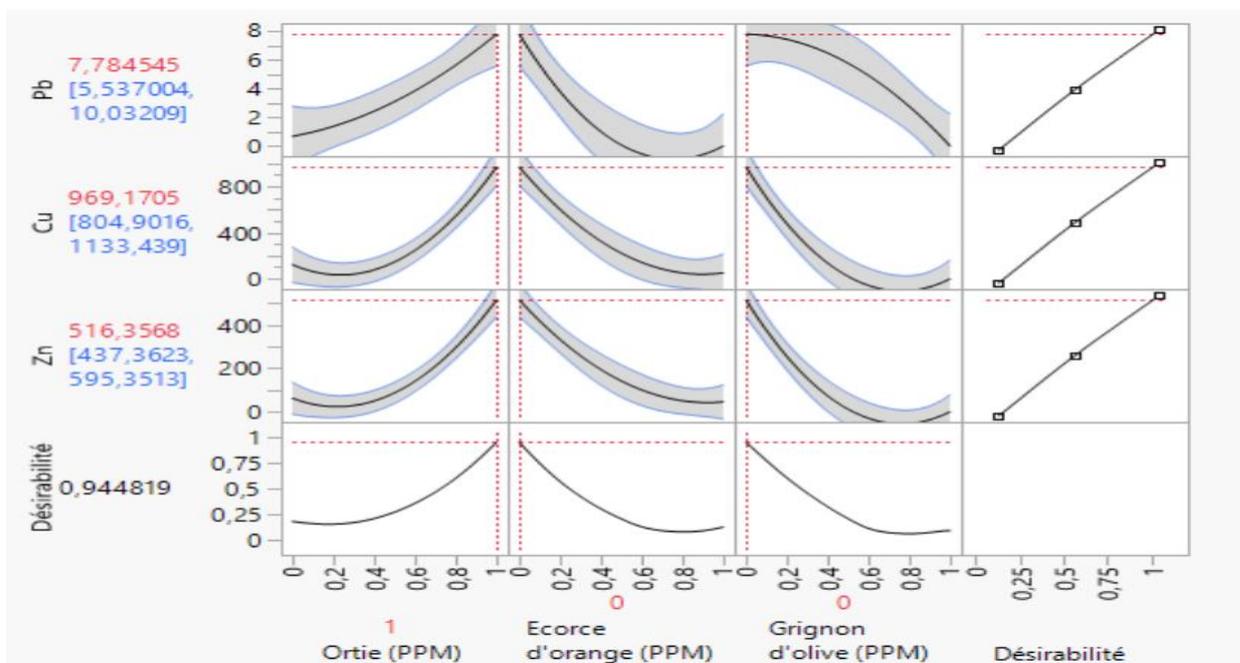


Figure 12 : Model quadratique des désirabilité et concentration des métaux lourds

4 Développement de la culture hydroponique

4.1 Développement de la taille de la culture

Les résultats de l'étude (Figure 13), montre que l'irrigation des cultures de menthe avec des eaux usées traitées (Niveau 2) a entraîné une croissance plus rapide au début, atteignant 3,5 cm le 23 juin, tandis que l'irrigation avec de l'eau potable (Niveau 1) a permis une croissance régulière

mais plus lente, atteignant 3,1 cm le même jour. Cela confirme que les eaux usées traitées peuvent apporter des nutriments supplémentaires avantageux pour les plantes, comme l'ont souligné (Deb and Dutta 2017), qui ont constaté des effets positifs similaires en Espagne et en Grèce. D'autre part, les résultats montrent que l'irrigation avec des eaux usées traitées contenant de l'ortie (Niveau 3) a produit une croissance légèrement inférieure des feuilles de menthe, atteignant environ 3 cm. Cela peut suggérer que l'ortie, bien qu'ayant des propriétés bio accumulatrices et potentiellement allélopathiques, pourrait libérer des substances inhibitrices de croissance. Par exemple, une étude par (Singh, et al. 2012) a démontré que certaines plantes utilisées en phytoremédiation peuvent exsuder des composés organiques qui affectent la croissance d'autres plantes.

En résumé, même si les eaux usées traitées constituent une source durable de nutriments, il est essentiel de mener des études supplémentaires afin d'optimiser leur utilisation et réduire les risques potentiels de contamination par des métaux lourds, comme le soulignent (Mohammad and Mazahreh 2003).

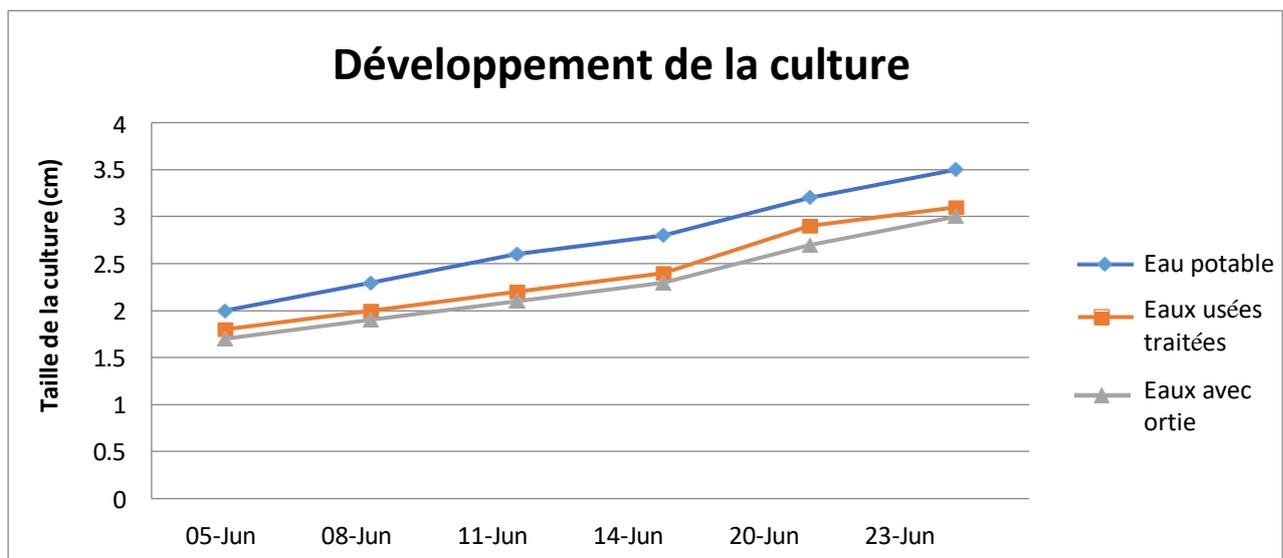


Figure 13 : Développement de la taille de la culture

Les résultats montrent que l'irrigation avec de l'eau potable (Niveau 1) soutient une croissance stable et saine des feuilles de menthe, atteignant environ 8 feuilles au 23 juin (Figure 14). Cette croissance régulière est due à l'absence de contaminants dans l'eau potable. En revanche, l'irrigation avec des eaux usées traitées (Niveau 2) a favorisé une augmentation rapide du nombre de feuilles, atteignant également 8 feuilles, mais plus rapidement que le Niveau 1, grâce aux nutriments supplémentaires comme l'azote et le phosphore. Par ailleurs, l'irrigation avec des

eaux usées traitées contenant de l'ortie (Niveau 3) a montré un développement plus lent, atteignant environ 7 feuilles, ce qui suggère que les orties peuvent libérer des composés inhibiteurs de croissance ou ne pas fournir de nutriments supplémentaires significatifs par rapport aux eaux usées traitées seules.

Les résultats confirment que l'utilisation des eaux usées traitées favorise une croissance plus rapide des plantes, ce qui est en accord avec les conclusions de **Pedrero, et al. (2010)**, qui ont observé des effets bénéfiques similaires en utilisant des eaux usées traitées en agriculture. Cependant, l'ajout d'orties a conduit à une croissance plus lente, probablement en raison de la libération de composés allélopathiques par les orties, qui inhibent la croissance des autres plantes.

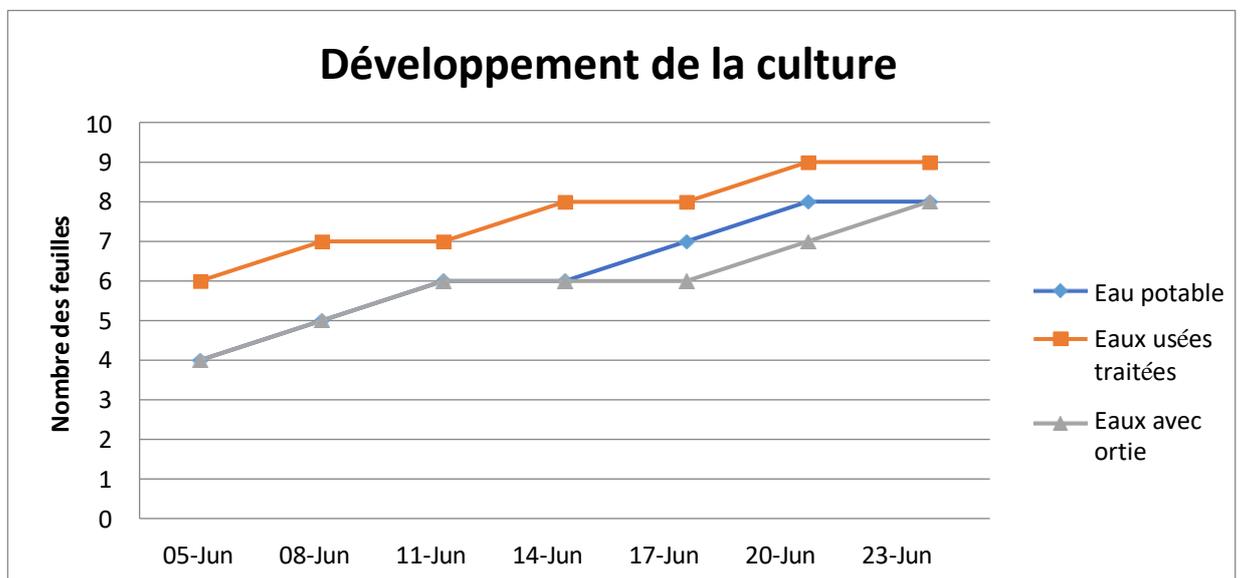


Figure 14 : Développement de nombre de feuilles de la menthe

4.2 Analyse de l'accumulation des métaux lourds

Après la récolte de la culture de la menthe irriguée par 3 différentes sources d'eau, les résultats des analyses des métaux lourds (Tableau VIII) ont révélé que l'irrigation avec des eaux usées entraîne une accumulation significative de plomb, de zinc et de cuivre dans la menthe, ce qui peut poser des risques pour la santé humaine et la qualité de la plante. Les eaux usées traitées avec ortie et l'eau potable montrent des niveaux de zinc et de cuivre beaucoup plus sûrs, et aucune détection de plomb, indiquant qu'elles sont des options d'irrigation plus sûres pour la culture de la menthe.

Tableau VIII. Accumulation des métaux lourds dans la menthe récolter

	Plomb (Pb)	Zinc (Zn)	Cuivre (Cu)
Eaux usées	9,6 ± 2	406 ± 10,6	542,8 ± 14,8
Eaux usées traité avec ortie	N. d	96,3 ± 4,8	63,3 ± 4,8
Eau potable	N. d	100,8 ± 6	59,6 ± 6,9

N.d : Non détecté

5 Evaluation des perceptions et des attitudes du citoyen

Le cercle relatif dans la figure ci-dessous représente la proportion de personnes qui ont participé à répondre aux questionnaires concernant la réutilisation des eaux usée dans la wilaya du pays.

Les pourcentages mentionnés pour l'utilisation des eaux usées traitées dans différentes wilayas en Algérie montrent une répartition significative de cette pratique. Béjaïa se distingue avec le pourcentage le plus élevé à 44,8%, suivi de Batna à 17,2% et Alger, la capitale, à 11%. Tizi Ouzou et Bouira contribuent respectivement avec 12,7% et 8,9%. Jijel affiche un taux plus bas à 2,9%. Bien que des wilayas comme Biskra, Blida, Tlemcen et Adrar présentent des pourcentages plus modestes, elles participent également à cette approche.

Ces chiffres témoignent d'une adoption croissante de l'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation agricole, répondant ainsi aux défis de disponibilité des ressources en eau douce et aux préoccupations grandissantes en matière de durabilité environnementale. Toutefois, cela soulève des préoccupations concernant la sécurité alimentaire et les risques potentiels pour la santé. Il est crucial d'instaurer une réglementation stricte et une surveillance continue pour garantir la sécurité des consommateurs et assurer la durabilité à long terme de cette pratique. Cette tendance reflète une volonté d'innovation dans la gestion des ressources hydriques en milieu agricole, mais elle nécessite également une évaluation constante des impacts environnementaux et sanitaires pour une mise en œuvre sûre et responsable.

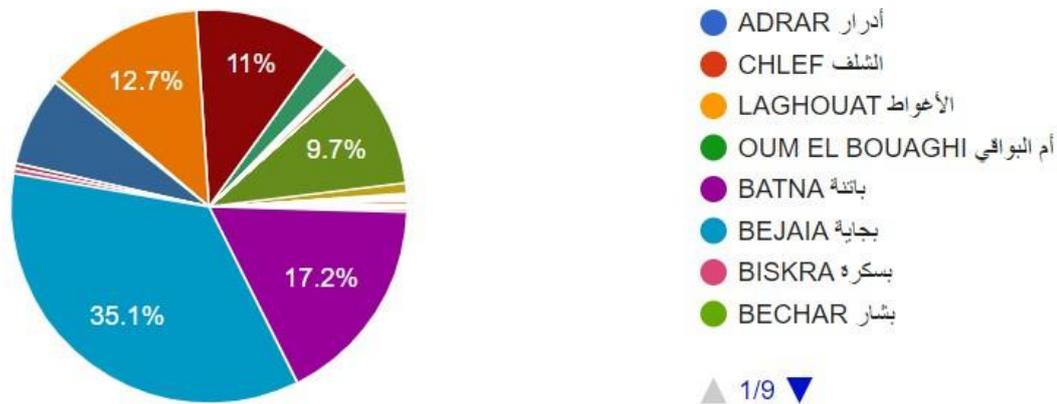


Figure 15 : Pourcentage des wilayas participants au sondage

Le cercle relatif (Figure 16) représente la proportion de la race humaine qui a participé à répondre aux questions.

Une étude récente menée par le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation en Algérie examine les opinions des consommateurs sur la consommation de produits agricoles irrigués avec des eaux usées traitées. Les résultats montrent une disparité notable entre les genres, avec 61,3

% des hommes et 38,7 % des femmes exprimant leurs avis sur cette pratique. D'autre part, ces chiffres reflètent des attitudes différentes entre les sexes en ce qui concerne la sécurité alimentaire et la santé publique liées à l'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation agricole. Cette divergence peut être attribuée à divers facteurs tels que la sensibilisation sanitaire, les différences culturelles et le niveau d'éducation. Ces données sont essentielles pour une meilleure compréhension des positions des consommateurs et pour améliorer les stratégies de sensibilisation et d'éducation visant à renforcer la confiance dans les produits agricoles irrigués avec des eaux usées traitées et à garantir l'application des normes de sécurité et de qualité. (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2023).

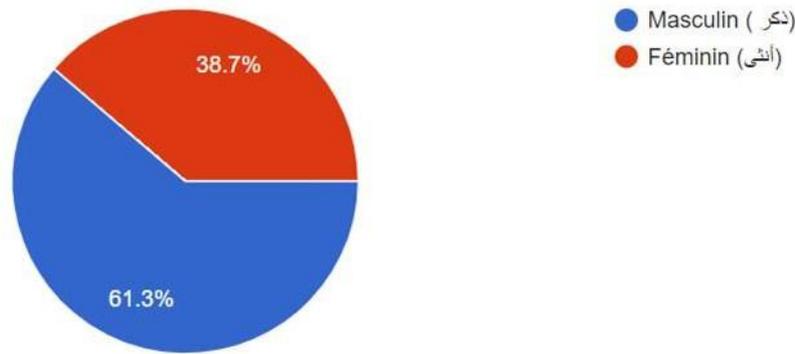


Figure 16 : Répartition des participants selon le sexe

Les barres horizontales représentent les utilisations alimentaires et agricoles potentielles des eaux usées traitées (Figure 17). L'enquête menée par le Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural en Algérie révèle une acceptation significative de l'utilisation des eaux usées traitées dans divers secteurs alimentaires et agricoles. Les résultats montrent que l'irrigation des cultures destinées à la production de semences est particulièrement populaire, avec 78,9% des répondants favorables à cette pratique. Cela souligne une reconnaissance croissante de l'eau traitée comme une ressource précieuse pour soutenir la sécurité alimentaire et agricole du pays. De plus, l'aquaculture et la pisciculture suscitent également un fort intérêt, recueillant 68,4% d'approbation, soulignant ainsi un potentiel important pour l'utilisation durable des ressources aquatiques. En outre, l'irrigation des jardins privés et publics est bien soutenue, avec 67,2% des voix, illustrant une acceptation généralisée de l'eau traitée dans l'aménagement paysager urbain et domestique. Ces résultats soulignent l'émergence des eaux usées traitées comme une solution viable pour la gestion durable de l'eau en Algérie, offrant des perspectives prometteuses pour l'agriculture, l'aquaculture et d'autres secteurs alimentaires et industriels.

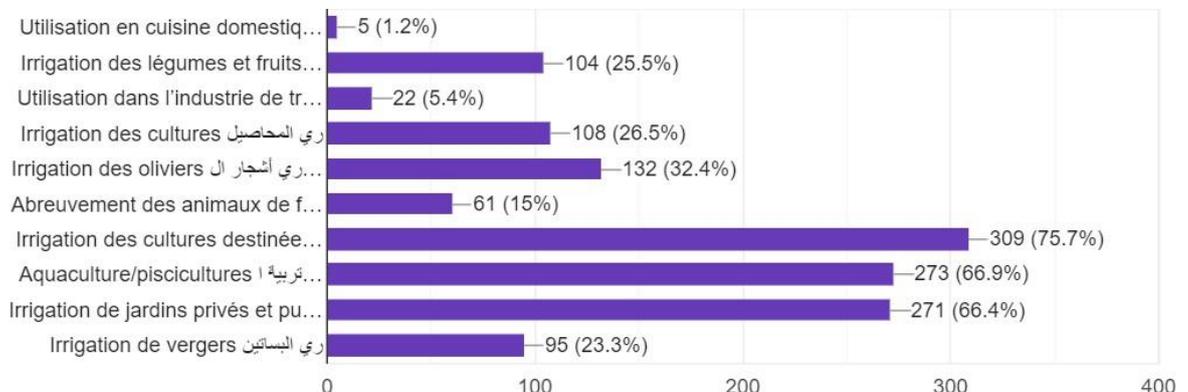


Figure 17 : Utilisations alimentaires et agricoles potentielles des eaux usées traitées

Le cercle relatif (Figure 18) représente les connaissances des gens sur les eaux usées traitées et leur réutilisation.

Le graphique circulaire présenté dans la figure montre la répartition des réponses à une question d'enquête. La catégorie dominante, représentant 96,3 % des réponses, est "Assez », indiquant que la grande majorité des répondants estiment avoir suffisamment d'informations ou d'expérience. Les autres catégories, "Rien", "Entièrement informé(e)" et "Rien Assez", ont une représentation négligeable, chacune constituant une portion si petite qu'elles totalisent seulement environ 3,7 % des réponses. Ces résultats suggèrent que presque tous les participants se sentent adéquatement informés ou compétents dans le contexte de l'enquête, tandis qu'une très petite minorité se sent soit complètement non informée, entièrement informée, ou quelque part entre les deux.

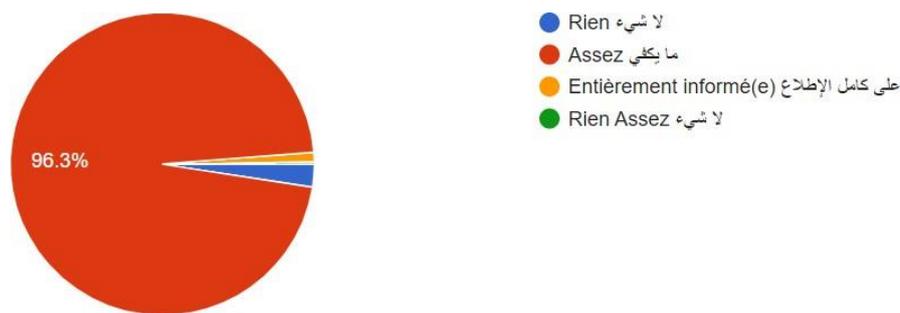


Figure 18 : Pourcentages des connaissances des gens sur les eaux usées traitées

Le cercle relatif présenté dans la (Figure19) illustre l'intention des consommateurs de consommer des produits irrigués par des eaux usées traitées.

Des réticences importantes sont observées dans les résultats du sondage sur l'intention des consommateurs d'utiliser des produits irrigués par des eaux usées traitées. La plupart des personnes interrogées, soit 75,6 %, ont déclaré qu'elles consommeraient ces produits "probablement oui", tandis que 21,6 % ont répondu "certainement pas". Une minorité très restreinte a exprimé son accord avec un taux de 2,5 %. Ces résultats montrent une forte réticence des consommateurs, qui peut être attribuée à plusieurs facteurs. Premièrement, la perception des risques sanitaires associés à l'utilisation des eaux usées traitées reste une préoccupation majeure. Même lorsque l'eau est traitée à des niveaux tertiaires, les consommateurs peuvent être méfiants quant à la sécurité de ces produits et que la qualité alimentaire résultante soit inférieure par rapport aux

aliments cultivés avec des sources d'eau traditionnelles. Des études montrent que la confiance dans les autorités et la transparence sur les processus de traitement jouent un rôle crucial dans l'acceptation (Suri, et al. 2019).

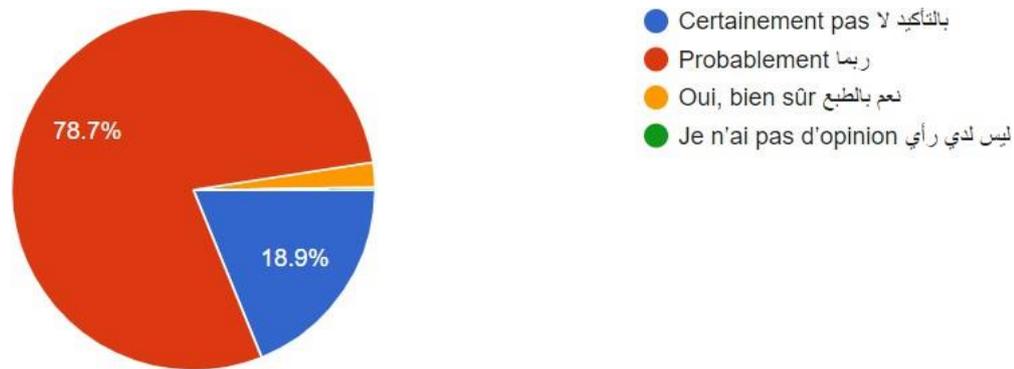


Figure 19 : Pourcentages sur l'intention de consommateur à consommé les produits issus des eaux usées

Le cercle relatif (Figure 20) présente un graphique circulaire montrant les pourcentages de consommateurs selon leur disposition à consommer des produits agricoles issus des eaux usées traitées.

La majorité des consommateurs (83,7 %) se situent dans la catégorie d'acceptation modérée (20-50 %). Cette répartition indique que la plupart des consommateurs sont ouverts à l'idée de consommer des produits agricoles issus des eaux usées traitées, mais avec des réserves. Cela pourrait être dû à une méfiance persistante concernant la sécurité et la qualité de ces produits, malgré le traitement des eaux usées. Des études ont montré que l'acceptation des produits issus de l'irrigation avec des eaux usées traitées dépend fortement de la confiance dans les normes de traitement et les régulations en place (Tripathi, et al. 2019). D'autre part, Une minorité significative (11,4 %) des consommateurs montre une faible acceptation (0-20 %), indiquant une forte réticence à adopter ces produits. Cette méfiance peut être attribuée à des préjugés ou à un manque d'information sur les processus de traitement des eaux usées et la sécurité des produits finis (mondiale de la Santé 2020). Une petite fraction (4,9 %) des consommateurs montrent une forte acceptation (plus de 50 %). Ces consommateurs pourraient être mieux informés sur les avantages environnementaux et la sécurité des produits issus des eaux usées traitées (Jiménez and Asano 2008).

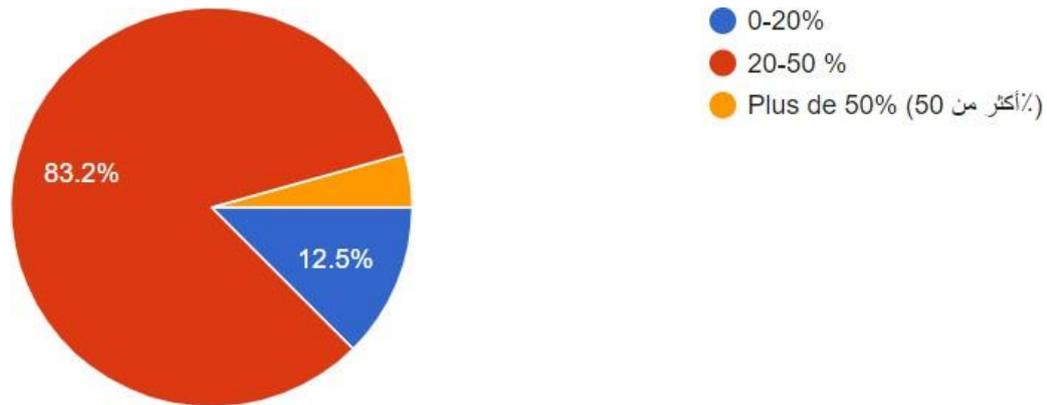


Figure 20 : Pourcentage de la consommation attendue de produits agricoles issus des eaux usées traitées

Le cercle relatif (Figure 21) présente un graphique circulaire qui illustre les opinions des consommateurs sur le coût des cultures agricoles irriguées avec des eaux usées traitées par rapport à celles cultivées avec des eaux normales.

Selon 55,2 % des consommateurs, le coût des cultures serait équivalent, peu importe l'eau utilisée pour l'irrigation. Cela suggère que les économies réalisées sur l'eau sont compensées par d'autres coûts de production. Une partie importante (25,1 %) considère que l'utilisation des eaux usées traitées peut permettre de diminuer les dépenses, ce qui pourrait constituer un argument en faveur de cette pratique. Toutefois, une minorité (10,3 %) estime que ces cultures pourraient être plus onéreuses, ce qui met en évidence l'importance de sensibiliser davantage aux bénéfices économiques et à la sécurité de l'utilisation des eaux usées traitées en industrie agricole. Par contre, (9,4%) des répondants estiment que ces cultures seraient plus chères. Cette minorité

pourrait croire que les coûts liés au traitement des eaux usées et à la surveillance de la qualité de l'eau augmenteraient le prix final des produits agricoles (**Jiménez and Asano 2008**).

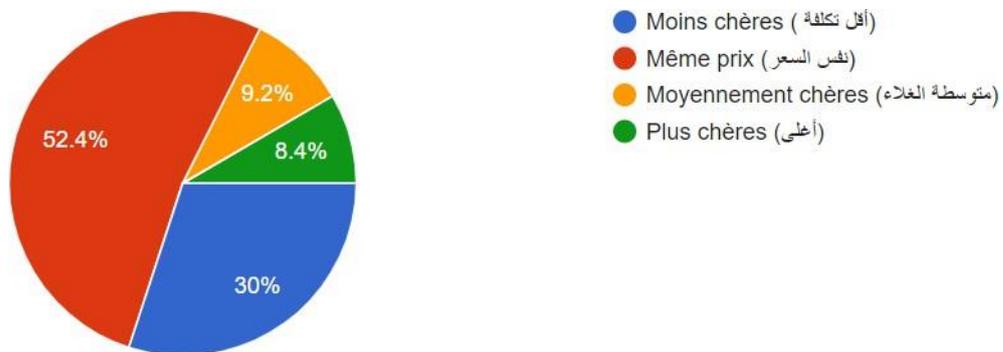


Figure 21 : Opinions des consommateurs sur le coût des produits issus des eaux usées

Conclusion

Conclusion

Cette étude a démontré l'efficacité de l'emploi de matériaux végétaux dans le traitement des eaux usées. Le plan de mélange a permis de déterminer l'efficacité de l'ortie en matière de dépollution par rapport à l'écorces d'orange et aux grignons d'olive.

Les résultats de l'analyse de la culture hydroponique irriguée avec des eaux usées traitées ont également été encourageants. La croissance du pôle est maximale, ce qui prouve que ce type d'irrigation peut favoriser une agriculture productive et durable. En outre, l'étude sociale réalisée auprès des consommateurs a révélé une acceptation grandissante des produits irrigués par des eaux usées traitées, ce qui laisse supposer que cette approche pourrait être largement adoptée à l'avenir.

Ce projet met en lumière le potentiel significatif des solutions naturelles et durables pour le traitement des eaux usées, contribuant ainsi à la protection de l'environnement tout en promouvant des pratiques agricoles innovantes et écologiques. En intégrant des matériaux végétaux dans les systèmes de traitement des eaux, il est possible de réduire l'empreinte écologique et de valoriser des ressources souvent sous-utilisées.

L'impact positif de ces méthodes sur la gestion des ressources en eau et l'acceptation sociale croissante des produits issus de telles pratiques montrent qu'il est possible de conjuguer efficacité environnementale et viabilité économique. Cette approche ouvre la voie à une gestion plus responsable et durable des ressources en eau, particulièrement dans les régions où les ressources hydriques sont limitées.

En conclusion, les résultats de cette étude encouragent fortement la poursuite des recherches dans ce domaine afin d'optimiser les processus et de généraliser l'utilisation de matériaux végétaux pour le traitement des eaux usées. Une adoption plus large de ces pratiques pourrait non seulement améliorer la qualité de l'eau et protéger l'environnement, mais aussi soutenir des pratiques agricoles durables, répondant ainsi aux défis environnementaux et sociaux actuels.

En perspective, cette étude pourrait être complétée par d'autres analyses impliquant des méthodes plus précises et plus sensibles telles que la spectrométrie d'absorption atomique (SAA) pour l'analyse des métaux lourds, la chromatographie liquide à haute performance couplée à la spectrométrie de masse pour l'analyse des résidus pharmaceutiques. Des analyses microbiologiques pourraient aussi nous renseigner sur la qualité des récoltes.

References bibliographiques

- Angelakis, A.N., Do Monte, M.M., Bontoux, L. and Asano, T. 1999 The status of wastewater reuse practice in the Mediterranean basin: need for guidelines. *Water research*, **33** (10), 2201-2217.
- Arkoub, H. and Moussaceb, K. 2009 Etude et caractérisation physico-chimique des eaux de l'oued Soummam (Algérie). *Sécheresse*, **20** (4), 360-366.
- Asano, T. 1998 *Wastewater reclamation and reuse: water quality management library*. Crc Press.
- Asano, T. and Levine, A.D. 1996 Wastewater reclamation, recycling and reuse: past, present, and future. *Water science and technology*, **33** (10-11), 1-14.
- Babel, S. and Kurniawan, T.A. 2003 Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review. *Journal of hazardous materials*, **97** (1-3), 219-243.
- Baird, R., Eaton, A., Rice, E. and Bridgewater, L. 2017 Standard methods for the examination of water and wastewater. *American Public Health Association*.
- Belaid, N. 2010 *Evaluation des impacts de l'irrigation par les eaux usées traitées sur les plantes et les sols du périmètre irrigué d'El Hajeb-Sfax : salinisation, accumulation et phytoabsorption des éléments métalliques*, Limoges.
- Blanc, D. 1987 Les cultures hors sol.
- BOUZIDI, Y. 2020 Réutilisation des Eaux Usées Epurées en Algérie.
- Deb, S. and Dutta, P. 2017 Wastewater in Agriculture: Possibilities and Limitations. *Adaptive Soil Management: From Theory to Practices*, 215-225.
- Dhankher, O.P. and Foyer, C.H. 2018 Climate resilient crops for improving global food security and safety. Wiley Online Library, pp. 877-884.
- FAO. 2008 Wastewater: The Untapped Resource. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
- Gupta, V.K., Carrott, P., Ribeiro Carrott, M. and Suhas. 2009 Low-cost adsorbents: growing approach to wastewater treatment—a review. *Critical reviews in environmental science and technology*, **39** (10), 783-842.
- Hamlat, A., Errih, M. and Guidoum, A. 2013 Simulation of water resources management scenarios in western Algeria watersheds using WEAP model. *Arabian Journal of Geosciences*, **6**, 2225-2236.
- Jiménez, B. and Asano, T. 2008 *Water reuse: An international survey of current practice, issues and needs*. IWA publishing.
- Jones Jr, J.B. 2016 *Hydroponics: a practical guide for the soilless grower*. CRC press.
- JORA. 2006 Journal Officiel de la République Algérienne (JORA). N° 26,

Kadirvelu, K., Thamaraiselvi, K. and Namasivayam, C. 2001 Removal of heavy metals from industrial wastewaters by adsorption onto activated carbon prepared from an agricultural solid waste. *Bioresource technology*, **76** (1), 63-65.

Kerambrun, P. 1983 Conséquences de la pollution thermique sur les organismes marins. *Océanis (Paris)*, **9** (8), 627-651.

Kessira, M. 2018 Séminaire Régional sur la « Réutilisation des eaux usées épurées en irrigation, par la sensibilisation et la prise de conscience » Oran, L'eau. *Université de Sfax. Tunisie*.

Khiati, M. 2007 Stratégies, politiques et systèmes de connaissances Agronomiques. *Cfva de Médéa*, p. 6.

Ladjet, F.e.B. 2012 Exploitation d'une station d'épuration à boues activées et d'une lagune. *Séminaire sur la modernisation de l'agriculture irriguée*.

LARAB, S. 2019 *la réutilisation des eaux usées traitées en agriculture A partir des stations d'épuration l'Ain Bouchkir de la willaya de Tiaret*.

Lazarova, V. and Bahri, A. 2004 *Water reuse for irrigation: agriculture, landscapes, and turf grass*. CRC press.

Mahdjouba, H. 2018 Essai de quelques cultures sous un système hydroponique dans la région de Biskra.

Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmutz, Z., Sambo, P. and Borin, M. 2018 Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review. *Italian Journal of Agronomy*, **13** (1), 1-11.

Mebarki, A. La région du Maghreb face à la rareté de l'eau. L'exemple du défi algérien : mobilisation et gestion durable des ressources.

Mohammad, M.J. and Mazahreh, N. 2003 Changes in soil fertility parameters in response to irrigation of forage crops with secondary treated wastewater. *Communications in soil science and plant analysis*, **34** (9-10), 1281-1294.

Mondiale de la Santé, O. 2020 Note d'orientation technique relative à l'eau, l'assainissement et l'hygiène et la gestion des eaux usées pour prévenir les infections et réduire la propagation de la résistance aux antimicrobiens. Mouni, L., Merabet, D.,

Pedrero, F., Kalavrouziotis, I., Alarcón, J.J., Koukoulakis, P. and Asano, T. 2010 Use of treated municipal wastewater in irrigated agriculture—Review of some practices in Spain and Greece. *Agricultural Water Management*, **97** (9), 1233-1241.

- Pons, M.-N., Belhani, M., Bourgois, J. and Dupuit, E. 2008 Analyse du cycle de vie-Épuration des eaux usées urbaines. *Techniques de l'Ingenieur*, Dossier : G5820.
- Raissi, O. 2014 Protection de la ressource en eau en Algérie *Office national de l'assainissement*.
- Rascio, N. and Navari-Izzo, F. 2011 Heavy metal hyperaccumulating plants: how and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant science*, **180** (2), 169-181.
- Resh, H.M. 2022 *Hydroponic food production: a definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower*. CRC press.
- Rezapour, S., Kouhinezhad, P. and Samadi, A. 2018 The potential ecological risk of soil trace metals following over five decades of agronomical practices in a semi-arid environment. *Chemistry and Ecology*, **34** (1), 70-85.
- Rizwan, M., Ali, S., Adrees, M., Ibrahim, M., Tsang, D.C., Zia-ur-Rehman, M. *et al.* 2017 A critical review on effects, tolerance mechanisms and management of cadmium in vegetables. *Chemosphere*, **182**, 90-105.
- Rice, E. and Bridgewater, L. American Public Health Association eds., 2012. *Standard methods for the examination of water and wastewater*, **10**.
- Rusan, M.J.M., Hinnawi, S. and Rousan, L. 2007 Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. *Desalination*, **215** (1-3), 143-152.
- Savvas, D. and Passam, H. 2002 *Hydroponic production of vegetables and ornamentals*. Embryo publications Athens.
- Scott, C.A., Faruqui, N.I. and Raschid-Sally, L. 2004 *Wastewater use in irrigated agriculture: Confronting the livelihood and environmental realities*. CABI.
- Senthilkumaar, S., Bharathi, S., Nithyanandhi, D. and Subburam, V. 2000 Biosorption of toxic heavy metals from aqueous solutions. *Bioresource Technology*, **75** (2), 163-165.
- Shakya, A.K. 2016 Medicinal plants: Future source of new drugs. *International journal of herbal medicine*, **4** (4), 59-64.
- Singh, P., Deshbhratar, P. and Ramteke, D. 2012 Effects of sewage wastewater irrigation on soil properties, crop yield and environment. *Agricultural water management*, **103**, 100-104.
- Sullivan, L. 2016 Hypothesis testing-analysis of variance (ANOVA). *Boston University of Public Health*.
- Suri, M.R., Dery, J.L., Pérodin, J., Brassill, N., He, X., Ammons, S. *et al.* 2019 US farmers' opinions on the use of non-traditional water sources for agricultural activities. *Environmental research*, **172**, 345-357.

TABET, M. (2014). *Etude physico-chimique et microbiologique des eaux usées et évaluation du traitement d'épuration* (Doctoral dissertation).

Tchobanoglus, G., Burton, F. and Stensel, H.D. 2003 Wastewater engineering: treatment and reuse. *American Water Works Association. Journal*, **95** (5), 201.

Thebo, A.L., Drechsel, P., Lambin, E. and Nelson, K. 2017 A global, spatially-explicit assessment of irrigated croplands influenced by urban wastewater flows. *Environmental Research Letters*, **12** (7), 074008.

Tripathi, M., Bisen, Y. and Tiwari, P. 2019 Reuse of wastewater in agriculture. *Water Conservation, Recycling and Reuse: Issues and Challenges*, 231-258.

Van Os, E., Gieling, T.H. and Lieth, J.H. 2019 Technical equipment in soilless production systems. In *Soilless culture*, Elsevier, pp. 587-635.

Site internet 1 : <https://Unece.org> 7_Touzi_CC_SASS_Sara PDF consulte le 17/04/2024 22h :49.

Site internet 2 : https://www.biosaline.org/sites/default/files/Projectbrieffiles/TWWProject_Brief-Final-2.pdf consulté le 25/04/2024 à 22h38.

Site internet3 : <https://www.aps.dz> consulté le 17/04/2024 à 22h :34.

Site internet 4 : <https://www.aquaportail.com/> consulté le 27/4/2024 À 22h44.

Site internet 5 : www.futura-sciences.com ; 25/04/2024 à22 :35.

Photographie 1 : <https://www.cieau.com/le-metier-de-leau>

Photographie 2 : <https://www.batirama.com/>

Photographie 3 : <https://thehydroponicsguru.com/how-the-n-f-t-hydroponics-system-works>

ISO 7888 :1985 "Qualité de l'eau - Détermination de la conductivité"

Annexes



Figure 21 : Matrice végétale activé



Figure 22 : Eaux usées traitées avec ortie



Figure 24 : Menthe récolter du system hydroponique

Résumé

Dans le but de déterminer la possibilité de la réutilisation des eaux usées traitées pour la culture d'une herbe aromatique, une expérience a été réalisée afin d'étudier l'effet de cette eau sur le développement de la culture de la menthe. Cette expérience a été réalisée sur un système hydroponique. Trois niveaux d'irrigation avec trois types différents d'eau ont été utilisés ; une eau potable, une eau usée traitée et une eau usée retraitée par adsorption sur matrice végétale. Un plan de mélange simplex-centroïde impliquant l'ortie ; grignon d'olive et écorces d'orange a été appliqué pour optimiser l'adsorption des métaux lourds (Pb, du Zn et du Cu). Les résultats ont montré que l'ortie à 100% est la matrice végétale qui a le pouvoir adsorbant le plus élevé.

Les résultats de la mesure de la longueur et du nombre de feuilles montrent que la menthe irriguée par les eaux usées avait un développement satisfaisant dépassant celle irriguée par l'eau potable et les eaux retraitées par l'ortie. Cependant, une analyse des feuilles de menthe après 18 jours d'irrigation par les eaux usées révèle une accumulation du plomb, du zinc et du cuivre. Les résultats de l'enquête lancée sur les réseaux sociaux montrent une acceptabilité du consommateur vis-à-vis des produits irrigués par des eaux usées traitées.

Mots clés : Hydroponie, eaux usées, métaux lourds, FRX, enquête, menthe, matrice végétale.

Abstract

In order to determine the possibility of reusing treated wastewater for the cultivation of an aromatic herb, an experiment was carried out to study the effect of this water on the development of mint cultivation. The experiment was carried out on a hydroponic system. Three levels of irrigation with three different types of water were used: potable water, treated wastewater and wastewater reprocessed by adsorption onto a plant matrix. A simplex-centroid mixing design involving nettle, olive pomace and orange peel was applied to optimize adsorption of heavy metals (Pb, Zn and Cu). The results showed that 100% nettle is the plant matrix with the highest adsorption capacity.

The results of leaf length and number measurements showed that mint irrigated with wastewater had satisfactory development, outperforming that irrigated with potable water and water treated with nettle. However, an analysis of mint leaves after 18 days of wastewater irrigation revealed an accumulation of lead, zinc and copper. The results of the survey launched on social networks show consumer acceptability of products irrigated with treated wastewater.

Keywords: Hydroponics, wastewater, heavy metals, FRX, survey, mint, plant matrix.