

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان -



Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de MASTER ACADEMIQUE

En : HYDRAULIQUE

Spécialité : HYDRAULIQUE URBAINE

Par :

Radjaa ATTOU & Chaimae BOUDJENANE

Thème

***ETUDE DE REUTILISATION DES EAUX USEES EN AGRICULTURE :
CAS DE LA STEP DE MAGHNIA (N.W ALGERIEN)***

Soutenu publiquement, le 25 juin 2025, devant le jury composé de :

<i>M^{me}. Z. SEFROU</i>	MCB	Univ. Tlemcen	Présidente
<i>M^{me}. F. BELARBI</i>	MCA	Univ. Tlemcen	Examinatrice
<i>M^{me}. M. MESLI</i>	MCB	Univ. Tlemcen	Encadreur 1
<i>M^{me}. I. MAROK-GUASMI</i>	MCA	Univ. Tlemcen	Encadreur 2
<i>Mr. L. BENADDA</i>	MCB	Univ. Tlemcen	Co-Encadreur 1
<i>Mr. A. CHIBOUB FELLAH</i>	Pr	Univ. Tlemcen	Co-Encadreur 2
<i>M^{me}. I. MAHI</i>	MCB	Univ. Tlemcen	Expert I2E
<i>Mr. N. GHOZALI</i>	Ingénieur	DRE Maghnia	Secteur Socio-économique



Remerciements



Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

*Nous tenons à remercier chaleureusement nos encadrantes **Mme MESLI Meryem** et **Mme GUASMI Imen**, ainsi que nos co-encadrants **Mr BENADDA Lotfi** et **Mr. CHIBOUB Fellah Abd el Ghani** de nous avoir assisté, guider et orienter dans le but de mener à bien ce travail*

*Nous remercions également les membres du jury **Mme. SEFROU Zineb** et **M^{me}. BELARBI Fadila** pour l'intérêt qu'elles ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail.*

*Nos remerciements aux personnels de la direction de l'ONA et aux personnels de la station d'épuration des eaux usées de Maghnia en particulier le directeur **Mr Salem** et l'ingénieur chargé du suivi **Mr Kamel**, pour leur accueil, leur disponibilité et leur contribution par les données et les documents nécessaires qui ont enrichi notre recherche.*

*Nos remerciements à **Mr. Ghazali**, chef de bureau de l'irrigation de la daïra de Maghnia, pour son accueil chaleureux et ses précieux conseils.*

*Nous exprimons également notre gratitude à **Mr. Layali Fethi** pour sa bienveillance et sa gentillesse en nous ayant permis d'accéder à son terrain agricole, ce qui a grandement facilité la réalisation de notre prototype de projet dans les meilleures conditions.*

Nos remerciements à toutes les personnes qui ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Enfin, Nos remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenus et encouragés au cours de toutes ces années d'études.

Radjaa & Chaimae





DEDICACE



Louange à Dieu par qui toute chose s'accomplit

J'ai l'immense honneur de dédier ce mémoire :

A ma chère Maman.

*Mon ange gardien, ma force après Dieu, mon premier soutien,
mon pilier, mon exemple et ma sécurité dans cette vie et pour
l'éternité.*

A mon cher Papa.

*Celui qui m'a soutenu sans limites et donné sans rien attendre
en retour, mon appui inébranlable.*

*A celles qui ont partagé mes rires et mes larmes. Mes précieuses
sœurs : Fatima Zahra, Rofeida et Israe.*

A mes chères tantes et à mes cousins.

*Merci du fond du cœur pour votre soutien précieux et votre
présence à mes côtés. Vous avez toujours été un pilier sur
lequel je peux compter.*

*Je vous dois tout mon amour et ma profonde reconnaissance.
Sans vous, je ne serais jamais arrivé là où je suis aujourd'hui.*

Radjaa





DEDICACE



Avant tout, je rends grâce à Dieu pour sa miséricorde, sa guidance et la force qu'il m'a accordée tout au long de ce parcours.

Avec toute ma gratitude et mon respect, je dédie ce travail avec respect et gratitude :

A ma mère Ouassila, source d'amour, de prières et de patience. Que Dieu te récompense pour tout ce que tu as donné.

A mon père Ahmed, au cœur généreux et au regard silencieux qui disait tant, toute ma gratitude pour la force et la confiance que tu as semées en moi.

A mes chères sœurs Marwa, Ritedje et Achraket Marame, merci pour vos nobles sentiments et votre belle présence dans ma vie.

A mes familles "Boudjenane et Hamzaouie", je vous adresse mes remerciements pour votre gentillesse et vos marques.

A mes amies, merci pour votre compagnie et les bons moments partagés.

Chaimae



TABLE DES MATIERES

Pages

REMERCIEMENTS	
DEDICACES	
RESUME	
LISTE DES ABREVIATIONS	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES PHOTOS	
LISTE DES TABLEAUX	
INTRODUCTION GENERALE	i

1^{ère} Partie : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Premier Chapitre: GENERALITES SUR LES EAUX USEES

I. PROBLEMATIQUE	01
II. OBJECTIFS	01
III. INTRODUCTION	01
IV. GENERALITES	02
1. L'eau dans la nature	02
1.1. Les éléments du cycle de l'eau	02
1.2. Le cycle de l'eau	03
2. Pollution de l'eau	04
3. Eaux usées : Définition et Origines	05
3.1. Définition des eaux usées	05
3.2. Origines des eaux usées	05
3.2.1. Les eaux usées domestiques	05
3.2.2. Les eaux usées industrielles	05
3.2.3. Les eaux usées agricoles	06
3.2.4. Les eaux usées pluviales	06
4. Classification des polluants	06
4.1. Matière organique et / ou minérale	06
4.2. Matière soluble et / ou insoluble	07
4.3. Matières toxiques	07
4.4. Matières inertes et / ou vivantes	07
5. Paramètres généraux relatifs aux eaux usées	07
5.1. Paramètres Physiques	07
5.1.1. Température	07
5.1.2. Matières en suspension (MES)	08
5.1.3. Turbidité	08
5.1.4. Couleur	08
5.1.5. Conductivité	08
5.2. Paramètres Chimiques	08
5.2.1. Potentiel Hydrogène (pH)	08
5.2.2. Oxygène dissous (O ₂)	09
5.2.3. La Demande Chimique en Oxygène (DCO)	09
5.2.4. La Demande Biochimique en Oxygène (DBO ₅)	09

5.2.5. L'Azote	09
5.2.6. Les nitrates	09
5.2.7. L'Azote ammoniacal	10
5.2.8. Le phosphore	10
5.2.9. Les sulfates	10
5.3. Paramètres Bactériologiques	11
5.3.1. Les coliformes	11
5.3.2. Les streptocoques fécaux et Enterococcus	11
5.3.3. Les bactéries sulfato-réductrices	11
6. Impact de la pollution de l'eau sur l'environnement et la santé humaine	12
6.1. Les impacts sur l'environnement	12
6.2. Les impacts sur la santé humaine	12
6.2.1. Les maladies d'origine bactérienne	12
6.2.2. Les maladies d'origine parasitaires	12
V. CONCLUSION	13

Deuxième Chapitre: PROCÉDES D'ÉPURATION DES EAUX USEES

I. INTRODUCTION	14
II. L'ÉPURATION DES EAUX USEES	14
1. Les étapes de traitements des eaux usées	14
1.1. Prétraitements physiques	14
1.1.1. Dégrillage	14
1.1.2. Dessablage	15
1.1.3. Dégraissage - Déshuilage	15
1.2. Traitement primaire	16
1.2.1. La décantation (processus physique)	16
1.2.2. La flottation (processus physique)	17
1.2.3. La décantation associée à l'utilisation d'un coagulant-floculant (voie physico-chimique)	17
1.3. Traitement secondaire (traitement biologique)	17
1.3.1. Le traitement secondaire anaérobie	17
1.3.2. Le traitement secondaire aérobie	17
1.3.3. Les traitements par les disques biologiques	19
1.3.4. Traitement biologique extensifs	19
1.3.4.1. Le lagunage	19
1.3.4.2. La filtration / Percolation	20
1.4. Traitement tertiaire	21
1.4.1. Traitement des boues	21
III. CONCLUSION	22

Troisième Chapitre: REUTILISATION DES EAUX TRAITÉES DANS L'AGRICULTURE

I. INTRODUCTION	23
II. REUTILISATION DES EAUX ÉPURÉES	23
1. Dans le monde	23
2. En Algérie	24
3. Les risques liés à la réutilisation agricole des eaux épurées	24

3.1. Le risque microbiologique	24
3.2. Le risque chimique	24
3.3. Le risque environnemental	24
4. Les effets sur le sol	25
5. Avantage des eaux usées traitées en agriculture	25
6. Spécification des eaux usées épurées utilisées à des fins d'irrigation	25
7. Les cultures autorisées pour l'irrigation par les eaux usées épurées	26
7.1. Liste des cultures autorisées	26
8. Le sol	27
8.1. Types de sol	27
8.1.1. Types de sol selon leur composition	27
8.1.1.1. Sol sableux	27
8.1.1.2. Sol limoneux	28
8.1.1.3. Sol argileux	28
8.1.1.4. Sol humifère	29
8.1.2. Types de sols pour une croissance optimale des cultures	30
8.2. Propriétés physiques et chimiques du sol	31
8.2.1. La texture	31
8.2.1.1. Evaluation de la texture	31
8.2.2. La structure	32
III. LES TECHNIQUES D'IRRIGATION	32
1. L'irrigation gravitaire	32
1.1. Types d'irrigation gravitaire	32
1.1.1. Irrigation par planche / Irrigation par ruissellement	32
1.1.2. Irrigation par raie	32
1.1.3. Irrigation par siphon	33
1.1.4. Irrigation par gaines souples	33
1.2. Avantages et inconvénients	33
1.2.1. Les avantages de l'irrigation gravitaire	33
1.2.2. Les inconvénients de l'irrigation gravitaire	33
2. L'irrigation par aspersion	33
2.1. Les avantages et les inconvénients de l'irrigation par aspersion	34
2.1.1. Les avantages	34
2.1.2. Les inconvénients	34
3. L'irrigation par goutte à goutte	34
3.1. Les avantages et les inconvénients de l'irrigation par goutte à goutte	35
3.1.1. Les avantages	35
3.1.2. Les inconvénients	35
IV. DIRECTIVES DE REUTILISATION DES EAUX EPUREES	36
1. Aspects socioculturels, légaux, institutionnels et économiques	36
2. Acceptabilité sociale et information du public	36
3. Aspects institutionnels, surveillance et mesures de contrôle	36
4. Considérations réglementaires et questions de droit	37
5. Aspects économiques	37
6. Avantages	37
V. CONCLUSION	38

2^{ème} Partie : PARTIE EXPERIMENTALE

Quatrième Chapitre: DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

I. INTRODUCTION	39
II. PRESENTATION DE LA REGION D'ETUDE	39
1. Données générales	39
2. Contexte Géographique	40
3. Contexte Géologique	40
4. Nature du sol	41
III. PRESENTATION DU PERIMETRE D'IRRIGATION MAGHNIA-EL KFAF	41
1. Situation géographique	41
2. Généralités sur le périmètre irrigué de Maghnia	42
IV. CONTEXTE CLIMATIQUE	42
1. Pluviométrie	43
2. Température	44
3. Etude du climat	45
V. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE	45
1. Réseau hydrographique	46
VI. CONTEXTE AGRICOLE	46
VII. PRESENTATION DU SITE D'ETUDE	46
1. Mode de fonctionnement de STEP de Maghnia	47
1.1. Fiche technique de la STEP	47
1.2. Origine de l'eau brute	47
1.3. Installation de la STEP	47
1.4. Ouvrage de traitement de la STEP	47
1.4.1. Déversoir d'orage	48
1.4.2. Prétraitement	48
1.4.2.1. Grille grossière	48
1.4.2.2. Relevage	48
1.4.2.3. Dégrillage fin	49
1.4.2.4. Grille manuelle de By-Pass (01 unité)	49
1.4.2.5. Refus de dégrillage	50
1.4.2.6. Dessableur – Déshuileur (02 unités)	50
1.4.3. Traitement biologique	51
1.4.3.1. Transport	51
1.4.3.2. Bassin d'aération (04 unités)	51
1.4.3.2.1. Fonctionnement au niveau des Bassins	52
1.4.3.3. Tour de répartition	52
1.4.3.4. Décanteur secondaire (02 unités)	53
1.4.3.5. Puisard à boues	53
1.4.4. Bassin de Chloration	53
1.4.5. Description des ouvrages de traitement de la filière des Boues	54
1.4.5.1. Epaisseur	54
1.4.5.2. Lits de séchage (14 lits)	54
1.5. Rendement de la STEP	55
VIII. CONCLUSION	56

Cinquième Chapitre: MATERIELS ET METHODES

I. INTRODUCTION	57
II. GENERALITE SUR LES CULTURES	57
1. Les oliviers	57
1.1. Conditions de croissance	57
1.2. Méthode de culture	57
1.3. Besoins en eau	58
2. Les haricots	58
2.1. Conditions de croissance	58
2.2. Méthode de culture	58
2.3. Besoins en eau	58
3. La tomate	59
3.1. Conditions de croissance	59
3.2. Méthode de culture	59
3.3. Besoins en eau	60
III. MATEREIL ET EQUIPEMENT D'IRRIGATION	60
1. Matériel nécessaire	60
2. Mise en place	60
2.1. Préparation du sol	60
2.2. Conception du réseau d'irrigation	61
IV. IDENTIFICATION DES PROTOCOLES DE PRELEVEMENTS	61
A. PROTOCOLE DE PRELEVEMENT	61
1. Domaine d'application	62
2. Préparation des équipements nécessaires	62
2.1. Consignes de sécurité	62
2.2. Appareillages	62
2.3. Matériels	62
3. Prélèvement des échantillons	62
3.1. Méthodes de prélèvement	63
3.2. Le remplissage	63
3.3. L'Etiquetage	63
3.4. Conservation des échantillons	64
B. PARAMETRES D'ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES	64
1. Paramètres mesurés in-situ	64
1.1. Mesure du potentiel d'hydrogène (pH)	65
1.1.1. Principe	65
1.1.2. Mode opératoire	65
1.2. Mesure de la température (T°)	65
1.2.1. Mode opératoire	66
1.2.2. Expression des résultats	66
1.3. Mesure de la turbidité	66
1.3.1. Mode opératoire	66
1.4. Mesure de la conductivité électrique (CE)	67
1.4.1. Mode opératoire	67
1.4.2. Expression des résultats	67
1.5. Mesure de l'Oxygène dissous (OD)	67
1.5.1. Mode opératoire	68

1.5.2. Expression des résultats	68
2. Paramètres physico-chimiques mesurés au laboratoire	68
2.1. Mesure des matières en suspension (MES)	69
2.1.1. Principe	69
2.1.2. Mode opératoire	69
2.1.3. Expression des résultats	70
2.2. Mesure de la demande biochimique en oxygène (DBO ₅)	70
2.2.1. Principe	70
2.2.2. Mode opératoire	71
2.2.3. Expression des résultats	71
2.3. Mesure de la demande chimique en oxygène (DCO)	71
2.3.1. Principe	72
2.3.2. Mode opératoire	72
2.3.3. Expression des résultats	73
2.4. Mesure de l'Azote ammoniacal (NH ⁺ ₄)	73
2.4.1. Principe	73
2.4.2. Réactifs	73
2.4.3. Mode opératoire	73
2.4.4. Expression des résultats	74
2.5. Dosage des nitrates (NO ⁻ ₃)	74
2.5.1. Objectif	74
2.5.2. Expression des résultats	74
2.5.3. Matériel et réactifs	74
2.5.4. Mode opératoire	74
2.5.5. Expression des résultats	75
V. CONCLUSION	76

Sixième Chapitre: RESULTATS ET INTERPRETATIONS

I. INTRODUCTION	77
II. RESULTATS ET DISCUSSIONS	77
1. Résultats des analyses physico-chimiques	77
2. Résultats des analyses à l'entrée et la sortie de la STEP	78
2.1. Variation temporelle de la Température 'T' à l'entrée et à la sortie de la STEP	78
2.2. Variation temporelle du potentiel d'hydrogène 'pH' à l'entrée et à la sortie de la STEP	80
2.3. Variation temporelle de l'oxygène dissous 'O ₂ ' à l'entrée et à la sortie de la STEP	81
2.4. Variation temporelle des matières en suspension 'MES' à l'entrée et à la sortie de la STEP	83
2.5. Variation temporelle de la Conductivité électrique 'CE' à l'entrée et à la sortie de la STEP	84
2.6. Variation temporelle de l'Azote ammoniacal 'NH ⁺ ₄ ' à l'entrée et à la sortie de la STEP	86
2.7. Variation temporelle de la demande chimique en oxygène 'DCO' à l'entrée et à la sortie de la STEP	87
2.8. Variation temporelle de la Demande biochimique en oxygène en 5 jours 'DBO ₅ ' à l'entrée et à la sortie de la STEP	88

2.9. Rendement d'épuration	90
2.10. Variation temporelle des Nitrites 'NO ₂ ⁻ ' à l'entrée et à la sortie de la STEP	91
2.11. Variation temporelle des Nitrates 'NO ₃ ⁻ ' à l'entrée et à la sortie de la STEP	92
2.12. Variation temporelle des Ortho-phosphates 'PO ₄ ⁻³ ' à l'entrée et à la sortie de la STEP	93
3. Résultats du prototype	95
3.1. Résultats du 27 mai 2025	95
3.1.1. Les haricots	95
3.1.2. Les oliviers	95
3.1.3. La tomate	96
3.2. Résultats du 04 juin 2025	97
3.2.1. Les haricots	97
3.2.2. Les oliviers	97
3.2.3. La tomate	98
3.3. Résultats du 16 juin 2025	98
3.3.1. Les haricots	98
3.3.2. Les oliviers	99
3.3.3. La tomate	100
III. CONCLUSION	100
CONCLUSION GENERALE	102
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
ANNEXES	
BUSINESS MODEL CANEVAS	

Résumé

Face à la raréfaction des ressources en eau, la réutilisation des eaux usées épurées constitue une solution prometteuse, notamment dans le secteur agricole. Cette étude évalue la faisabilité de leur utilisation pour l'irrigation, à partir du cas de la station d'épuration de Maghnia (wilaya de Tlemcen).

L'étude a porté sur l'analyse d'échantillons d'eaux épurées prélevées à l'entrée et sortie de la station, ainsi que sur l'analyse de données collectées à différentes périodes pour évaluer la stabilité de la qualité de l'eau dans le temps. Un prototype d'irrigation a également été mis en place.

Les résultats montrent que ces eaux respectent, dans certaines limites, les normes agricoles et peuvent être utilisées pour irriguer certaines cultures, sous réserve du respect des bonnes pratiques. L'étude recommande de généraliser cette réutilisation de manière encadrée, avec un suivi régulier et un cadre réglementaire adapté.

Mots-clés: Eaux usées épurées, Réutilisation, Irrigation agricole, Station d'épuration, Qualité de l'eau, Agriculture durable, Tlemcen, Maghnia

Abstract

In response to increasing water scarcity, the reuse of treated (purified) wastewater is seen as a promising solution, particularly in agriculture. This study assesses the feasibility of using such water for irrigation, based on a case study of the Maghnia wastewater treatment plant (Tlemcen province).

The study included the analysis of purified water samples collected from the plant's outlet, as well as the analysis of data gathered at different time intervals to evaluate the stability of water quality over time. A prototype irrigation system was also implemented.

Results show that the purified wastewater, within certain limits, complies with agricultural standards and can be used for irrigating specific crops if proper guidelines are followed. The study recommends a controlled expansion of this practice, with regular monitoring and an appropriate legal framework.

Keywords: Purified wastewater, Reuse, Agricultural irrigation, Wastewater treatment plant, Water quality, Sustainable agriculture, Tlemcen, Maghnia.

ملخص

في ظل تزايد ندرة الموارد المائية، تُعد إعادة استخدام المياه المستعملة المُطَهَّرة خيارًا واعدًا، خاصة في القطاع الزراعي. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم إمكانية استخدام هذه المياه في الري، من خلال دراسة حالة محطة التطهير بمدينة مغنية (ولاية تلمسان). شملت الدراسة تحليل عينات من المياه المُطَهَّرة تم استخراجها من مخرج المحطة، بالإضافة إلى تحليل البيانات التي جُمعت خلال فترات زمنية مختلفة بهدف تقييم استقرار جودة المياه عبر الزمن. كما تم إنشاء نموذج أولي لتجربة الري باستخدام هذه المياه أظهرت النتائج أن المياه المُطَهَّرة، ضمن حدود معينة، تستوفي المعايير الزراعية ويمكن استخدامها لري بعض المحاصيل إذا تم احترام ضوابط الاستخدام. توصي الدراسة بتوسيع هذه الممارسة بشكل منظم، مع مراقبة دورية للجودة، ووضع إطار قانوني وتنظيمي مناسب.

الكلمات المفتاحية

المياه المستعملة المُطَهَّرة، إعادة الاستخدام، الري الزراعي، محطة التطهير، جودة المياه، الزراعة المستدامة، تلمسان، مغنية

Liste des Abréviations

LISTE DES ABREVIATIONS

ABREVIATIONS	SIGNIFICATIONS
pH	Potentiel d'hydrogène.
H ₂ O	Eau.
m/an	Mètre par an.
Km ³ /an	Kilomètre cube par an.
L	Litre.
mm	Millimètre.
%	Pourcentage.
°C	Degré Celsius
H ⁺	Hydrogène.
log	Logarithme.
g	Gramme.
Kg	Kilogramme.
µS/cm	Micro Siemens par centimètre
mg/L	Milligramme par litre.
MES	Matières En Suspensions.
DBO ₅	Demande Biochimique en Oxygène pendant 5 jours
DCO	Demande Chimique en Oxygène.
mg O ₂ /L	Milligramme d'oxygène par litre.
O ₂	Oxygène.
NH ₄ ⁺	Ammonium.
NO ₂ ⁻	Nitrites.
NO ₃ ⁻	Nitrates.
OMS	Organisation Mondiale de la Santé.
N.A	Norme Algérienne.
CEE	Certificat d'économie d'énergie.
PO ₄ ⁻³	Phosphates
IBGN	Indice Biologique Global Normalisé.
IANOR	Institut Algérien de Normalisation.
m ³	Mètre cube
CE / EC	Conductivité électrique.
Km ²	Kilomètre carré.
Km	Kilomètre.
m	Mètre.
éq habitant	Equivalent Habitant.
m ³ /j	Mètre cube par jour.
mn	Minutes.
L/j/hab	Litre par jour par habitant.
T	Température (°C).
ISO	International Organization for Standardization.

Liste des Figures

LISTE DES FIGURES

Fig. I.1 <i>Cycle de l'eau</i>	3
Fig. II.1 <i>Dégrilleur</i>	15
Fig. II.2 <i>Dessableur-Déshuileur</i>	16
Fig. II.3 <i>Décanteur primaire</i>	16
Fig. II.4 <i>Bassin d'aération</i>	18
Fig. II.5 <i>Schéma d'une Station d'épuration à boues activées.</i>	18
Fig. II.6 <i>Schéma simplifié du système à lit bactérien</i>	19
Fig. II.7 <i>Disque biologique</i>	19
Fig. II.8 <i>Schéma simplifié d'une station de lagunage naturel</i>	20
Fig. III.1 <i>Différents types de la réutilisation de l'eau dans le monde</i>	23
Fig. III.2 <i>Le sol</i>	27
Fig. III.3 <i>Différents types de sol</i>	30
Fig. III.4 <i>Système d'irrigation gravitaire</i>	32
Fig. III.5 <i>Système d'irrigation par aspersion</i>	34
Fig. III.6 <i>Système d'irrigation par goutte à goutte</i>	35
Fig. IV.1 <i>Carte de situation géographique de la région de Maghnia.</i>	39
Fig. IV.2 <i>Carte de situation de la plaine de Maghnia</i>	40
Fig. IV.3 <i>Carte Structurale du bassin de la Tafna</i>	41
Fig. IV.4 <i>Localisation de la région Maghnia-El Kfaf- avec google Earth</i>	42
Fig. IV.5 <i>Diagramme des précipitations annuelles à la station de Maghnia (1979 – 2016).</i>	43
Fig. IV.6 <i>Diagramme des précipitations annuelles à la station de Maghnia (1979-2016)</i>	44
Fig. IV.7 <i>Diagramme pluviothermique de la station de Maghnia (1979/1980 – 2015/2016).</i>	45
Fig. IV.8 <i>Réseau hydrographique de la plaine de Maghnia</i>	46
Fig. IV.9 <i>Vue de la station d'épuration de Maghnia</i>	47
Fig. IV.10 <i>Schéma synoptique STEP de Maghnia.</i>	55
Fig. V.1 <i>Les oliviers</i>	58
Fig. V.2 <i>Les Haricots</i>	59
Fig. V.3 <i>La tomate</i>	59
Fig. VI.1 <i>Variation temporelle de la température au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.</i>	79
Fig. VI.2 <i>Variation temporelle du potentiel d'hydrogène au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.</i>	81

Fig. VI.3	<i>Variation temporelle de l'oxygène dissous au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.</i>	83
Fig. VI.4	<i>Variation temporelle des matières en suspension au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.</i>	84
Fig. VI.5	<i>Variation temporelle de la Conductivité électrique au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.</i>	85
Fig. VI.6	<i>Variation temporelle de l'Azote ammoniacal au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.</i>	86
Fig. VI.7	<i>Variation temporelle de la demande chimique en oxygène au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.</i>	88
Fig. VI.8	<i>Variation temporelle de la demande biochimique en oxygène en 5 jours au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.</i>	89
Fig. VI.9	<i>Variation temporelle du rendement d'épuration de la STEP.</i>	90
Fig. VI.10	<i>Variation temporelle des nitrites au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.</i>	92
Fig. VI.11	<i>Variation temporelle des nitrates au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.</i>	93
Fig. VI.12	<i>Variation temporelle des Ortho-phosphates au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.</i>	94

Liste des Photos

Liste des photos

Photo. IV.1	Déversoir d'orage	48
Photo. IV.2	Grille grossière manuelle (01 unité).	48
Photo. IV.3	Bâtiment de relevage.	49
Photo. IV.4	Grilles mécaniques.	49
Photo. IV.5	Grille manuelle	49
Photo. IV.6	Dessableur – Déshuilleur.	51
Photo. IV.7	Bassins d'aérations	51
Photo. IV.8	Décanteurs secondaires	53
Photo. IV.9	Canal déversoir du rejet du bassin de chloration.	54
Photo. IV.10	Epaississeur de boues.	54
Photo. IV.11	Lits de séchage.	55
Photo. V.1	Matériels d'équipement d'irrigation	60
Photo. V.2	Préparation du sol.	61
Photo. V.3	Installation finale du dispositif.	61
Photo. V.4	Prélèvement d'échantillons	63
Photo. V.5	pH mètre de laboratoire.	65
Photo. V.6	Turbidimètre de laboratoire.	66
Photo. V.7	Conductivimètre de laboratoire.	67
Photo. V.8	Oxymètre de laboratoire.	68
Photo. V.9	Etuve de laboratoire	70
Photo. V.10	Bloc chauffant de laboratoire.	72
Photo. V.11	Les solutions	73
Photo. V.12	Balance électronique.	75
Photo. V.13	Les solutions étalon.	75
Photo. V.14	Spectrophotomètre	75
Photo. VI.1	Comparaison entre la croissance des plants d'haricot irrigués avec : (a/ Eau épurée, b/ Eau douce).	95
Photo. VI.2	Comparaison entre la croissance de l'olivier irrigués avec : (a/ Eau épurée, b/ Eau douce).	95
Photo. VI.3	Comparaison entre la croissance de la tomate irrigués avec : (a/ Eau épurée, b/ Eau douce).	96
Photo. VI.4	Comparaison entre la croissance des haricots irrigués avec : (a/ Eau épurée, b/ Eau douce).	97
Photo. VI.5	Comparaison entre la croissance du plant d'oliviers irrigués avec : (a/ Eau épurée, b/ Eau douce).	97
Photo. VI.6	Comparaison entre la croissance des plants de tomate irrigués avec : (a/ Eau épurée, b/ Eau douce).	98
Photo. VI.7	Comparaison entre la croissance des plants d'haricot irrigués avec : (a/ Eau épurée, b/ Eau douce).	98
Photo. VI.8	Comparaison entre la croissance des plants de l'olivier irrigués avec : (a/ Eau épurée, b/ Eau douce).	99
Photo. VI.9	Comparaison entre la croissance des plants de tomate irrigués avec : (a/ Eau épurée, b/ Eau douce).	100

Liste des Tableaux

Liste des tableaux

Tabl.I.1	<i>Bilan du cycle de l'eau suivant la saison</i>	4
Tabl.III.1	<i>Les paramètres microbiologiques</i>	25
Tabl.III.2	<i>Liste des cultures pouvant être irriguées avec des eaux usées épurées</i>	26
Tabl.III.3	<i>Les caractéristiques principales des composants des types de sol</i>	31
Tabl.IV.1	<i>Caractéristiques de la station de mesure</i>	43
Tabl.IV.2	<i>Pluviométrie mensuelles et annuelles au sous bassin Mouilah</i>	43
Tabl.IV.3	<i>Valeurs des précipitations moyennes annuelles à la station de Maghnia (1979/1980 – 2015/2016)</i>	43
Tabl.IV.4	<i>Valeurs des Températures moyennes annuelles à la station de Maghnia (1979/1980 – 2015/2016).</i>	44
Tabl.IV.5	<i>Valeurs des précipitations et des températures moyennes mensuelles.</i>	45
Tabl.IV.6	<i>Caractéristiques des grilles utilisées au niveau du prétraitement</i>	50
Tabl.IV.7	<i>Caractéristiques du bassin d'aération</i>	52
Tabl.IV.8	<i>Débit au niveau de la STEP de Maghnia</i>	55
Tabl.VI.1	<i>Résultats des analyses physico-chimiques (Entrée STEP)</i>	77
Tabl.VI.2	<i>Résultats des analyses physico-chimiques (Sortie STEP)</i>	78
Tabl.VI.3	<i>Résultats de la température à l'entrée et à la sortie de la STEP</i>	79
tabl.VI.4	<i>Résultats du potentiel d'hydrogène à l'entrée et à la sortie de la STEP</i>	80
Tabl.VI.5	<i>Résultats de l'oxygène dissous à l'entrée et à la sortie de la STEP</i>	82
Tabl.VI.6	<i>Résultats des matières en suspension à l'entrée et à la sortie de la STEP</i>	83
Tabl.VI.7	<i>Résultats de la conductivité électrique à l'entrée et à la sortie de la STEP</i>	85
Tabl.VI.8	<i>Résultats de l'azote ammoniacale à l'entrée et à la sortie de la STEP</i>	86
Tabl.VI.9	<i>Résultats de la demande chimique en oxygène à l'entrée et à la sortie de la STEP</i>	87
Tabl.VI.10	<i>Résultats de la demande biochimique en oxygène en 5 jours à l'entrée et à la sortie de la STEP</i>	89
Tabl.VI.11	<i>Résultat du rendement d'épuration au niveau de la STEP</i>	90
Tabl.VI.12	<i>Résultats des nitrites à l'entrée et à la sortie de la STEP</i>	91
Tabl.VI.13	<i>Résultats des nitrates à l'entrée et à la sortie de la STEP</i>	92
Tabl.VI.14	<i>Résultats des ortho-phosphates à l'entrée et à la sortie de la STEP</i>	93



***Introduction
Générale***

INTRODUCTION GENERALE

L'eau joue un rôle essentiel en agriculture. Face à la raréfaction des ressources en eau potable, l'utilisation des eaux usées traitées s'impose comme une solution incontournable pour l'irrigation des cultures. Cependant, la qualité de ces eaux influence directement la santé des sols et des plantations. Il est donc crucial de s'assurer qu'elles soient exemptes de contaminants tels que les excès de sels, les produits chimiques ou les bactéries pathogènes.

L'évaluation de la qualité des eaux usées repose sur l'analyse de plusieurs critères essentiels. Elle prend en compte des paramètres physiques, tels que la température et la couleur, des aspects chimiques, comme les concentrations en sels, en matière organique et en métaux lourds, ainsi que des indicateurs biologiques permettant de détecter la présence d'organismes nuisibles ou de bactéries pathogènes. Cette analyse a pour objectif de s'assurer que les eaux usées peuvent être réutilisées sans compromettre la fertilité des sols, la sécurité des cultures, ni la santé humaine et environnementale.

L'eau est un élément essentiel à la vie sur Terre. Elle intervient dans l'ensemble des processus vitaux des plantes, des animaux et des êtres humains. Présente sous différentes formes, comme les eaux de surface (rivières, lacs) et les eaux souterraines, elle constitue une ressource naturelle indispensable à la survie, mais aussi au développement économique et social.

Avec l'augmentation de la population et la croissance économique, la demande en eau ne cesse de croître, entraînant une raréfaction des ressources dans de nombreuses régions. Dans ce contexte, les eaux usées traitées sont devenues une ressource précieuse, valorisable dans plusieurs secteurs, notamment en agriculture. Leur utilisation pour l'irrigation permet non seulement de préserver les ressources en eau douce et de réduire la pression sur les réserves hydriques traditionnelles, mais aussi d'apporter certains éléments nutritifs contenus dans ces eaux.

Les eaux usées traitées, issues des stations d'épuration, occupent aujourd'hui une place essentielle dans la gestion des ressources hydriques de nombreuses régions. Cependant, leur qualité reste un enjeu majeur. En effet, un traitement insuffisant peut laisser persister des polluants chimiques, organiques ou microbiologiques. Cette situation peut avoir des répercussions importantes non seulement sur l'environnement local, mais aussi sur l'agriculture, la santé publique et la durabilité des sols irrigués.

Dans la ville de Maghnia, située dans la wilaya de Tlemcen, la question de la qualité des eaux usées traitées reste encore peu explorée, malgré leur utilisation croissante, notamment pour l'irrigation agricole. Cette étude vise donc à évaluer la qualité de ces eaux dans la région, en fournissant des données fiables susceptibles de favoriser une utilisation sécurisée et optimale de cette ressource, tout en assurant la protection de l'environnement et la santé des populations locales.

Ce travail s'est focalisé sur une analyse approfondie de la réutilisation des eaux usées en agriculture et de leur impact sur la qualité des sols et des cultures. Il comprend également la conception et la mise en œuvre d'un prototype d'irrigation utilisant ces eaux, afin

d'évaluer concrètement l'efficacité et la sécurité de cette méthode. Ce mémoire est structuré en plusieurs chapitres, permettant de présenter de manière détaillée les différents aspects liés à cette problématique complexe.

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un stage effectué au mois de mars 2025 au niveau de la station d'épuration de la ville de Maghnia. Les analyses de la qualité des eaux ont été effectuées au laboratoire de la faculté ainsi qu'au laboratoire des technologies de séparation et purification LTSP, sous la supervision de notre encadrante.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre d'étude de réutilisation des eaux usées en agriculture : cas de la STEP de Maghnia. Cette étude est divisée en deux (02) parties:

✚ La 1^{ère} partie porte sur une synthèse bibliographique, cette partie est scindée en elle-même en trois (03) chapitres :

- Le premier chapitre portera sur des généralités sur les eaux usées, leur importance, leur disponibilité, les principales caractéristiques physico-chimiques ainsi que les enjeux liés à la qualité de l'eau épurée.
- Le deuxième chapitre se concentrera sur les différents procédés d'épuration.
- Le troisième chapitre traitera la réutilisation des eaux usées traitées dans l'agriculture, et les dimensionnements des différents systèmes d'irrigation.

✚ La 2^{ème} est la partie expérimentale qui est subdivisée en trois (03) chapitres.

- Le quatrième chapitre consistera à la description de la zone d'étude détaillée, incluant une étude géographique, géologique, hydrologique, hydrogéologique et climatique ; ainsi que son utilisation actuelle pour l'irrigation des terres agricoles.
- Quant au cinquième chapitre, il présentera la méthodologie utilisée pour la collecte des données, les analyses des échantillons d'eau, ainsi que l'évaluation des impacts environnementaux et agricoles ; les détails sur les équipements utilisés, les méthodes d'échantillonnage et les protocoles d'analyse seront présentés pour donner plus de fiabilité aux résultats obtenus, et dédiés à la présentation des matériels et méthodes utilisés dans la réalisation de notre prototype.
- En ce qui concerne le sixième chapitre, il sera dédié à l'interprétation des résultats obtenus.

Enfin, une conclusion générale sera tirée résumant les principales conclusions de notre étude, les défis rencontrés et les recommandations pour améliorer la gestion de la qualité de l'eau usée et minimiser son impact négatif sur les terrains agricoles.

1^{ère} Partie :

Synthèse Bibliographique

Chapitre I :

***Généralités sur les
eaux usées***

Premier Chapitre : GENERALITES SUR LES EAUX USEES

I. PROBLEMATIQUE

Dans le cadre de la promotion des pratiques agricoles durables et de l'optimisation de l'utilisation des ressources en eau non conventionnelles, cette recherche se concentre sur l'analyse de la qualité des eaux traitées issues de la station d'épuration de la ville de Maghnia, ainsi que sur leur potentiel d'utilisation pour l'irrigation agricole. L'étude s'inscrit dans une démarche visant à identifier des solutions alternatives et économiques favorisant à la fois la préservation des ressources naturelles et la promotion d'une agriculture durable. Elle comprend également la conception et la mise en œuvre d'un prototype expérimental, utilisant ces eaux dans l'irrigation de cultures tests, afin d'évaluer leurs effets possibles sur les sols et les végétaux, tout en vérifiant leur conformité avec les normes techniques et environnementales en vigueur.

II. OBJECTIFS

Le principal objectif de cette étude est d'examiner le potentiel de réutilisation des eaux usées traitées provenant de la station d'épuration de la ville Maghnia (STEP Maghnia) dans le secteur agricole. Dans un contexte de raréfaction croissante des ressources en eau, l'analyse se concentre sur l'évaluation des caractéristiques physiques, chimiques et microbiologiques de ces eaux, en les confrontant aux standards établis pour l'irrigation agricole.

L'étude inclut la mise en place d'un prototype expérimental destiné à appliquer les eaux traitées à l'irrigation de cultures spécifiques. Ce dispositif vise à évaluer, dans des conditions réelles ou semi-contrôlées, les impacts sur la croissance des plantes, la qualité des sols et le rendement agricole.

Par cette démarche, l'étude aspire à offrir des solutions durables pour une gestion efficace de l'eau dans la région de Maghnia. Elle participera au développement de pratiques agricoles novatrices et respectueuses de l'environnement, soutenant en parallèle les initiatives locales de valorisation des eaux usées traitées dans l'agriculture.

III. INTRODUCTION

L'eau est essentielle à la vie. Tous les êtres vivants sur Terre, qu'il s'agisse des micro-organismes, des plantes, des animaux ou des humains – y compris notre cerveau – sont majoritairement composés d'eau. De plus, cette ressource est indispensable dans de nombreux domaines, notamment pour la consommation domestique, la production industrielle, l'irrigation, la production d'énergie ou encore le nettoyage. Pourtant, bien que l'eau recouvre plus de 70 % de la surface terrestre, seulement 0,5 % de cette quantité est adaptée aux divers besoins humains (*Gleick, 1996*). La part de l'eau disponible se réduit progressivement, car l'agriculture, l'industrie et les besoins domestiques en consomment de plus en plus.

En parallèle, les rejets polluants dégradent la qualité de l'eau. Les eaux usées renferment une quantité importante de matières organiques qui, si elles étaient déversées massivement dans les cours d'eau récepteurs, entraîneraient une baisse des niveaux d'oxygène dissous ainsi que d'autres problèmes environnementaux. De plus, des substances toxiques peuvent s'y retrouver à cause des décharges industrielles (*Metcalf et Eddy, 2003*).

Ainsi, pour préserver l'environnement et sauvegarder la vie, il est indispensable de traiter les eaux usées de manière appropriée avant leur rejet. Parmi les différentes techniques disponibles, le traitement biologique des eaux usées joue un rôle clé en réduisant leur charge en matières organiques. Bien que plusieurs méthodes de traitement biologique soient disponibles, la plus couramment employée demeure le système de boues activées (*Spellman, 2003*).

IV. GENERALITES

1. L'eau dans la nature

1.1. Les éléments du cycle de l'eau

L'eau, présente sous forme gazeuse, liquide ou solide, circule continuellement dans la nature selon un cycle complexe mais bien établi (*Boeglin, 2008*).

❖ *Précipitations*

Lorsque la vapeur d'eau atmosphérique se condense, elle forme des nuages qui donnent naissance aux précipitations : pluie, neige ou grêle. Celles-ci constituent la principale source d'eau douce sur Terre. Le volume et la fréquence des précipitations varient considérablement selon les régions, influencés principalement par le climat et le relief. On mesure les précipitations par la hauteur moyenne d'eau tombée annuellement en un lieu donné, une valeur qui peut aller de zéro dans les zones désertiques à 14 m/an dans l'Himalaya. Le total annuel des précipitations sur les continents est estimé à environ 100000 km³ (*Boeglin, 2008*).

❖ *Ruissellement*

Une partie des précipitations s'écoule à la surface du sol vers les cours d'eau, les lacs, les mers et les océans : c'est le ruissellement de surface. Ce phénomène est à distinguer de l'écoulement global, qui inclut aussi les apports provenant des nappes souterraines.

❖ *Évapotranspiration*

L'évapotranspiration représente l'ensemble des pertes en eau dues à sa transformation en vapeur. Elle comporte deux volets :

➤ **L'évaporation** : Un phénomène physique durant lequel l'eau retourne directement à l'atmosphère, dépendant du déficit hygrométrique (différence entre la pression de vapeur saturante et la pression de vapeur réelle).

➤ **La transpiration des plantes** : Soit l'eau absorbée par les racines puis évacuée par les feuilles. Ce processus est essentiel à la croissance végétale. On estime qu'il faut entre 300 et 1 000 litres d'eau pour produire un kilogramme de matière sèche végétale. Par exemple, une forêt de hêtres peut transpirer entre 70 et 540 mm d'eau par an, selon son âge (*Boeglin, 2008*).

❖ Infiltration

Une autre portion des précipitations pénètre dans le sol, alimentant les réserves en eaux souterraines. Cette eau peut soit rester stockée pendant de longues périodes (parfois millénaires), soit réapparaître en surface et participer au ruissellement ou à l'évapotranspiration.

1.2. Le cycle de l'eau

Le cycle de l'eau est comparable au fonctionnement d'un immense dispositif de distillation naturel. Il forme un système fermé où les pertes sont compensées par des gains, selon la formule suivante (*Boeglin, 2008*) :

$$\text{Précipitations} = \text{Ruissellement} + \underbrace{\text{Evaporation} + \text{Transpiration}}_{\text{Evapotranspiration}} + \text{Infiltration} \quad (I.1)$$

L'eau est un élément vital pour tous les êtres vivants. Elle couvre environ 71 % de la surface terrestre, dont 97 % sont des eaux salées et seulement 3 % sont de l'eau douce, répartie dans divers réservoirs. Ce cycle de transformation naturelle de l'eau : évaporation, précipitations, ruissellement et circulation souterraine est principalement alimenté par l'énergie solaire.

Selon les caractéristiques géologiques, l'eau souterraine peut rester stockée très longtemps. Les eaux de surface proviennent des précipitations ; une partie s'évapore, une autre gèle ou s'infiltrate pour rejoindre les nappes phréatiques. Ainsi, l'eau s'évapore en permanence depuis les mers et les rivières, formant des nuages qui retombent sous forme de pluie ou de neige sur les continents (*Merzoug, 2022*).

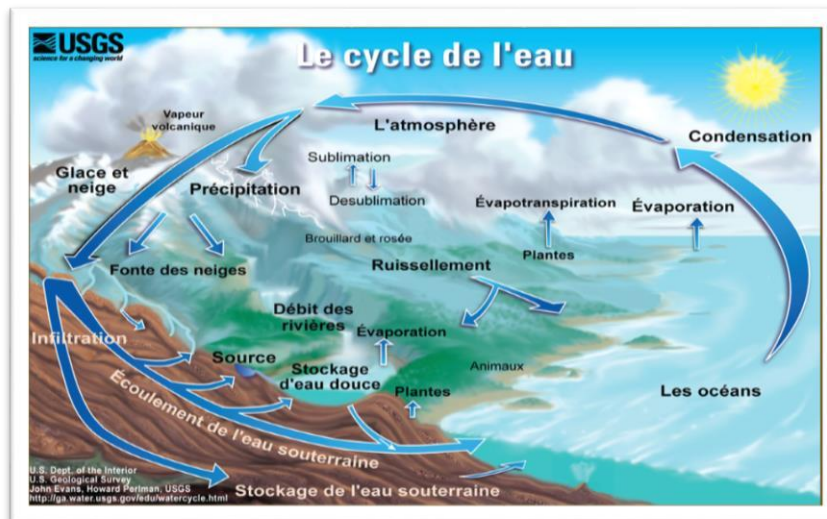


Fig. I.1 : Cycle de l'eau [1]

Les composantes du bilan hydrologique peuvent être analysées localement à l'aide d'installations expérimentales appelées **lys métrés**, qui exploitent directement le sol comme outil de mesure. Dans les climats tempérés et sur des terrains à dominante sédimentaire, ces éléments varient selon les saisons, comme le montre le *tableau I.1*.

Tableau. I.1 : Bilan du cycle de l'eau suivant la saison (*Boeglin, 2008*).

<i>Etape</i>	<i>En été</i>	<i>En hiver</i>
<i>Ruissellement</i>	15%	25%
<i>Evaporation</i>	25%	10%
<i>Infiltration</i>	25%	65%
<i>Transpiration</i>	35%	-

Les données du **tableau I.1** mettent en évidence le rôle déterminant des précipitations hivernales dans la reconstitution des réserves en eau, notamment au moment de la fonte des neiges. Il s'agit toutefois de valeurs moyennes, qui peuvent varier selon la topographie et la nature géologique du sol.

2. Pollution de l'eau

La pollution de l'eau correspond à une dégradation de sa qualité et de ses propriétés, rendant son usage risqué et affectant l'équilibre des écosystèmes aquatiques. Elle touche aussi bien les eaux de surface, comme les rivières et les lacs, que les eaux souterraines (*Soudi et al., 2009*).

La pollution de l'eau se traduit principalement dans les eaux de surface par :

✓ **Une diminution de la teneur en oxygène dissous** : Les matières organiques, essentielles à la vie aquatique en tant que source de nourriture, peuvent se transformer en éléments perturbateurs lorsqu'elles sont présentes en quantités excessives. Parmi les substances responsables d'une consommation importante d'oxygène, on retrouve notamment les sous-produits rejetés par l'industrie laitière, le sang provenant de l'industrie de la viande, ainsi que les déchets contenus dans les eaux usées domestiques, entre autres. Cette réduction de l'oxygène dissous dans l'eau peut, dans certains cas, entraîner des mortalités massives de poissons.

✓ **La présence de produits toxiques** : Ces substances engendrent des effets pouvant se manifester sous deux formes : un effet immédiat ou à court terme, entraînant une toxicité aiguë et, par conséquent, la mort rapide de divers organismes, et un effet différé ou à long terme, résultant de l'accumulation progressive de ces substances chez certains organismes. La majorité des produits toxiques sont issus de l'industrie chimique, de l'industrie métallurgique, des activités agricoles, ainsi que des décharges de déchets domestiques ou industriels.

✓ **Une prolifération d'algues** : Même si les algues sont bénéfiques dans les milieux aquatiques en contribuant à la production d'oxygène dissous, leur prolifération excessive peut engendrer des déséquilibres importants, entraînant le phénomène d'eutrophisation.

✓ **Une modification physique du milieu récepteur** : Le milieu peut subir des perturbations dues à divers apports aux effets variés, tels que l'augmentation de la turbidité de l'eau (par exemple, le lavage de matériaux issus de sablières ou de carrières), la modification de la salinité (comme les eaux d'exhaure des mines de sel) ou encore l'élévation de la température (notamment les eaux de refroidissement des centrales nucléaires).

✓ **La présence de bactéries ou virus dangereux** : Les foyers domestiques, les hôpitaux, les élevages ainsi que certaines industries agroalimentaires émettent des germes pouvant représenter un risque pour la santé.

3. Eaux usées : Définition et Origines

3.1. Définition des eaux usées

Selon **Rejsek (2002)**, les eaux résiduaires urbaines (ERU), également appelées eaux usées, correspondent à des eaux contenant des polluants, qu'ils soient solubles ou non, provenant principalement des activités humaines. De manière générale, une eau usée se compose d'un mélange de substances polluantes, réparties ou dissoutes dans l'eau utilisée pour des besoins domestiques ou industriels (**Grosclaude, 1999**). Ainsi, le terme "*eaux résiduaires*" regroupe des eaux issues de sources variées qui ont perdu leur pureté, autrement dit leurs caractéristiques naturelles, en raison de la présence de polluants après leur utilisation dans des activités humaines, qu'elles soient domestiques, industrielles ou agricoles (**Bekkari, 2020**).

3.2. Origines des eaux usées

Les eaux usées, quelle que soit leur origine, contiennent souvent des éléments indésirables qui représentent une menace réelle pour les milieux récepteurs et leurs utilisateurs. L'élimination de ces substances toxiques nécessite la mise en place d'une chaîne de traitement adaptée. Cependant, avant d'élaborer un quelconque procédé d'épuration, il est essentiel de caractériser l'effluent à traiter, tant sur le plan quantitatif que qualitatif. Les principales sources des eaux usées se répartissent en trois catégories :

3.2.1. Les eaux usées domestiques

Les eaux usées domestiques incluent les eaux ménagères, telles que celles de la toilette, de la lessive, et de la cuisine, ainsi que les eaux vannes, comme les urines et les matières fécales, dans le système connu sous le nom de « tout à l'égout » (**Baumont et al., 2004**).

Ces eaux contiennent des matières minérales et organiques. Les matières minérales englobent les chlorures, phosphates, sulfates, entre autres, tandis que les matières organiques sont constituées de composés ternaires comme les sucres et les graisses. Ces composés sont formés de carbone, oxygène, et hydrogène, ainsi que d'azote, et parfois d'autres éléments comme le soufre, le phosphore, le fer, etc. (**Vaillant, 1974**).

3.2.2. Les eaux usées industrielles

Tous les rejets issus d'une utilisation de l'eau à des fins autres que domestiques sont classés comme rejets industriels. Cette catégorisation inclut non seulement les rejets produits par les usines, mais également ceux provenant d'activités artisanales ou commerciales telles que les blanchisseries, restaurants, laboratoires d'analyses médicales, entre autres.

Les eaux usées industrielles présentent une grande diversité. Certaines d'entre elles sont particulièrement dangereuses, pouvant être toxiques pour la faune et la flore aquatiques, voire pour la santé humaine. Il est essentiel de distinguer les eaux résiduaires des liquides résiduaires générés par certaines industries. Les eaux résiduaires proviennent de multiples usages : elles peuvent avoir été utilisées dans des systèmes de réfrigération, pour le nettoyage d'appareils, de machines, d'installations, ou encore pour le lavage de matières premières et

de produits en usine. Elles servent également à capter les poussières issues des fumées et peuvent contenir des substances chimiques employées durant le processus de fabrication.

À l'inverse, les liquides résiduels désignent des liquides directement issus des procédés de fabrication. Cela inclut par exemple des solutions composées de produits chimiques ou de sous-produits, ainsi que des liquides acides provenant de la vidange des cuves utilisées pour le décapage des métaux. En conséquence, la gestion des rejets industriels peut emprunter trois voies principales (*Baumont et al., 2004*) :

- Un rejet direct dans le réseau d'assainissement domestique,
- Un prétraitement suivi d'un rejet dans ce même réseau,
- Un traitement intégral sur site avant d'être déversé dans le milieu naturel.

3.2.3. Les eaux usées agricoles

Le secteur agricole demeure le principal consommateur des ressources en eau. Ces eaux une fois utilisées, sont considérées comme usées, en raison de leur charge en éléments provenant des engrais, ainsi que des composés issus du lessivage des sols (*Claude Gros, 1999*).

3.2.4. Les eaux usées pluviales

Il s'agit d'eau de ruissellements générée à la suite d'une précipitation. Elles peuvent présenter un fort niveau de pollution, notamment au début de pluie, par deux mécanismes :

- Le lessivage des sols et des surfaces imperméabilisées, ainsi que l'entraînement des déchets solides ou liquides accumulés durant les périodes sèches, sont provoqués par les premières précipitations, qui les acheminent vers le réseau d'assainissement,
- La remise en suspension des dépôts des collecteurs. L'écoulement des eaux usées dans les collecteurs du réseau est lent en période sèche ce qui favorise le dépôt de matières décantables.

Lors d'une précipitation, l'augmentation du débit d'eau entraîne la remise en suspension de ces dépôts. Ces eaux présentent des caractéristiques similaires à celles des eaux usées domestiques, mais contiennent en plus des métaux lourds et des éléments toxiques principalement issus du trafic automobile (*Satin et Salmi, 1999*).

4. Classification des polluants

Si l'on souhaite organiser les substances polluantes, c'est avant tout pour mieux s'y repérer et sélectionner efficacement les méthodes adaptées à leur élimination. La nature des polluants présents dans l'eau dépend évidemment de la provenance des eaux usées. Leur classification s'effectue en fonction des caractéristiques mentionnées ci-après (*Moletta, 2008*) :

4.1. Matière organique et / ou minérale

✓ **Matière organique** : Il s'agit d'une matière principalement dérivée de sources vivantes, telles que les végétaux ou les animaux, ainsi que de l'industrie chimique. Sa structure repose essentiellement sur le carbone. Elle contient des sucres, des protéines, des acides organiques (comme l'acide lactique ou acétique), des acides gras, ainsi que des macromolécules telles que l'amidon ou la cellulose.

✓ **Matière minérale** : C'est une matière qui, en général, ne présente pas de carbone. On y trouve des éléments tels que les métaux lourds, l'ammoniac, les nitrates, les phosphates ainsi que le dioxyde de carbone (CO₂).

En pratique, les eaux usées renferment systématiquement ces deux catégories de pollution en proportions variables selon leur provenance.

4.2. Matière soluble et / ou insoluble

La matière organique ou minérale peut être sous forme soluble ou insoluble :

✓ **Matière soluble** : Elle se dissout dans l'eau et se présente souvent sous forme d'unités chimiques simples, telles que des molécules, ou de macromolécules comme les protéines ou les colloïdes. Ces derniers flottent dans l'eau sans être visibles à l'œil nu.

✓ **Matière insoluble** : C'est un agrégat de matière qui se retrouve sous forme particulière. Les particules solides qui peuvent, soit flotter, soit décanter en fonction de leurs densités.

4.3. Matières toxiques

Parmi les diverses substances que l'on trouve dans les eaux polluées, certaines sont particulièrement toxiques pour les organismes vivants. Autrement dit, même à de très faibles concentrations, elles peuvent déséquilibrer gravement les milieux naturels. Par exemple, le cyanure, même en quantités infimes, peut provoquer des effets catastrophiques sur un écosystème. Les métaux lourds tels que le cadmium et le mercure présentent également ce danger. En très faibles concentrations, ils perturbent considérablement l'équilibre des écosystèmes.

4.4. Matières inertes et / ou vivantes

Les eaux polluées renferment des substances organiques et minérales qui n'appartiennent pas au domaine du vivant et peuvent être classées comme des matières inertes. Cependant, elles contiennent également, fréquemment, des micro-organismes tels que des bactéries, qui relèvent de la matière vivante. Ces micro-organismes prolifèrent dès que l'eau est contaminée et peuvent parfois être à l'origine de maladies.

5. Paramètres généraux relatifs aux eaux usées

5.1. Paramètres Physiques

Les eaux usées sont évaluées à l'aide de paramètres indicateurs de pollution. Elles peuvent être présentées comme suit :

5.1.1. Température

La mesure précise de la température de l'eau est essentielle. En effet, la température influence la solubilité des sels et, plus particulièrement, celle des gaz. Elle joue également un rôle dans la dissociation des sels dissous, impactant ainsi la conductivité électrique. En outre, elle intervient dans l'évaluation du pH et permet d'apporter des indications sur l'origine de l'eau et les éventuels mélanges qu'elle pourrait contenir (**Rodier et al. 2005**).

5.1.2. Matières en suspension (MES)

D'après *Rejsek (2002)*, la pollution particulaire résulte de la présence de particules de grande taille, supérieures à 10 µm, en suspension dans l'eau. Ces particules sont identifiées comme des matières en suspension (MES). En réalité, ces particules ne restent véritablement en suspension que dans des conditions d'écoulements moyens, correspondant à une vitesse minimale de 0,5 m/s. Selon leur taille, on distingue les matières grossières ou décantables (d'un diamètre supérieur à 100 µm) des matières en suspension proprement dites. On peut également inclure une partie des matières colloïdales, de dimensions inférieures, situées à la frontière entre la phase solide et la phase dissoute (entre 1 et 10⁻² µm).

5.1.3. Turbidité

D'après *Rejsek (2002)*, la turbidité désigne l'opacité d'un milieu troublé, résultant d'une réduction de la transparence d'un liquide en raison de la présence de matières non dissoutes. Dans le cas des eaux, elle est principalement provoquée par la présence de matières en suspension fines, telles que les argiles, les limons, les grains de silice ainsi que les microorganismes. Une proportion plus réduite de la turbidité peut également être attribuée à la présence de matières colloïdales, qu'elles soient organiques ou minérales. Les unités employées pour quantifier la turbidité sont définies par la norme *ASTM* (American Society for Testing and Materials), qui considère comme équivalentes les trois unités suivantes : *JTU* (Jackson Turbidity Unit), *FTU* (Formazine Turbidity Unit) et *NTU* (Nephelometric Turbidity Unit).

5.1.4. Couleur

Une eau pure examinée sous une lumière transmise sur une grande profondeur prend une teinte bleu clair, ce qui s'explique par le faible niveau d'absorption des courtes longueurs d'onde, alors que les longues longueurs d'onde, comme le rouge, sont absorbées rapidement (*Rejsek, 2002*). La couleur d'une eau est qualifiée de vraie ou réelle lorsqu'elle résulte exclusivement des substances en solution. À l'inverse, elle est dite apparente lorsque les substances en suspension y contribuent en ajoutant leur propre coloration (*Rodier et al. 2005*).

5.1.5. Conductivité

La conductivité est une propriété d'une eau qui permet le passage d'un courant électrique, grâce à la présence d'ions mobiles dans un champ électrique. Cette caractéristique dépend de la nature des ions dissous ainsi que de leur concentration (*Rejsek, 2002*). La conductivité électrique est définie comme la conductance d'une colonne d'eau située entre deux électrodes métalliques de 1 cm². Elle s'exprime en siemens par mètre (S/m), avec les conversions :

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

5.2. Paramètres Chimiques

5.2.1. Potentiel Hydrogène (pH)

L'acidité, la neutralité ou l'alcalinité d'une solution aqueuse se mesure par sa concentration en ions H₃O⁺ (souvent notés H⁺). Afin de rendre cette valeur plus facilement interprétable, on utilise le logarithme décimal de l'inverse de la concentration en ions H⁺. Ce paramètre est désigné par le pH (*Mathieu et Pieltain, 2003*).

$$\text{pH} = \log 1/ [\text{H}^+] \quad (1.2)$$

5.2.2. Oxygène dissous (O₂)

L'oxygène dissous est un élément fondamental dans l'eau, indispensable à la vie aquatique et aux processus biologiques dans les écosystèmes aquatiques. La solubilité de l'oxygène dans l'eau varie en fonction de plusieurs facteurs, tels que la température, la pression et la force ionique du milieu. La concentration en oxygène dissous est généralement exprimée en mg O₂/L (*Rejsek, 2002*).

5.2.3. La Demande Chimique en Oxygène (DCO)

La demande chimique en oxygène (DCO) représente la quantité d'oxygène consommée par les substances oxydables présentes dans l'eau lorsqu'elles sont soumises à des conditions opératoires spécifiques. Elle fournit une estimation des matières oxydables présentes, qu'elles soient d'origine organique ou minérale.

La DCO dépend de plusieurs facteurs, tels que les caractéristiques des substances présentes, leurs proportions respectives et les possibilités d'oxydation (*Rodier, 2005*). Elle est quantifiée en mg/L d'oxygène équivalent à la quantité de dichromate consommé lors du traitement d'un échantillon d'eau avec cet oxydant, conformément aux conditions précisées par la norme (*Rejsek, 2002*).

5.2.4. La Demande Biochimique en Oxygène (DBO₅)

La demande biochimique en oxygène est utilisée pour évaluer la charge en substances putrescibles d'un milieu, son pouvoir d'auto-épuration et pour définir la charge maximale acceptable, principalement dans le cadre des traitements primaires des stations d'épuration (*Rodier, 2005*).

Selon *Rejsek (2002)*, la DBO mesurée après 5 jours (DBO₅) correspond à la quantité d'oxygène consommée par les microorganismes aérobies présents dans un échantillon pour oxyder biochimiquement les composés organiques et/ou inorganiques.

5.2.5. L'Azote

L'azote dans l'eau se présente sous des formes organiques ou minérales. L'azote organique est majoritairement composé de protéines, polypeptides, acides aminés et urée, généralement en très faibles concentrations. L'azote minéral, sous forme d'ammoniacque, de nitrate ou de nitrite, constitue quant à lui la plus grande part de l'azote total (*Rodier, 2005*).

5.2.6. Les nitrates

Les nitrates présents dans les eaux proviennent principalement de l'écoulement de l'eau à travers les sols du bassin versant. Dans des conditions naturelles, leur concentration ne dépasse pas 3 mg/L dans les eaux superficielles et atteint quelques mg/L dans les eaux souterraines. La nature des zones de drainage joue un rôle clé dans leur présence, tandis que certaines activités humaines accélèrent l'enrichissement des eaux en nitrates. Ces dernières années, on observe une augmentation annuelle des teneurs en nitrates, variant généralement entre 0,5 et 1 mg/L/an, voire jusqu'à 2 mg/L/an dans certaines régions.

Les principales sources de cette augmentation sont :

- **Agricole** : L'agriculture intensive avec un emploi massif d'engrais azotés et les rejets d'effluents liés à l'élevage constituent environ deux tiers de l'apport de nitrates dans le milieu naturel.
- **Urbaine** : Les eaux épurées rejetées par les stations d'épuration, où l'élimination de l'azote reste incomplète, peuvent contenir des nitrates ou des ions ammonium. Ces

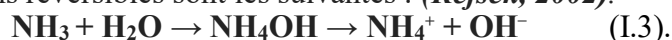
derniers se transforment en nitrates une fois dans le milieu naturel. Cette source correspond à 2/9 des apports totaux.

▪ **Industrielle** : Les rejets issus des industries, notamment celles produisant des engrais azotés, constituent une autre source principale. Ceux-ci représentent 1/9 des apports (*Rejsek, 2002*).

5.2.7. L'Azote ammoniacal

Le terme "azote ammoniacal" est souvent simplifié par l'usage du mot "*ammoniaque*", qui désigne à la fois les formes ionisées (NH_4^+) et non ionisées (NH_3) de cet élément. L'ammoniaque s'intègre dans le cycle de l'azote. À l'état initial, NH_3 est un gaz soluble dans l'eau. Cependant, selon le pH, il peut exister sous une forme non combinée ou ionisée (NH_4^+). Ces transformations dépendent aussi de la température.

Les réactions réversibles sont les suivantes : (*Rejsek, 2002*).



5.2.8. Le phosphore

Dans les milieux aquatiques, le phosphore peut se trouver en solution ou en suspension, sous forme minérale ou organique. Les composés phosphorés détectables directement par un test spectrophotométrique (sans hydrolyse ni minéralisation préalable) sont qualifiés d'orthophosphates. En revanche, l'hydrolyse en milieu acide révèle le phosphore hydrolysable, tandis que la minéralisation permet de quantifier le phosphore organique. Chaque fraction (phosphore en solution ou en suspension) peut être identifiée analytiquement comme faisant partie des orthophosphates, du phosphore hydrolysable ou organique.

Selon les contextes, la concentration en phosphates est exprimée en mg/L de PO_4 ou de P_2O_5 . Les équivalences sont les suivantes :

$$1 \text{ mg/L } \text{PO}_4 = 0,747 \text{ mg/L } \text{P}_2\text{O}_5 = 0,326 \text{ mg/L } \text{P} \quad (\text{Rodier, 2005}).$$

5.2.9. Les sulfates

La concentration des ions sulfate dans les eaux naturelles peut varier considérablement. Dans des terrains dépourvus d'une quantité significative de sulfates minéraux, cette concentration peut atteindre entre 30 et 50 mg/L.

Toutefois, dans des régions riches en gypse ou lorsque les eaux ont un long temps de contact avec la roche, elle peut largement dépasser ces valeurs et atteindre jusqu'à 300 mg/L. La teneur en sulfates est intrinsèquement liée à la présence d'éléments alcalins et alcalino-terreux dans la minéralisation.

La présence des sulfates dans l'eau découle souvent de rejets industriels provenant d'ateliers de blanchiment (laines, soies, etc.), d'usines de production de cellulose (e.g. pâte à papier) ou encore d'unités de déchloration.

Par ailleurs, les sulfites sont utilisés pour leurs propriétés réductrices dans les eaux de chaudière, afin de prévenir la corrosion due à l'oxygène dissous. L'injection des sulfites dans le circuit se fait généralement en continu à une concentration autour de 20 mg/L.

Cependant, un excès d'ions sulfites dans ces eaux peut entraîner des conséquences néfastes : une diminution du pH qui favorise la corrosion. Lorsqu'ils sont rejetés dans l'environnement, les sulfites se combinent à l'oxygène pour former des sulfates (**RODIER, 2005**).

5.3. Paramètres Bactériologiques

Les bactéries sont omniprésentes dans la nature, probablement en raison de leur statut d'organismes vivants les plus anciens sur terre, comme en témoignent les archéobactéries. Seulement quelques dizaines d'espèces sont adaptées à l'organisme humain. Parmi elles, la majorité est inoffensive, voire bénéfique : elles sont commensales et participent aux flores cutanée, digestive, buccale et génitale.

Certaines bactéries sont pathogènes opportunistes tandis qu'une minorité est régulièrement pathogène (**RODIER, 2005**). Étant donné leur rôle essentiel dans divers processus, il s'avère pertinent d'étudier certaines bactéries fréquemment rencontrées.

5.3.1. Les coliformes

Le terme « *coliformes* » désigne un ensemble d'espèces bactériennes appartenant principalement à la famille des Enterobacteriaceae.

La définition adoptée par l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) est la suivante : Bacille à Gram négatif, non sporulé, oxydase négative, anaérobie facultatif, capable de croître en présence de sels biliaires ou d'autres agents de surface ayant des activités inhibitrices similaires. Ce bacille peut fermenter le lactose (et le mannitol) avec production d'acide et d'aldéhyde en 48 heures, à une température comprise entre 35 et 37 °C (**REJSEK, 2002**).

5.3.2. Les streptocoques fécaux et Enterococcus

Sous le terme général de "streptocoques fécaux", on regroupe l'ensemble des streptocoques possédant l'acide teichoïque, une substance antigénique caractéristique du groupe D de Lancefield. Ce groupe inclut principalement Enterococcus faecalis, E. faecium, E. durans, E. hirae, ainsi que Streptococcus bovis, S. suis et S. equinus. Les streptocoques appartenant au groupe D sont généralement considérés dans leur ensemble comme des indicateurs de pollution d'origine fécale, étant donné qu'ils partagent tous un habitat fécal.

5.3.3. Les bactéries sulfato-réductrices

Les Clostridium sulfato-réducteurs sont couramment considérés comme des indicateurs de pollution d'origine fécale. Leur forme sporulée, nettement plus résistante que les formes végétatives des coliformes fécaux et des streptocoques fécaux, joue un rôle majeur dans la détection de pollutions fécales anciennes ou intermittentes. Même si l'utilité réelle de cette indication temporelle concernant l'antériorité de la pollution peut être débattue, il est important de noter que, bien que les Clostridium sulfato-réducteurs soient parfois associés aux germes fécaux, ils sont également présents naturellement dans les sols.

Ainsi, il n'est pas possible d'attribuer une origine spécifiquement fécale à leur mise en évidence. Dans ce contexte, il serait préférable de concentrer les recherches sur les espèces de Clostridium ayant une probabilité plus élevée d'être d'origine fécale, comme c'est notamment le cas de Clostridium perfringens (**Rodier, 2005**).

6. Impact de la pollution de l'eau sur l'environnement et la santé humaine

L'assainissement doit impérativement répondre aux exigences liées à la santé publique et à la préservation des milieux naturels où sont déversées les eaux usées. Pourtant, l'absence de traitement adéquat des eaux usées a été à l'origine de certaines épidémies au cours des siècles passés. Le rejet non contrôlé de ces eaux peut engendrer des effets nocifs sur l'écosystème récepteur, affectant non seulement les organismes qui y vivent, mais aussi les activités humaines qui en dépendent, ainsi que la santé des populations (*Franck, 2002*).

6.1. Les impacts sur l'environnement

L'impact des eaux usées sur l'environnement se traduit principalement par le phénomène d'eutrophisation. Ce terme désigne l'enrichissement excessif de l'eau en nutriments, notamment en composés d'azote et/ou de phosphore, entraînant une prolifération rapide d'algues et de végétaux supérieurs. Cela engendre un déséquilibre écologique parmi les organismes aquatiques et détériore la qualité de l'eau concernée (*Ramade, 2000*).

Les rejets d'eaux usées dans les milieux naturels ou marins entraînent régulièrement la prolifération d'algues toxiques. L'eutrophisation engendre principalement une réduction de la biodiversité et une détérioration de la qualité de l'eau, ce qui peut avoir des conséquences négatives sur les activités touristiques. Par ailleurs, les variations de température et de pH perturbent le développement normal de la faune et de la flore. Le rejet de matière organique provoque une consommation excessive d'oxygène par les micro-organismes et les poissons, tandis que les matières en suspension obstruent les branchies des poissons, aggravant leur condition (*Ramade, 1998*).

6.2. Les impacts sur la santé humaine

La majorité des micro-organismes pathogènes présents dans la nature peuvent être transmis soit directement par l'eau, soit de manière indirecte. Ces maladies se divisent généralement en deux catégories en fonction de leur origine.

6.2.1. Les maladies d'origine bactérienne

❖ **Les fièvres typhoïdes et paratyphoïdes** : Causées par des salmonelles telles que : *Salmonella typhi*, *Salmonella para-typhi* A, B, et C. Elles se manifestent par une fièvre accompagnée de céphalées, de diarrhées, de douleurs abdominales et d'un profond état de fatigue (*Roland, 2010*).

❖ **La gastro-entérite aiguë et les diarrhées** : Elles sont provoquées par l'*Escherichia coli* qui est une bactérie saprophyte du tube digestif humain et animal. Dès les premières heures de la vie, elle colonise ce milieu et se multiplie en milliards dans la matière fécale. En raison de son abondance extrême et de sa résistance dans l'eau, l'*E. coli* est utilisée comme indicateur biologique pour détecter la contamination fécale des eaux (*Roland, 2010*).

6.2.2. Les maladies d'origine parasitaires

➤ La dysenterie amibienne est une infection provoquée par le parasite *Entamoeba histolytica*.

➤ Les crampes abdominales, nausées et diarrhées causées par *Giardia Lamblia*.

➤ L'hépatite A, également appelée hépatite infectieuse, est causée par un virus appartenant à la famille des Picornaviridae (*Roland, 2010*).

V. CONCLUSION

Les eaux usées, issues des activités domestiques et industrielles, proviennent de multiples usages humains tels que la consommation d'eau, les processus industriels, l'assainissement et la gestion des déchets.

Ce chapitre introductif met en avant la nécessité cruciale d'une gestion et d'un traitement adaptés des eaux usées afin de protéger l'environnement et la santé publique. Un traitement efficace permet de limiter la pollution des écosystèmes aquatiques, de prévenir la propagation de maladies et de garantir une utilisation durable des ressources en eau. La mise en place de systèmes performants de gestion repose sur l'identification des différentes sources de pollution, l'adoption de technologies de traitement appropriées et le respect des cadres réglementaires en vigueur.

L'objectif est d'assurer une gestion durable et responsable des eaux usées tout en minimisant leur impact sur les milieux naturels.

En conclusion, ce chapitre insiste sur l'importance d'une approche globale et proactive dans le traitement des eaux usées, prenant en considération leurs implications environnementales, sociétales et économiques.

Chapitre II :

Procédés D'épuration des eaux usées

Deuxième Chapitre : **PROCEDES D'EPURATION DES EAUX USEES**

I. INTRODUCTION

Les eaux usées polluées, représentent un danger tant pour l'environnement que pour la santé humaine. Afin de limiter cette pollution, il est essentiel de les traiter avant leur rejet ou leur réutilisation, notamment dans des domaines comme l'irrigation.

Le processus d'épuration des eaux usées se divise en plusieurs étapes : le prétraitement, qui inclut le dégrillage, le dessablage et le déshuilage ; le traitement primaire, axé sur la décantation primaire ; et le traitement secondaire, reposant sur des procédés biologiques (*Toubal, M.2024*).

II. L'EPURATION DES EAUX USEES

La collecte et le traitement des eaux usées ont évolué en parallèle avec les modes de vie des sociétés et les avancées scientifiques au cours de l'histoire. Historiquement, la croissance démographique et l'expansion urbaine ont rendu indispensable l'accès à une eau de qualité pour la population.

La protection de la santé publique a ainsi motivé de nombreux efforts, notamment à travers la dépollution des eaux usées, mise en œuvre depuis plusieurs générations. Sur le plan scientifique, la prise de conscience des enjeux sanitaires et la compréhension des origines de grandes épidémies telles que le choléra, la peste ou le typhus ont conduit à la mise en place d'infrastructures et au développement progressif de procédés de traitement toujours plus performants, visant à éliminer ces menaces (*Le Byaric, 2009*).

1. Les étapes de traitements des eaux usées

1.1. Prétraitements physiques

1.1.1. Dégrillage

Ce processus consiste à faire transiter les eaux usées à travers une grille dont les barreaux, espacés de manière variable, capturent les éléments les plus volumineux. Une fois les grilles nettoyées à l'aide de moyens mécaniques, manuels ou automatiques, les déchets extraits sont ensuite éliminés avec les ordures ménagères.

Les grilles sont généralement inclinées entre 60 et 80° par rapport à l'horizontale, bien qu'elles puissent également être placées verticalement (*Toubal, M.,2024*).



Fig. II.1 : Dégrilleur (Toubal, M.,2024)

1.1.2. Dessablage

Le dessablage consiste à éliminer les sables présents dans les eaux usées afin de prévenir leur accumulation ultérieure.

Cette opération se réalise dans un bassin spécifique appelé "dessableur", où l'eau s'écoule à une vitesse réduite, favorisant ainsi la décantation des sables au fond de la structure. Ces particules, une fois déposées, sont aspirées à l'aide d'une pompe. Les sables récupérés subissent ensuite un essorage et un lavage avant d'être soit acheminés vers une décharge, soit réutilisés selon les besoins.

Cette méthode de traitement s'applique principalement aux particules minérales dont le diamètre dépasse environ 0,2 mm (Toubal, M.,2024).

1.1.3. Dégraissage - Déshuilage

Le dégraissage et déshuilage consistent à retirer les graisses et huiles présentes dans les eaux usées, car celles-ci peuvent nuire à l'efficacité des traitements biologiques ultérieurs.

Cette opération s'effectue par un procédé de flottation. L'injection d'air au niveau du fond de l'installation provoque la remontée des matières grasses à la surface. Ces graisses et huiles sont ensuite raclées, puis stockées temporairement avant d'être éliminées, soit par mise en décharge, soit par incinération (Toubal, M.,2024).



Fig. II.2 : Dessableur-Déshuileur (Toubal, M.,2024)

1.2. Traitement primaire

Le traitement primaire, qui peut être facultatif selon la filière de traitement choisie, consiste en une séparation physique des phases liquide et solide par décantation. Ce processus cible spécifiquement les matières en suspension (MES) présentes dans les eaux usées. Pour éliminer les colloïdes de manière complémentaire, un traitement physico-chimique est mis en œuvre, utilisant un processus de coagulation-floculation avant une séparation liquide-solide par décantation ou flottation (*Le Byaric, 2009*).

Au cours de cette phase, une part significative de la pollution totale est retirée, avec une réduction des matières en suspension pouvant atteindre 90 % et une diminution d'environ 35 % de la demande biochimique en oxygène (DBO) (*Cardot, 2010*).

1.2.1. La décantation (processus physique)

La décantation consiste à séparer l'eau des flocons dans un décanteur. Les flocons, appelés boues, sont ensuite acheminés à l'aide de pompes soit vers un épaisseur, où ils subissent une pré-déshydratation tout en servant également de zone de stockage, soit vers un processus de floculation afin de maintenir une concentration adéquate en boues (*Generet et al., 2005*).



Fig. II.3 : Décanteur primaire (Toubal, M.,2024)

1.2.2. La flottation (processus physique)

La flottation est une méthode de séparation solide-liquide ou liquide-liquide destinée aux particules dont la densité réelle ou apparente (en cas de flottation assistée) est inférieure à celle du liquide dans lequel elles se trouvent. Cependant, cette technique présente des inconvénients majeurs, notamment des coûts d'exploitation élevés en raison d'une consommation énergétique importante. Par conséquent, elle est principalement utilisée dans les grandes stations (*Amorce, 2012*).

1.2.3. La décantation associée à l'utilisation d'un coagulant-floculant (voie physico-chimique)

L'objectif ici est de favoriser l'agrégation des molécules en suspension à l'aide de la technique de coagulation-floculation, afin de faciliter la sédimentation en formant des floes de plus grande taille.

La coagulation consiste à neutraliser la charge électrique des particules colloïdales présentes dans l'effluent à traiter, en utilisant des réactifs minéraux multivalents tels que les sels de fer et d'aluminium. Quant au processus de floculation, il repose sur l'ajout d'un polymère qui regroupe les matières colloïdales en une structure rigide, permettant une décantation aisée sous forme de floes (*Deshayes, 2007*).

1.3. Traitement secondaire (traitement biologique)

Dans la plupart des cas, la suppression des pollutions carbonées et azotées repose sur des procédés biologiques. Ces procédés exploitent la croissance de micro-organismes qui se nourrissent des matières organiques dites biodégradables, servant ainsi de source d'alimentation pour leur développement (*Toubal, M., 2024*).

1.3.1. Le traitement secondaire anaérobie

Le traitement secondaire anaérobie repose sur un processus microbiologique visant à transformer la matière organique. Ce procédé fait principalement appel à des communautés bactériennes (Bacteria et Archaea), ainsi qu'à des protozoaires et, dans une moindre mesure, à certains champignons anaérobies (*Effebi, 2009*).

1.3.2. Le traitement secondaire aérobie

Les bactéries employées nécessitent un apport constant en oxygène. On peut distinguer deux grandes catégories : les procédés à cultures fixées, où les micro-organismes sont attachés à des supports, et les procédés à culture libre, où les micro-organismes restent en suspension dans le mélange à traiter. Parmi les méthodes les plus répandues, on peut mentionner les suivantes (*Degrémont, 2005*) :

☞ **Boues activées (les cultures libres)**

Ce procédé est actuellement le plus couramment utilisé pour le traitement des eaux résiduaires urbaines, qu'il s'agisse de petites, moyennes ou grandes collectivités.

Le traitement par boues activées repose sur un système en continu où des micro-organismes sont mis en contact avec des eaux usées contenant des matières biodégradables pendant une durée suffisante. Ces amas biologiques sont maintenus en mouvement au sein de l'eau afin d'assurer une interaction optimale avec l'ensemble de

l'effluent. Une oxygénation adéquate est assurée grâce à des aérateurs (*Gomella et Guerree, 1982*).

Ainsi, dans le bassin d'aération, en présence d'oxygène, les micro-organismes se développent et se reproduisent en consommant les matières biodégradables. Ils forment des flocons décantables qui sont ensuite dirigés vers un clarificateur. À la sortie, on obtient une eau traitée ainsi que des boues. Une partie de ces boues est envoyée vers les dispositifs spécifiques de traitement, tandis que l'autre partie est réintroduite dans l'aérateur pour poursuivre le processus (*Urios, 2005*).



Fig. II.4 : Bassin d'aération (Toubal, M.,2024)

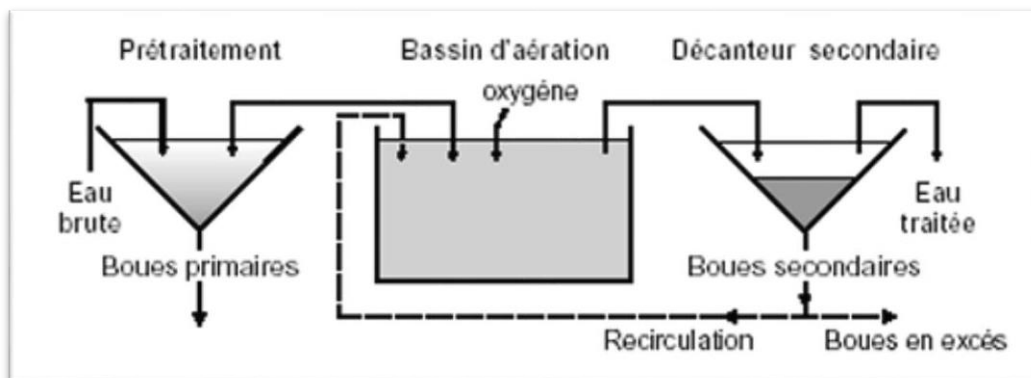


Fig. II.5 : Schéma d'une Station d'épuration à boues activées.

☞ *Les traitements par lits bactériens (Cultures fixes)*

Un lit bactérien se structure comme une colonne circulaire pouvant atteindre 4 à 5 mètres de hauteur, contenant un matériau poreux. Les eaux à traiter ruissellent à la surface de la pellicule biologique qui se développe sur le support, laquelle renferme une forte concentration de bactéries et de champignons.

Ces organismes absorbent et métabolisent la matière organique de l'effluent, s'appauvrissant progressivement au fil de leur trajet (*Monchy, 1978*).

L'utilisation de ce procédé peut mener à des résultats notables tels que : DBO₅ inférieur à 35 mg/L, DCO inférieur à 125 mg/L, et MES inférieur à 30 mg/L.

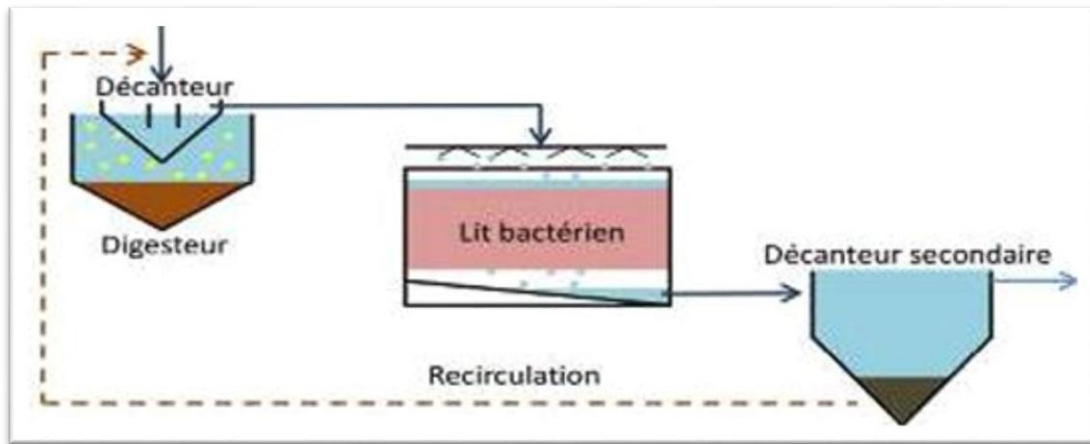


Fig. II.6 : Schéma simplifié du système à lit bactérien (Pasquini, 2013).

1.3.3. Les traitements par les disques biologiques

Les eaux usées, après une phase de décantation préalable, sont dirigées vers un dispositif équipé de disques en rotation lente, montés sur un axe. Ces disques, fabriqués en plastique, permettent le développement d'un film bactérien. Lorsqu'ils émergent de l'eau, les bactéries présentes sur ce film captent l'oxygène nécessaire à leur respiration. Lors de l'immersion, elles absorbent les substances polluantes dissoutes dans l'eau, dont elles se nourrissent.

Une fois que le film biologique atteint une épaisseur supérieure à quelques millimètres, il se détache naturellement et est conduit vers un décanteur final. Là, il est séparé de l'eau épurée. Les boues retenues sont ensuite évacuées à intervalles réguliers par pompage et acheminées vers le dispositif initial pour y être stockées et digérées (Toubal, M.,2024).



Fig. II.7 : Disque biologique (Toubal, M.,2024).

1.3.4. Traitement biologique extensifs

1.3.4.1. Le lagunage

Un traitement par lagunage intègre généralement trois types de bassins : le bassin anaérobie, le bassin facultatif et le bassin de maturation. Le bassin anaérobie joue un rôle clé en réduisant la charge en matière organique grâce à l'apport d'un effluent très

concentré. Ce processus bénéficie d'une profondeur significative du bassin, typiquement entre 5 et 6 mètres.

Cependant, son usage est limité aux effluents à haute concentration, le plus souvent dans le cadre d'un prétraitement avant une étape aérobie, particulièrement dans les régions à climat chaud où le terrain est accessible à moindre coût. Le lagunage repose sur des mécanismes naturels pour traiter les eaux usées et est largement utilisé dans les petites communes rurales. Cela s'explique par sa simplicité d'installation et une performance d'épuration globalement satisfaisante. En revanche, ces procédés sont moins adaptés aux grandes communes, car ils nécessitent de vastes surfaces de bassins, rendant leur implantation plus complexe (*Bekkari, 2020*).

Le bassin facultatif favorise le développement d'algues photosynthétiques, qui participent à la production d'oxygène indispensable à la croissance des bactéries aérobies. Ce processus peut être ponctuellement renforcé par l'ajout d'aérateurs pour intensifier l'activité biologique et réduire les surfaces requises. On distingue deux types de bassins facultatifs, en fonction des végétaux qu'ils abritent (*Bekkari, 2020*) :

☞ **Les bassins à microphytes**: Ils renferment des algues microscopiques, principalement des algues vertes ou bleues,

☞ **Les bassins à macrophytes**: Ils contiennent des végétaux macroscopiques, qui peuvent être flottants, comme les lentilles d'eau, ou fixés, comme les roseaux.

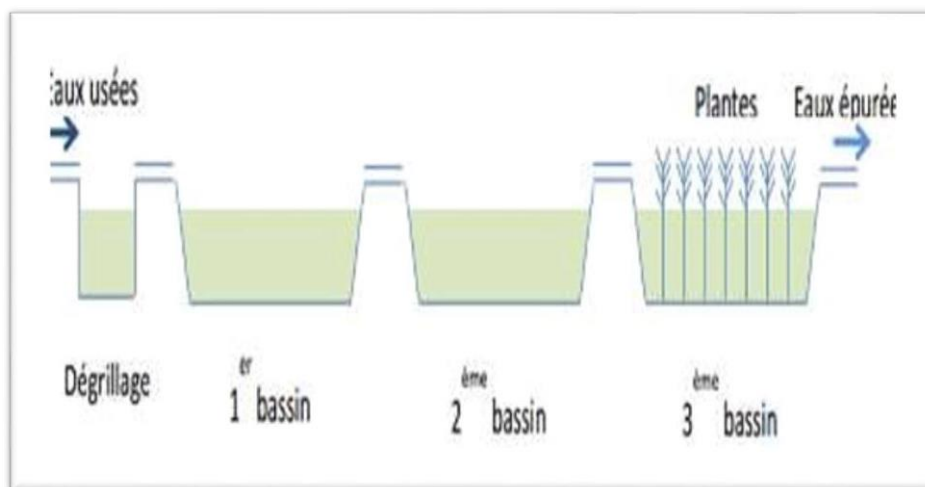


Fig. II.8 : Schéma simplifié d'une station de lagunage naturel (*Pasquini, 2013*).

1.3.4.2. La filtration / Percolation

La filtration, ou percolation, est une méthode de traitement des eaux usées utilisant soit un sol, soit un massif filtrant (*Vasel, 2007*).

Ce processus permet de traiter les effluents à hauteur de plusieurs centaines de litres par mètre carré de massif filtrant et par jour. Deux principaux mécanismes interviennent dans cette opération :

☞ **Filtration des Matières en Suspension (MES)** : La granulométrie du sable joue un rôle clé dans la profondeur de la capture des MES. Un sable plus grossier favorisera une rétention plus profonde des MES, qui finiront toutefois par provoquer un

colmatage du filtre. Pour éviter ce phénomène, il est important d'alterner des phases de filtration avec des phases de séchage. L'élimination des MES entraîne également celle des microorganismes qui leur sont associés.

↻ **Adsorption des bactéries libres par les grains de sable** : Ce mécanisme favorise la formation d'un biofilm contaminé, surtout dans la partie supérieure du massif. Ce biofilm contribue à la dégradation microbienne de la matière organique et des substances dissoutes présentes dans l'effluent (comme PO_4 et NO_3). Cette dégradation consomme de l'oxygène dissous (OD) et produit du dioxyde de carbone (CO_2). Afin d'éviter l'asphyxie du milieu, une aération régulière du filtre est nécessaire.

Les techniques de filtration/percolation permettent d'éliminer les « gros » microorganismes, tels que les protozoaires et les helminthes, via les processus de filtration et d'adsorption dans les premières couches du massif filtrant. L'efficacité de l'élimination des virus et des bactéries dépend pour sa part des propriétés du milieu poreux utilisé.

↻ **La phytoépuration ou filtres plantés de macrophytes** : L'utilisation des plantes aquatiques dans le traitement des eaux usées, également appelée phytoépuration, s'inspire de l'observation des fonctions naturelles des zones humides dans la préservation de la qualité des milieux aquatiques. C'est pourquoi on parle aussi de marais filtrant artificiel. Cette méthode de traitement remonte à environ un siècle. Les marais filtrants artificiels destinés aux eaux usées domestiques, souvent appelés filtres plantés de macrophytes, se composent d'un lit fait de sol ou d'un milieu similaire, comme du gravier ou du sable, dans lequel sont implantés des macrophytes.

Ce dispositif est soit inondé, soit maintenu en état saturé avec un niveau d'eau proche de la surface (*Cors, 2007*). De telles conditions permettent à des plantes adaptées aux sols saturés de s'établir, formant alors un réseau racinaire dense au sein du substrat.

Le traitement des eaux usées repose sur une combinaison de processus physiques, chimiques et biologiques. Ces mécanismes incluent, entre autres, la sédimentation, la précipitation, l'adsorption sur les particules du sol, l'assimilation des contaminants par les plantes et les transformations réalisées par les micro-organismes (*Cors, 2007*).

1.4. Traitement tertiaire

Les traitements tertiaires, également appelés traitements d'affinage, ont pour objectif principal de réduire la pollution azotée et phosphatée ainsi que la contamination bactériologique des eaux usées domestiques. Ces eaux ont déjà été soumises à des traitements primaires et secondaires, qui, bien que nécessaires, s'avèrent insuffisants pour respecter les normes de rejet en vigueur. Ainsi, le recours aux traitements tertiaires devient indispensable pour assurer une meilleure préservation des milieux récepteurs (*Bekkari, 2020*).

1.4.1. Traitement des boues

La diminution du volume est généralement réalisée par des procédés de séparation des phases liquide/solide, tels que la décantation, la filtration ou l'évaporation, utilisés dans les technologies d'épaississement, de déshydratation et de séchage thermique.

Par ailleurs, la réduction peut être obtenue par des processus biologiques, comme la digestion ou le compostage, ou encore par des techniques thermiques, telles que l'incinération à 850°C ou l'oxydation par voie humide appliquée à des boues liquides épaissies sous 45 Bar à une température de 250°C. Ces méthodes permettent de réduire significativement le volume final (*Bekkari, 2020*).

La stabilisation consistera concrètement à ralentir, voire à éliminer, la biodégradation putride de la matière organique contenue dans les boues. Cela pourra être réalisé par différents moyens biologiques, chimiques ou physiques intervenant soit avant la déshydratation, en phase liquide, soit après, en phase pâteuse.

La déshydratation représente généralement l'étape finale du processus de traitement des boues. Une teneur minimale en matière sèche, souvent supérieure à 30%, peut être exigée contractuellement pour permettre l'évacuation des boues ou pour répondre aux conditions nécessaires à leur incinération en auto-combustion. Malgré ces contraintes, l'un des principaux débouchés des boues issues des stations d'épuration reste leur valorisation en agriculture (*Gaid, 1993*).

III. CONCLUSION

Ce chapitre a exploré le cadre des eaux usées et des stations d'épuration. Il a souligné l'importance du traitement des eaux usées, son évolution historique, ainsi que la structure des stations d'épuration traditionnelles.

Les avancées dans les procédés de traitement ont transformé la production d'eaux usées d'une problématique en une ressource alternative. Ainsi, les eaux traitées peuvent désormais être récupérées et réutilisées pour satisfaire les besoins croissants de l'agriculture et de l'industrie.

Chapitre III:
Réutilisation des eaux
traitées dans l'agriculture

Troisième Chapitre : REUTILISATION DES EAUX TRAITEES DANS L'AGRICULTURE

I. INTRODUCTION

L'utilisation d'eaux usées traitées en agriculture est une approche durable face au manque d'eau, qui améliore aussi la qualité des sols et la production agricole.

Cette méthode aide à préserver l'eau douce et encourage une économie circulaire en réutilisant les éléments nutritifs. Cependant, un traitement rigoureux est indispensable pour réduire les risques sanitaires liés aux agents pathogènes et aux polluants. Les points importants de cette pratique sont détaillés ci-dessous.

II. REUTILISATION DES EAUX EPUREES

1. Dans le monde

La réutilisation des eaux usées est courante dans les régions souffrant de pénuries d'eau. Elle est, par exemple, très développée aux États-Unis, au Mexique, dans plusieurs pays d'Amérique du Sud, en Australie, en Afrique du Sud, au Japon, en Chine et dans les pays du Golfe Persique. Le bassin méditerranéen est également une zone où la réutilisation agricole des effluents urbains est largement pratiquée. La Tunisie en est un autre exemple, illustrant une politique nationale de réutilisation (FAO, 2003).

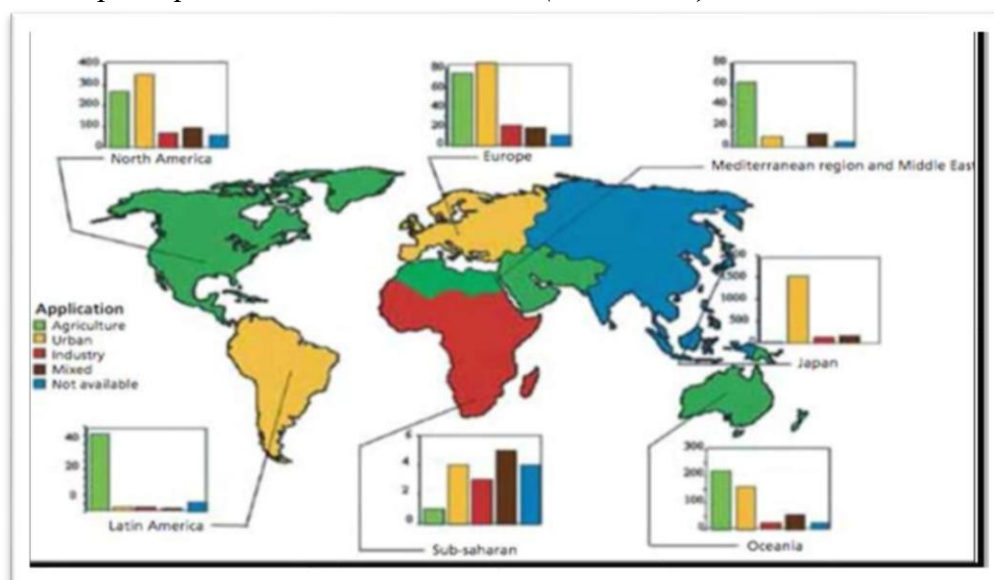


Fig. III.1 : Différents types de la réutilisation de l'eau dans le monde (FAO, 2010).

2. En Algérie

En Algérie, la couverture des services d'assainissement reçoit peu d'attention par rapport à celle des services d'approvisionnement en eau, et l'épuration des eaux usées est encore plus négligée. Bien que le réseau d'assainissement atteigne un taux de couverture d'environ 85 %, seulement 20 % des eaux usées collectées sont effectivement traitées.

Chaque année, les eaux usées représentent un volume estimé à 600 millions de m³, dont environ 550 millions de m³ proviennent des agglomérations de plus de 50 000 habitants (*FAO, 2003*).

3. Les risques liés à la réutilisation agricole des eaux épurées

Le rapport entre les eaux usées traitées et le risque sanitaire est crucial, concernant les contaminations possibles par un contact direct avec ces eaux ou par l'ingestion d'aliments exposés aux eaux usées traitées.

Ces risques de contamination sont à la fois bactériologiques et chimiques. Les dangers associés à la réutilisation des eaux usées en agriculture comprennent : le risque microbiologique, le risque chimique, et le risque environnemental (*FAO, 2003*).

3.1. Le risque microbiologique

En agriculture, il est établi depuis longtemps que les microorganismes pathogènes des animaux ne peuvent ni pénétrer ni survivre à l'intérieur des plantes. Ainsi, ces microorganismes se retrouvent sur la surface des plantes et dans le sol.

Les feuilles et les plantes génèrent un environnement frais et humide en raison de l'évaporation, tout en étant protégées du soleil. Cela peut entraîner une contamination durant la croissance des plantes ou lors de la récolte. Les pathogènes survivent plus longtemps dans le sol que sur les plantes, selon la *FAO (2003)*.

3.2. Le risque chimique

En plus de l'impact général de certains composants des eaux usées sur les cultures irriguées, tels que la salinité, ces eaux peuvent également engendrer une toxicité en raison de concentrations élevées d'éléments comme le bore et certains métaux lourds (*FAO, 2003*).

3.3. Le risque environnemental

Il est important de noter que l'emploi d'eau usée traitée pour l'irrigation peut présenter des risques pour l'environnement et la santé humaine. Parmi les principaux dangers environnementaux liés à l'utilisation de cette eau, on trouve :

↻ L'introduction de produits chimiques dans des écosystèmes sensibles tels que le sol, l'eau et les plantes,

↻ La diffusion de micro-organismes pathogènes (*FAO, 2003*).

↻ **Toxicité pour les cultures** : des concentrations élevées de bore, de sodium, de chlorures et de certains métaux lourds peuvent avoir des effets néfastes sur les plantes [2].

↻ **Excès d'azote** : un apport excessif d'azote peut perturber l'équilibre nutritionnel des sols et dégrader la qualité des eaux souterraines [2].

↻ **Impact sur les ressources en eau** : une utilisation non régulée des eaux usées traitées peut compromettre les ressources en eau douce.

4. Les effets sur le sol

Ces impacts sont importants pour les agriculteurs puisqu'ils peuvent réduire la productivité, la fertilité et le rendement de leurs terres. Le sol doit garder sa fertilité chimique et physique, afin de permettre une utilisation durable à long terme et une agriculture rentable.

Les problèmes prévus au niveau du sol sont :

- ✓ La salinisation,
- ✓ L'alcalinité et la réduction de la perméabilité du sol,
- ✓ L'accumulation d'éléments potentiellement toxiques,
- ✓ L'accumulation de nutriments (*FAO, 2003*).

5. Avantage des eaux usées traitées en agriculture

↻ **Lutte contre la pénurie d'eau** : Les eaux traitées constituent une source d'eau alternative précieuse, en particulier dans les régions arides ou sujettes à la sécheresse, contribuant ainsi à assurer la sécurité hydrique (*FAO, 2003*).

↻ **Fertilisation naturelle** : grâce à leur richesse en éléments nutritifs essentiels (azote, phosphore, potassium), ces eaux réduisent la dépendance aux engrais chimiques favorisant une agriculture plus durable et respectueuse de l'environnement [3].

↻ **Amélioration de la production agricole** : l'apport régulier d'eau et de nutriments via l'irrigation avec des eaux usées traitées peut stimuler la croissance des cultures et augmenter les rendements, contribuant ainsi à la sécurité alimentaire [3].

↻ **Préservation des ressources en eau douce** : en utilisant des eaux usées traitées, on réduit la pression exercée sur les sources d'eau douce traditionnelles (rivières, nappes phréatiques), préservant ainsi ces ressources vitales pour les générations futures.

6. Spécification des eaux usées épurées utilisées à des fins d'irrigation

Tableau. III.1 : Les paramètres microbiologiques (*Journal officiel N°41, Juillet 2012*)

Groupe Des Cultures	Paramètres Microbiologiques	
	Coliformes fécaux (CFU/100ml) (moyenne géométrique)	Nématodes intestinaux (ufs/1) (moyenne arithmétique)
Irrigation non restrictive. Culture de produits pouvant être consommés crus.	< 100	Absence
Légumes qui ne sont consommés que cuits. Légumes destinés à la conserverie ou à la transformation non alimentaire	< 250	< 0.1
Arbres fruitiers (1). Cultures et arbustes fourragers (2). Cultures céréalières. Cultures industrielles (3). Arbres forestiers. Plantes florales et ornementales (4).	Seuil recommandé < 1000	< 1
Cultures du groupe précédent (CFU/100ml) utilisant l'irrigation localisée (5) (6).	Pas de norme recommandée	Pas de norme recommandée

- L'irrigation doit s'arrêter deux semaines avant la récolte. Les fruits tombés ne doivent pas être récupérés du sol. L'utilisation de l'irrigation par aspersion est déconseillée.
- Le pâturage direct est interdit, et il est conseillé d'arrêter l'irrigation au moins une semaine avant la récolte.
- Pour les cultures industrielles et les arbres forestiers, des règles plus souples peuvent être appliquées.
- Une directive plus stricte (< 200 coliformes fécaux par 100 ml) est recommandée pour l'irrigation des parcs et espaces verts accessibles au public, tels que les pelouses d'hôtels.
- Une technique d'irrigation qui réduit le mouillage des fruits et légumes est exigée. À condition que les travailleurs agricoles et la population environnante maîtrisent la gestion de l'irrigation localisée et respectent les règles d'hygiène requises. Absence de population environnante (*FAO, 2003*).

7. Les cultures autorisées pour l'irrigation par les eaux usées épurées

7.1. Liste des cultures autorisées

Une autre réglementation a été mise en place, à savoir l'arrêté interministériel du 8 Safar 1433, correspondant au 2 Janvier 2012, qui a établi la liste des cultures pouvant être irriguées avec des eaux usées traitées (tableau. III.2).

Ce texte a été promulgué par les ministres chargés des ressources en eau, de l'agriculture et de la santé. Les parcelles destinées à être irriguées avec des eaux usées traitées ne doivent pas porter une culture autre que celles énumérées dans la liste spécifiée (*FAO, 2003*).

Tableau. III.2 : Liste des cultures pouvant être irriguées avec des eaux usées épurées (*Hannachi et al, 2014*).

Groupes de cultures pouvant être irriguées avec des eaux usées épurées	Liste des cultures
Arbres fruitiers (*)	Dattiers, Vigne, Pomme, Pêche, Poire, Abricot, Nêfle, Cerise, Prune, Nectarine, Grenade, Figue, Rhubarbe, Arachides, Noix, Olive.
Agrumes	Pamplemousse, Citron, Orange, Mandarine, Tangerine, Lime, Clémentine.
Cultures fourragères (**)	Bersim, Mais, Sorgho Fourragers, Vesce et Luzerne.
Cultures industrielles	Tomate industrielle, Haricot à rames, petit pois à rames, Betterave sucrière, Coton, Tabac, Lin.
Cultures céréalières	Blé, Orge, Triticale et Avoine.
Cultures de production de semences	Pomme de terre, Haricot et petit pois.
Arbustes fourragers	Acacia et Triplex

☞ L'irrigation avec des eaux usées traitées est autorisée à condition d'arrêter l'irrigation au moins deux semaines avant la récolte. Les fruits tombés au sol ne doivent pas être ramassés et doivent être détruits.

☞ Le pâturage direct dans les parcelles irriguées avec ces eaux est strictement interdit pour prévenir toute contamination du bétail et, par conséquent, des consommateurs (*FAO, 2003*).

8. Le sol

Le sol constitue la base de la vie sur terre. Il est le fruit de la transformation de la couche supérieure de la roche-mère, ou croûte terrestre, qui subit une dégradation et s'enrichit en matière organique grâce aux processus vivants. En dehors des milieux marins et des eaux douces, le sol sert à la fois de support et de résultat des activités vivantes. Il agit comme une interface entre la biosphère et la lithosphère.

La partie du sol particulièrement riche en matière organique est appelée humus (FAO, 2003).



Fig. III.2 : Le sol [4]

8.1. Type de sol

8.1.1. Types de sol selon leur composition

La classification des types de sols selon leur composition joue un rôle crucial en agriculture. Elle permet de développer des stratégies de culture adaptées, d'adopter des pratiques agricoles efficaces et de sélectionner les meilleures méthodes en matière d'irrigation, d'amendement et de fertilisation [4].

On distingue quatre types de sols parmi les plus couramment rencontrés en agriculture: les sols sableux, limoneux, argileux et humifères [4].

8.1.1.1. Sol sableux

Les sols sableux offrent plusieurs atouts : ils se réchauffent rapidement après l'hiver, ce qui les rend propices aux plantations précoces. Grâce à la taille relativement grande de leurs particules, ils sont moins sensibles à l'érosion, et leur texture légère facilite le travail du sol.

Toutefois, leur forte perméabilité entraîne une infiltration rapide de l'eau vers les couches profondes, emportant les nutriments essentiels. De plus, ces sols présentent souvent un pH acide, ce qui peut limiter la disponibilité des éléments nutritifs et l'humidité nécessaire au bon développement des cultures [4].

a/ Cultures adaptées aux sols sableux

Certaines plantes cultivées à des fins commerciales s'épanouissent particulièrement bien dans les sols sableux, notamment : le chou vert, les tomates, les melons, les courges, les fraises, la betterave sucrière, la laitue et les poivrons.

Avec une irrigation adéquate, des cultures comme le maïs, le millet et l'orge peuvent également bien s'y développer.

Les légumes-racines tels que les pommes de terre, les panais et les carottes trouvent aussi un environnement favorable dans ce type de sol.

Par ailleurs, les arbustes et bulbes comme les tulipes, la mauve royale, les hélianthèmes et les hibiscus s'y prêtent bien, tout comme certaines herbes issues des climats méditerranéens, telles que l'origan, le romarin et la lavande [4].

b/ Cultures moins adaptées aux sols sableux

Les sols sableux conviennent moins bien à certaines espèces, notamment les Brassicacées comme le brocoli et le chou, ainsi qu'aux légumineuses telles que les pois et les haricots [4].

8.1.1.2. Sol limoneux

Le sol limoneux se compose de particules dont les caractéristiques physiques se situent entre celles du sable et de l'argile. Grâce à sa texture fine, il retient davantage l'eau que les sols sableux, tout en restant bien aéré. Riche en nutriments, le limon est naturellement fertile, ce qui en fait un milieu favorable à la plupart des cultures, à condition que le drainage soit bien maîtrisé [4].

Lorsqu'il est suffisamment humide, ce sol est souple et soyeux, ce qui facilite sa culture. Toutefois, il a tendance à se compacter facilement en période sèche, ce qui peut compliquer le travail du sol et limiter l'aération des racines [4].

a/ Cultures adaptées aux sols limoneux

- ✓ La majorité des légumes,
- ✓ Les plantes grimpantes,
- ✓ Les plantes vivaces,
- ✓ Les graminées,
- ✓ Les arbustes,
- ✓ Les arbres tels que les saules, les bouleaux et les cornouillers [4].

b/ Cultures moins adaptées aux sols limoneux

- ✓ Les légumes-racines comme les panais et les carottes,
- ✓ Les plantes désertiques ou autres espèces nécessitant un drainage rapide [4].

8.1.1.3. Sol argileux

Les sols argileux se caractérisent par une structure dense et compacte due à leur forte teneur en argile, ce qui leur permet de retenir efficacement l'humidité. Cette capacité d'absorption en fait un environnement favorable aux plantes ayant besoin d'un sol constamment humide.

De plus, leur richesse en nutriments soutient la croissance d'un grand nombre de cultures. Toutefois, ces sols sont souvent alcalins, ce qui peut limiter la disponibilité de certains éléments nutritifs essentiels à une croissance optimale et à un bon rendement [4].

Un autre inconvénient est leur lenteur à se réchauffer, ce qui rend difficile la mise en culture au début du printemps. Par ailleurs, ils sont exigeants à travailler : en hiver, ils deviennent collants et saturés d'eau, tandis qu'en été, ils se dessèchent et forment des blocs durs [4].

a/ Cultures adaptées aux sols argileux

- ✓ Légumes : brocolis, choux-fleurs, choux frisés, pois, pommes de terre, choux et choux de Bruxelles,
- ✓ Cultures à feuilles,
- ✓ Arbres fruitiers,
- ✓ Plantes vivaces,
- ✓ Plantes ornementales,
- ✓ Arbustes tels que l'aster, l'héliénie d'automne et le cognassier du Japon [4].

b/ Cultures moins adaptées aux sols argileux

- ✓ Légumes-racines comme les panais et les carottes,
- ✓ Baies délicates,
- ✓ Plantes désertiques et autres espèces nécessitant un drainage rapide [4].

8.1.1.4. Sol humifère

Le sol humifère se distingue par sa structure spongieuse et sa résistance au compactage, ce qui lui permet de bien retenir l'eau tout en se réchauffant rapidement. Sa porosité assure une bonne aération, favorisant la respiration des racines. Ce type de sol est également exempt de pathogènes, ce qui en fait un excellent milieu pour le démarrage des semences, notamment en raison de la faible présence de bactéries nuisibles [4].

Toutefois, le sol humifère présente une acidité naturelle qui peut restreindre la disponibilité de certains nutriments essentiels. Pour assurer une croissance végétale optimale, il est souvent nécessaire de compléter ce sol avec des apports d'engrais adaptés [4].

Son principal inconvénient réside dans son caractère non renouvelable. La dégradation ou la disparition progressive des terres humifères contribue aux émissions de gaz à effet de serre, accentuant ainsi le changement climatique [4].

a/ Cultures adaptées aux sols humifères

- ✓ Brassicacées,
- ✓ Légumineuses,
- ✓ Salades vertes,
- ✓ Plantes à racines,
- ✓ Myrtilles et autres baies acidophiles,
- ✓ Arbustes tels que l'hamamélis, les rhododendrons, les arbres à lanternes et la bruyère [4].

b/ Cultures moins adaptées aux sols humifères

- ✓ Poivrons,
- ✓ Tomates [4].



Fig. III.3 : Différents types de sol [4].

8.1.2. Types de sols pour une croissance optimale des cultures

Comprendre les différents types de sols est essentiel en agriculture, car cela influence directement la réussite des cultures.

On distingue généralement quatre grands types de sols, chacun possédant des caractéristiques physiques et chimiques propres. Certains sont naturellement plus fertiles et adaptés à la culture, mais tous peuvent être améliorés par des amendements spécifiques pour optimiser leur potentiel [4].

Les sols agricoles évoluent constamment, d'où la nécessité d'un suivi régulier. Dans ce contexte, les technologies satellitaires jouent un rôle clé : elles permettent d'identifier rapidement les zones nécessitant une intervention, tout en assurant une surveillance continue de leur évolution [4].

Grâce à leur capacité à fournir des données précises sur la composition et l'état des sols, ces technologies facilitent une gestion raisonnée et efficace des ressources naturelles. Elles permettent également de planifier des actions ciblées pour préserver la santé et la productivité des terres agricoles [4].

Tableau. III.3 : Caractéristiques principales des composants des types de sol [4].

Critères	Argile	Limon	Sable
Taille des particules (mm)	< 0.002	0.002 – 0.05	0.05 - 2
Facilité de labour	Difficile	Facile mais plus exigeant en cas de dessèchement	Très facile
Richesse en nutriments	Elevée	Moyenne	Faible
Vitesse de dessèchement	Lente avec formation de fissures	Modérée, également sujette à la fissuration	Rapide
Réchauffement au printemps	Lent	Rapide	Rapide
Capacité de rétention d'eau	Très élevée (prolongée)	Modérée, mais suffisante lors du dessèchement	Faible
Taux d'absorption (pouces/heure)	0.1	0.3	0.6
Capacité de rétention du champ (%)	36	26	10

8.2. Propriétés physiques et chimiques du sol

8.2.1. La texture

La texture du sol est déterminée par les proportions relatives des particules de différentes tailles. Elle peut être évaluée sur le terrain ou déduite à travers une analyse granulométrique, qui permet de déterminer précisément les caractéristiques des particules classées selon leurs dimensions. Comprendre la texture du sol aide à identifier ses tendances en termes de propriétés physiques.

Par exemple, les sols riches en sable sont généralement perméables et filtrants, surtout si le sable est grossier.

➤ Lorsque des particules grossières sont accompagnées d'une grande quantité de sable fin et de limon, ces derniers peuvent obstruer les espaces entre les particules grossières, rendant le sol plus ou moins imperméable,

➤ Si des proportions significatives d'argile sont mélangées avec le limon et le sable, particulièrement en présence d'humus, une structure fragmentaire peut se former. Ce phénomène assure à la fois la perméabilité du sol tout en retenant suffisamment d'eau pour la végétation (*FAO, 2003*).

8.2.1.1. Evaluation de la texture

Sur le terrain, l'évaluation tactile des sols est réalisable directement, bien qu'elle nécessite un peu d'expérience. Quelques critères tactiles permettent de classer les sols en grandes catégories : argileux, limoneux ou sableux. Les sables procurent une sensation de rugosité sous les doigts à partir de 0,1 mm.

Les sols riches en limons offrent une sensation d'onctuosité au toucher. Les argiles, quant à elles, se pétrissent en pâtons qui ne se désagrègent pas dans la main (FAO, 2003).

8.2.2. La structure

La structure du sol est caractérisée par la manière dont les éléments solides s'assemblent. Elle résulte de la cimentation des grains plus grossiers, comme le limon et le sable, par des éléments colloïdaux tels que l'argile et l'humus, qui forment des complexes argilo-humiques. Cette structure est dynamique et sujette à des changements au fil du temps, sous l'effet de divers facteurs, qu'ils soient bénéfiques ou nuisibles (Gobat et al. 2010).

III. LES TECHNIQUES D'IRRIGATION

1. L'irrigation gravitaire

1.1. Types d'irrigation gravitaire

Dans le domaine de l'irrigation gravitaire, on distingue plusieurs méthodes, parmi lesquelles trois sont particulièrement renommées : l'irrigation à la raie, l'irrigation par planche et l'irrigation par bassin. Quant à l'irrigation à la raie, elle se subdivise en quatre types principaux (FAO, 2003):



Fig. III.4 : Système d'irrigation gravitaire [5].

1.1.1. Irrigation par planche / Irrigation par ruissellement

La méthode implique de faire couler une fine couche d'eau sur un sol incliné entre 0,2 et 3%. Le débit à appliquer dépend de la pente, ainsi que de la largeur et de la longueur de la planche. Cette technique est considérée comme la plus complexe, car elle nécessite de régler le débit d'irrigation de chaque planche en tenant compte de toutes les autres variables (Saiyouri, N. et al, 2012).

1.1.2. Irrigation par raie

L'irrigation par raie ou rigole est bien adaptée aux sols avec une pente allant de 0,2 à 3%. Les sillons sont espacés de 0,6 à 1,25 m, en fonction du type de sol et de la culture. Selon le débit disponible, il est possible d'irriguer un ou plusieurs sillons simultanément. Les

raies peuvent être tracées parallèlement ou perpendiculairement à la rigole d'amenée d'eau permanente.

En général, l'irrigation s'effectue avec un débit unique ou en alternant deux débits : un débit d'attaque plus élevé, suivi par un débit d'entretien moins intense. Ce type d'irrigation est particulièrement adapté à la mécanisation, que ce soit par siphon, rampe à vannettes, gaine souple ou Trans irrigation. (*Saiyouri, N. et al, 2012*).

1.1.3. Irrigation par siphon

Les siphons sont de petits tuyaux, généralement mesurant entre 20 et 50 mm de diamètre et d'une longueur variant de 1 à 1,50 m. Ils sont fabriqués à partir de matériaux rigides ou semi-rigides, le PVC étant le plus couramment utilisé. Ces dispositifs fonctionnent avec une faible charge de 10 à 20 cm et peuvent délivrer un débit d'environ 0,4 à 2 l/s sous ces conditions. L'un des principaux avantages des siphons est leur faible coût, tout en permettant une bonne répartition des débits, comme l'indiquent (*Saiyouri, N. et al, 2012*).

1.1.4. Irrigation par gaines souples

Les gaines souples sont constituées d'une manche flexible en matière plastique, placée à l'entrée de la parcelle. Sur cette manche sont fixées des manchettes de dérivation qui permettent d'alimenter les raies. Ces manchettes sont souvent équipées d'un dispositif qui permet de compresser le tube pour réguler les débits. Elles mesurent 50 mm de diamètre et 0,50 m de longueur. Pour une utilisation optimale des gaines, une charge d'eau de 40 cm à 1 m est nécessaire. À titre indicatif, le débit maximal d'une dérivation, lorsqu'elle est entièrement ouverte, est d'environ 2 l/s avec une charge de 50 à 60 cm (*Saiyouri, N. et al, 2012*).

1.2. Avantages et inconvénients

1.2.1. Les avantages de l'irrigation gravitaire

- ☞ L'investissement financier est relativement modeste,
- ☞ La consommation d'énergie est réduite voire inexistante,
- ☞ La technique est bien établie,
- ☞ Le système n'est pas affecté par le vent,
- ☞ Il convient parfaitement à l'épandage des eaux usées,
- ☞ Il offre la possibilité d'utiliser des eaux salées en pratiquant le lessivage du sol,
- ☞ Les plantes restent sèches, ce qui présente un avantage phytosanitaire

(*Saiyouri, N. et al, 2012*).

1.2.2. Les inconvénients de l'irrigation gravitaire

- ☞ Grand besoin de main-d'œuvre, excepté dans les systèmes modernes,
- ☞ L'efficacité de l'irrigation à la parcelle est généralement faible, sauf avec des systèmes sophistiqués qui recyclent les eaux de drainage (*FAO, 2003*).

2. L'irrigation par aspersion

L'irrigation par aspersion fonctionne en imitant la pluie. L'eau est acheminée sous pression à travers un réseau de tuyaux, puis elle est dispersée par des asperseurs rotatifs pour créer une pluie artificielle (*Saiyouri, N. et al, 2012*).



Fig. III.5 : Système d'irrigation par aspersion [6].

2.1. Les avantages et les inconvénients de l'irrigation par aspersion

2.1.1. Les avantages

- ∞ Possibilité d'arroser tous les types de sols,
- ∞ Capacité à réaliser des installations mobiles, permettant de les déplacer en fonction de la nature des cultures, ce qui facilite la rotation des cultures,
- ∞ Utilisation d'équipements entièrement automatiques pour effectuer des arrosages à faible dose et à cadence rapide,
- ∞ Possibilité de mettre en place des installations de protection contre les gelées radiatives au printemps,
- ∞ Oxygénation de l'eau projetée en pluie, bénéfique dans le cas de l'utilisation d'eaux résiduaires réductrices (*Saiyouri, N. et al, 2012*).

2.1.2. Les inconvénients

- ∞ Les coûts élevés de l'énergie, parfois prohibitifs dans les pays où celle-ci est onéreuse,
- ∞ Difficultés d'utilisation et efficacité réduite dans les régions venteuses,
- ∞ Inadéquation avec les sols très perméables,
- ∞ Nécessité d'un nivellement du terrain,
- ∞ Approvisionnement du terrain généralement assuré par des canaux, ce qui peut compartimenter et figer le parcellaire. (Cet inconvénient est éliminé lorsqu'on utilise des canalisations enterrées à basse pression),
- ∞ Pertes d'eau dans les réseaux de canaux, selon la présence ou l'absence de revêtement ainsi que la qualité de la régulation du niveau et du débit.
- ∞ Surface occupée par les canaux et rigoles (*Saiyouri, N. et al, 2012*).

3. L'irrigation par goutte à goutte

L'irrigation goutte à goutte fonctionne en transportant l'eau sous pression à travers un système de conduites. Cette eau est ensuite diffusée en petites quantités directement sur le champ grâce à de nombreux goutteurs disposés le long des rangs de plantations. La zone du sol qui reçoit l'humidité est principalement celle entourant les racines des plantes. Cette méthode d'irrigation est donc très efficace pour distribuer l'eau. On appelle également cette technique la micro-irrigation (*Saiyouri, N. et al, 2012*).



Fig. III.6 : Système d'irrigation par goutte à goutte [7].

3.1. Les avantages et les inconvénients de l'irrigation par goutte à goutte

3.1.1. Les avantages

- ∞ Efficacité optimale d'arrosage à la parcelle, à condition d'une maîtrise parfaite de la technique,
- ∞ Rendement élevé des cultures,
- ∞ Bonne adaptation à l'eau salée,
- ∞ Nécessite très peu de main-d'œuvre,
- ∞ Coût d'entretien réduit,
- ∞ Indifférence au vent,
- ∞ Ne mouille pas le feuillage, avantage phytosanitaire,
- ∞ Humidifie très partiellement le sol, bénéfique pour les pratiques culturales,
- ∞ Limite la prolifération des mauvaises herbes,
- ∞ Raccourcissement du cycle végétatif de la culture (*Saiyouri, N. et al, 2012*).

3.1.2. Les inconvénients

- ∞ Le coût généralement élevé limite cette technique aux cultures de haute valeur ajoutée,
- ∞ Elle requiert un haut niveau de compétence pour toutes les étapes, de la conception de l'installation à la gestion des arrosages par l'irrigant,
 - ∞ Une maintenance rigoureuse est indispensable pour éviter les risques d'interruption des arrosages,
 - ∞ Il est nécessaire de filtrer l'eau utilisée pour l'irrigation,
 - ∞ Elle utilise des équipements sensibles qui ont une durée de vie relativement courte (*FAO, 2003*).

IV. DIRECTIVES DE REUTILISATION DES EAUX EPUREES

Les directives de réutilisation jouent un rôle important dans la protection de la santé publique et de l'environnement.

Dans les pays de la région du Proche-Orient, deux situations peuvent être observées : Lorsque des directives nationales sont disponibles, les agriculteurs ont l'obligation de les appliquer et de s'y conformer.

En l'absence de directives nationales, les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) sont proposées comme alternative (*FAO, 2003*).

1. Aspects socioculturels, légaux, institutionnels et économiques

Cette partie du chapitre à la fois succinct et axé sur les besoins immédiats des agriculteurs, a pour objectif d'informer les agronomes du service de vulgarisation. Ces derniers doivent être formés sur les cadres juridiques et institutionnels en vigueur dans leur pays afin de pouvoir superviser efficacement et fournir des conseils adaptés aux agriculteurs. Cela leur permettra de les aider à résoudre les problèmes courants liés à l'utilisation des eaux usées traitées (*FAO, 2003*).

2. Acceptabilité sociale et information du public

Dans plusieurs pays, la réutilisation de l'eau usée traitée constitue une idée relativement récente. Pour garantir une utilisation sécurisée et efficace de cette ressource en milieu urbain, il est essentiel de sensibiliser et d'éduquer toutes les parties impliquées. Cela inclut la formation du personnel chargé de superviser et d'entretenir les installations de traitement, ainsi que celle des agriculteurs qui tirent parti de l'eau usée traitée dans leurs activités (*FAO, 2003*).

Les eaux usées sont largement sous-exploitées en tant que ressource et, dans certains cas, leur réutilisation n'est même pas envisagée. Plusieurs facteurs principaux expliquent cette situation :

- ☞ Un déficit d'informations sur les avantages qu'elles peuvent offrir,
- ☞ Une crainte liée aux risques sanitaires perçus,
- ☞ Des biais culturels, des croyances religieuses et des perceptions publiques,
- ☞ L'absence de méthodes claires et précises pour l'analyse économique des projets de réutilisation,
- ☞ Des expériences négatives liées à des tentatives de réutilisation dans des conditions mal maîtrisées.

3. Aspects institutionnels, surveillance et mesures de contrôle

Pour répondre à la demande croissante en eau, il est essentiel d'augmenter les ressources hydriques disponibles, qu'elles soient existantes ou à venir. L'eau recyclée représente une solution fiable, même en période de sécheresse, en particulier dans les zones urbaines où son usage peut être optimisé en remplaçant l'eau potable par de l'eau recyclée pour des utilisations non potables. Cela nécessite toutefois une attention particulière afin de minimiser les risques sanitaires et environnementaux potentiels. Étant donné les dangers

associés à la réutilisation des eaux usées traitées, il est impératif de mettre en place un cadre institutionnel adéquat.

Celui-ci devra superviser la gestion des projets de réutilisation, fournir des directives claires et assurer que ces pratiques soient réalisées de manière sécuritaire. Sur le plan national, cette activité implique la collaboration de plusieurs ministères ou agences, rendant indispensable une structure institutionnelle bien définie et une répartition précise des responsabilités.

Cependant, la multiplicité des institutions concernées peut compliquer la coordination efficace des interactions. La conception d'un cadre institutionnel doit donc être adaptée aux spécificités locales de chaque pays. Par ailleurs, il est crucial que les agriculteurs disposent d'informations claires sur les rôles respectifs de chaque organisme impliqué afin de pouvoir adresser leurs préoccupations de manière appropriée. En l'absence de telles informations, des malentendus ou une confusion généralisée pourraient émerger, compromettant ainsi l'efficacité des projets (*FAO, 2003*).

4. Considérations réglementaires et questions de droit

La santé publique et la préservation de l'environnement occupent une place centrale dans les initiatives de réutilisation des eaux usées. Dans ce contexte, il est essentiel, pour chaque pays, de définir des directives de qualité ainsi que des exigences spécifiques relatives au traitement, au prélèvement et à la surveillance de ces eaux. Dans plusieurs nations, des règles strictes encadrent leur réutilisation. Par conséquent, les agriculteurs doivent se conformer à ces réglementations afin de protéger à la fois la santé publique et l'environnement.

Le respect des règlements par les agriculteurs reste incertain, ce qui souligne l'importance d'une surveillance rigoureuse. Par ailleurs, l'adoption de mesures législatives pourrait s'avérer indispensable pour garantir leur application (*FAO, 2003*).

5. Aspects économiques

Pour les agriculteurs, l'intérêt principal réside dans les avantages qu'ils espèrent tirer de l'utilisation des eaux usées pour l'irrigation. Les coûts liés à la collecte, au traitement, à la distribution et aux aspects techniques ne les préoccupent pas directement. Leur motivation se manifeste si, avec une quantité précise d'eau usée de qualité adéquate, obtenue à un prix raisonnable ou gratuitement, ainsi qu'en respectant certaines restrictions sur les cultures, ils parviennent à pratiquer une agriculture irriguée rentable (*FAO, 2003*).

6. Avantages

Les principaux avantages se résument comme suit :

- ❖ Réduction de la consommation d'eau potable,
- ❖ Diminution de l'utilisation de fertilisants,
- ❖ Augmentation des rendements agricoles,
- ❖ Création de nouvelles opportunités d'emploi.

En somme, l'avantage majeur pour les agriculteurs réside dans le fait que l'eau usée constitue une source d'approvisionnement fiable, même en période de sécheresse prolongée, tout en apportant des éléments nutritifs qui permettent d'obtenir des récoltes abondantes et de qualité, avec peu ou pas d'utilisation d'engrais supplémentaires (*FAO, 2003*).

V. CONCLUSION

La réutilisation des eaux usées connaît une croissance significative, particulièrement dans le domaine agricole. Diverses solutions techniques permettent d'assurer le respect des normes en vigueur, notamment les recommandations de l'OMS concernant l'irrigation contrôlée ou sans restriction.

Dans les régions où les réserves d'eau douce sont actuellement ou bientôt menacées de dépasser le seuil critique de survie, le recyclage des eaux usées apparaît comme l'option alternative la plus économique.

Cette technique se distingue par ses coûts accessibles, notamment grâce aux traitements extensifs adaptés, et sa simplicité technique pour des usages agricoles, industriels ou urbains ne nécessitant pas une eau potable. Seul le coût marginal lié au recyclage des eaux usées devrait être pris en compte, en excluant les frais associés à la collecte et au traitement initial des eaux usées.

2^{ème} Partie :

Partie Expérimentale

Chapitre IV :
Description de la zone
d'étude

Quatrième Chapitre : DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

I. INTRODUCTION

Ce chapitre présente une description générale de notre zone d'étude. Elle examine également les équipements ainsi que les méthodes d'analyse utilisées pour le traitement des eaux usées au sein de la STEP de Maghnia. En parallèle, elle explore les possibilités de réutilisation des eaux usées traitées dans le domaine agricole.

II. PRESENTATION DE LA REGION D'ETUDE

1. Données générales

Maghnia est une commune située dans la wilaya de Tlemcen, à l'extrême nord-ouest de l'Algérie, à proximité immédiate de la frontière marocaine. Elle se trouve aux coordonnées géographiques 34.8617° de latitude nord et -1.73055° de longitude ouest. S'étendant sur une superficie de 294 km², elle compte une population estimée à 114 634 habitants. Son altitude varie entre 310 et 680 mètres, avec une moyenne avoisinant les 495 mètres.

Sur le plan géomorphologique, la région de Maghnia présente un relief marqué par des terrains accidentés, composés de montagnes et de vallées profondes. Les sols, généralement peu profonds et caillouteux, rendent difficile l'exploitation agricole à grande échelle.

Maghnia est délimitée au nord par le massif des Taras (Djebel Fellaoucène), qui la sépare de la mer Méditerranée. Au sud et à l'est, elle est bordée par les monts de Tlemcen, notamment les monts de Ghar-Rouban et du Kef. À l'ouest et au sud-ouest, elle est ouverte sur la plaine des Angads et les monts de Béni Snassen.

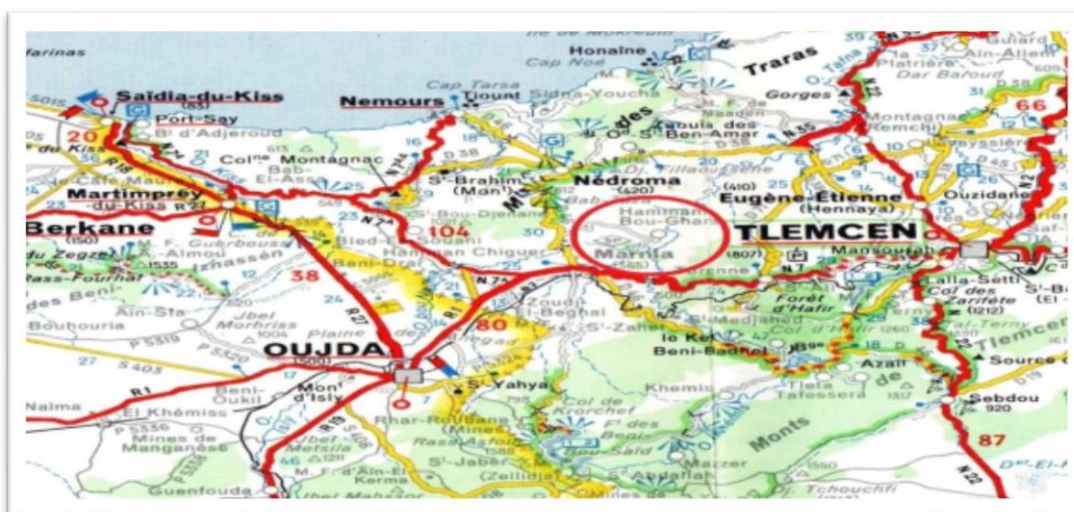


Fig. IV.1 : Carte de situation géographique de la région de Maghnia.

2. Contexte Géographique

La plaine de Maghnia, qui fait partie intégrante du bassin de la moyenne Tafna (*figure IV.2*), présente un relief relativement plat et s'étend sur une superficie de 216,13 km². Elle se distingue par une prédominance du secteur étatique, qui occupe environ 72 % de la surface agricole utile.

Cette plaine est traversée par l'oued Ouerdeffou, ainsi que par plusieurs de ses affluents, dont l'oued Aouina, l'oued Mehaguène et l'oued El Abbès.

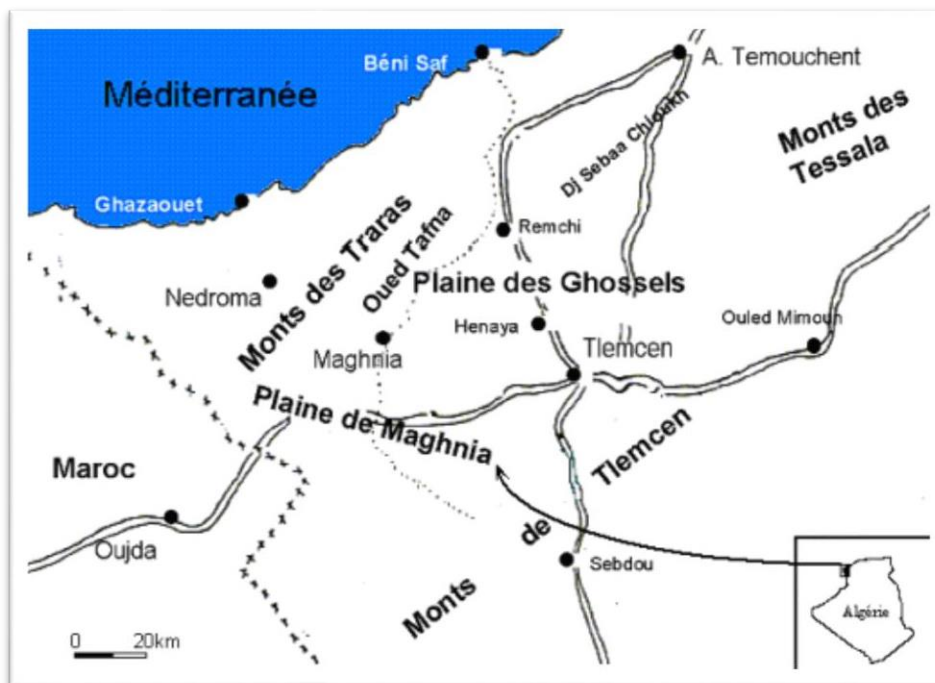


Fig. IV.2 : Carte de situation de la plaine de Maghnia (Baba Hamed, 2007).

La daïra de Maghnia regroupe deux communes :

- Maghnia,
- Hammam Bouhrara.

Sur le plan administratif, la ville de Maghnia est délimitée comme suit :

- **Au Nord**, elle est bordée par la commune de **Souani**,
- **Au Sud**, par celle de **Beni Bou Saïd**,
- **À l'Est**, par la commune de **Hammam Bouhrara**,
- **À l'Ouest**, elle est limitrophe du **Maroc**.

3. Contexte Géologique

Maghnia est située au cœur d'un couloir stratégique reliant Tlemcen à Fès, offrant un accès naturel aux populations montagnardes du nord et du sud. Cette position géographique a historiquement favorisé les échanges tribaux ainsi que les interactions économiques.

La région de Maghnia se caractérise par un relief montagneux, composé de pentes escarpées et de vallées profondes. Son sous-sol est majoritairement formé de roches

sédimentaires, telles que les calcaires et les argiles, auxquelles s'ajoutent des formations volcaniques, vestiges d'une activité géologique ancienne.

Selon plusieurs études géologiques (*Gentil, 1903 ; Perrodon, 1957 ; Guardia, 1975 ; Fenet, 1975 ; Hadji, 2019*), le bassin de la Tafna correspond à un fossé d'effondrement (*figure IV.3*), caractérisé par un remplissage sédimentaire datant du Tertiaire, ainsi que par un volcanisme d'âge Mio-Plio-Quaternaire. Il s'inscrit parmi les bassins néogènes sublittoraux de la région de l'Oranie.

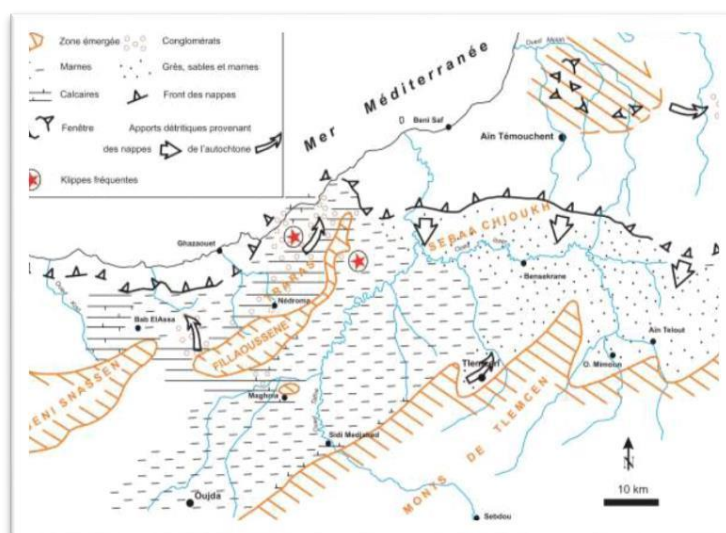


Fig. IV.3 : Carte Structurale du bassin de la Tafna (*in Hadji, 2019*).

4. Nature du sol

La meilleure zone d'extension, s'étendant sur 2000 hectares, est située à l'ouest de la plaine, de part et d'autre de la route Maghnia-Oujda.

Cette zone est composée de sols profonds et limoneux, aptes à accueillir des cultures irriguées. Cependant, les autres sols présentent divers inconvénients, plus ou moins prononcés : certains sont peu profonds en raison d'une accumulation calcaire importante, tandis que d'autres ont des horizons argileux, superficiels ou profonds, pouvant parfois ralentir la pénétration de l'eau.

D'autres sols sont également déficitaires sur le plan chimique, particulièrement en ce qui concerne le phosphore (*BOUDJEMA, S., 2007*).

III. PRESENTATION DU PERIMETRE D'IRRIGATION MAGHνια-EL KFAF

1. Situation géographique

Le périmètre irrigué d'El Kfaf est situé dans la commune de Maghnia, à l'extrémité occidentale de la wilaya de Tlemcen, en Algérie. Sa localisation le place tout près de la frontière entre l'Algérie et le Maroc.

Cette région se distingue par un climat semi-aride et un relief relativement plat, idéal pour l'agriculture. Sa position stratégique, à proximité de la ville de Maghnia et des

principaux axes routiers, facilite la distribution des produits agricoles aux marchés locaux et nationaux.

Le périmètre bénéficie également de la proximité de plusieurs infrastructures hydrauliques importantes, telles que le barrage de Hammam Boughrara et celui de Beni Bahdel, qui sont les principales sources d'eau pour l'irrigation.



Fig. IV.4 : Localisation de la région Maghnia-El Kfaf- avec google Earth.

2. Généralités sur le périmètre irrigué de Maghnia

Le périmètre irrigué de Maghnia, englobant notamment la région d'El Kfaf, a été créé en 1974 dans le cadre d'une politique nationale visant à renforcer la production agricole par l'introduction de l'irrigation (*Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, 1974*).

Sa superficie initiale, estimée à environ 4 500 hectares, a connu par la suite une extension pour atteindre près de 7 000 hectares. Cette expansion a contribué à l'amélioration des rendements agricoles et a eu un impact socio-économique notable. En effet, selon les estimations de l'Agence Nationale des Statistiques Agricoles, l'augmentation de la surface irriguée aurait permis la création d'environ 21 000 emplois agricoles directs, sur la base d'un ratio moyen de trois travailleurs par hectare (*Agence Nationale des Statistiques Agricoles, 2018*).

IV. CONTEXTE CLIMATIQUE

Sur le plan climatique, et d'après les données recueillies par la station météorologique, Maghnia bénéficie d'un climat de type méditerranéen, relevant de l'étage bioclimatique semi-aride.

Ce climat se caractérise par des hivers doux et humides, contrastant avec des étés chauds et secs. Les précipitations se concentrent principalement durant la saison hivernale.

L'objectif de cette partie est de présenter et d'analyser les données climatiques, notamment les paramètres pluviométriques et thermiques, afin d'illustrer leur évolution dans le temps et de mieux comprendre les caractéristiques climatiques de la région.

Tableau. IV.1 : Caractéristiques de la station de mesure
(Source : A.N.R.H) (Lalam, 2017)

Station	Coordonnées			Période d'enregistrement	Etat
	Longitude	Latitude	Altitude		
Maghnia	34°81N	01°78W	428	1979/1980 – 2015/2016	Opérationnelle

1. Pluviométrie

Les précipitations annuelles dans la région varient généralement entre 400 et 500 mm, avec une moyenne interannuelle estimée à 302,1 mm. Ce niveau de précipitations contribue au développement de la végétation locale (*figure IV-5*).

Les données relatives aux précipitations mensuelles et annuelles enregistrées dans le sous-bassin de la Mouilah sont synthétisées dans les tableaux suivants :

Tableau. IV.2 : Pluviométrie mensuelles et annuelles au sous bassin Mouilah
(Zenasni, 2013).

Station pluviométrique	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Pluviométrie annuelle
Maghnia	14.26	22.13	37.60	31.50	27.58	41.06	41.11	38.92	26.16	6.31	2.59	3.20	286.13

Tableau. IV.3 : Valeurs des précipitations moyennes annuelles à la station de Maghnia
(1979/1980 – 2015/2016) (Lalam, 2017).

Années	1979/1980	1980/1981	1981/1982	1982/1983	1983/1984	1984/1985
P (mm)	467.1	452.7	203.2	172.9	261.2	247.2
Années	1985/1986	1986/1987	1987/1988	1988/1989	1989/1990	1990/1991
P (mm)	290.7	393.3	189.2	274.8	290.9	264.4
Années	1991/1992	1992/1993	1993/1994	1994/1995	1995/1996	1996/1997
P (mm)	442.1	248.7	272.7	264.2	343.4	230.4
Années	1997/1998	1998/1999	1999/2000	2000/2001	2001/2002	2002/2003
P (mm)	302.5	221.1	200.6	240.2	368.8	242.7
Années	2003/2004	2004/2005	2005/2006	2006/2007	2007/2008	2008/2009
P (mm)	364.6	266.8	243.5	287.4	257.9	385.3
Années	2009/2010	2010/2011	2011/2012	2012/2013	2013/2014	2014/2015
P (mm)	398.1	271.2	305.6	404.8	485.5	447.2
Années	2015/2016	P_{moy}=				
P (mm)	172.6	302.1 mm				

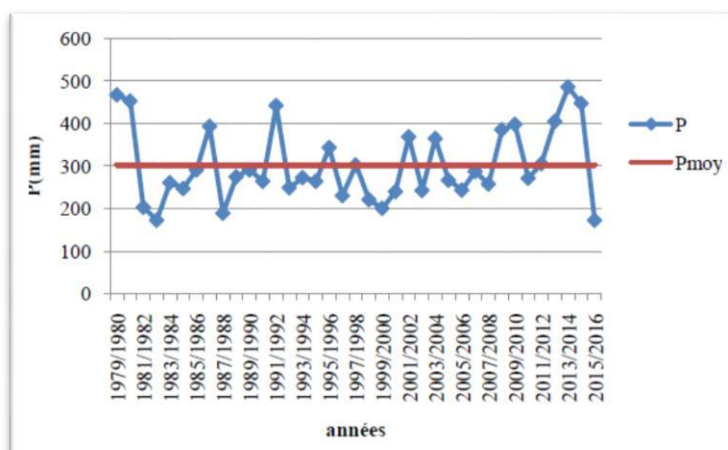


Fig. IV.5 : Diagramme des précipitations annuelles à la station de Maghnia (1979 – 2016).

Les moyennes mensuelles des précipitations révèlent la présence de deux saisons distinctes : une saison pluvieuse s'étendant de septembre à mai, avec des pics de précipitations observés entre décembre et mars selon les stations, et une saison sèche couvrant les mois de juin, juillet et août, les niveaux les plus bas étant généralement enregistrés en juillet et août, également en fonction des stations.

2. Température

Les données de la température moyenne annuelle relevées à la station de Maghnia pour la période allant de 1979/1980 à 2015/2016 sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau. IV.4 : Valeurs des Températures moyennes annuelles à la station de Maghnia (1979/1980 – 2015/2016) (Lalam, 2017).

Années	1979/1980	1980/1981	1981/1982	1982/1983	1983/1984	1984/1985
T (°C)	17.7	16.4	19.6	18.02	18.6	18.9
Années	1985/1986	1986/1987	1987/1988	1988/1989	1989/1990	1990/1991
T (°C)	19.03	17.35	15.98	16.45	18.48	16.18
Années	1991/1992	1992/1993	1993/1994	1994/1995	1995/1996	1996/1997
T (°C)	15.81	15.88	16.59	16.89	18.5	17.63
Années	1997/1998	1998/1999	1999/2000	2000/2001	2001/2002	2002/2003
T (°C)	16.68	16.74	16.82	17.93	17.03	17.78
Années	2003/2004	2004/2005	2005/2006	2006/2007	2007/2008	2008/2009
T (°C)	17.38	17.11	17.38	17.58	17.22	17.04
Années	2009/2010	2010/2011	2011/2012	2012/2013	2013/2014	2014/2015
T (°C)	20.19	21.03	19.4	18.9	20.1	20.0
Années	2015/2016	$T_{\text{moy}} =$				
T (°C)	19.8	17.9 °C				

Au cours de cette période, les températures moyennes annuelles varient entre 15,81 °C et 21,03 °C.

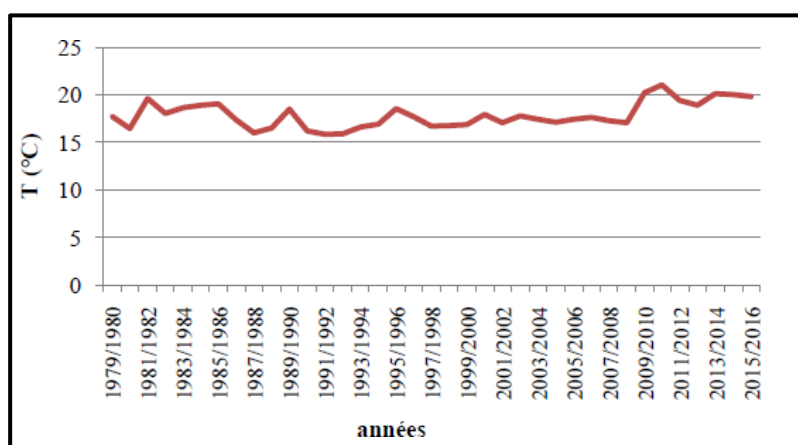


Fig. IV.6 : Diagramme des précipitations annuelles à la station de Maghnia (1979-2016) (Lalam, 2017).

Les moyennes mensuelles des précipitations mettent en évidence deux saisons distinctes :

☞ Une saison pluvieuse s'étendant de septembre à mai, avec des pics de précipitations généralement observés entre décembre et mars, selon les données de la station.

∞ Une saison sèche correspondant aux mois de juin, juillet et août, les précipitations atteignant leur minimum durant les mois de juillet et août, toujours selon les relevés de la station.

3. Etude du climat

L'analyse du climat permet d'identifier les périodes sèches et humides, et, à l'aide de certains indices climatiques, de caractériser le type de climat de la région en se basant sur les données de précipitations et de températures. Pour cela, nous avons exploité les données issues de la série chronologique allant de 1979/1980 à 2015/2016, enregistrées à la station météorologique de Maghnia (*tableau IV.5*).

Tableau. IV.5 : Valeurs des précipitations et des températures moyennes mensuelles (*Lalam, 2017*).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Jui	Jul	Août
P_{moy} (mm)	14.1	28.4	43.2	32.7	35.5	35.2	34.6	30.4	33.2	6.5	3.5	4.8
T_{moy} (°C)	23.7	19.1	14.7	11.1	9.92	11.2	13.2	15.5	18.8	23.4	26.4	26.9

À partir des données de la station de Maghnia, la figure IV.7 met en évidence deux périodes climatiques distinctes :

- **Une période humide**, qui s'étend de novembre à la fin avril,
- **Une période sèche**, couvrant le reste de l'année.

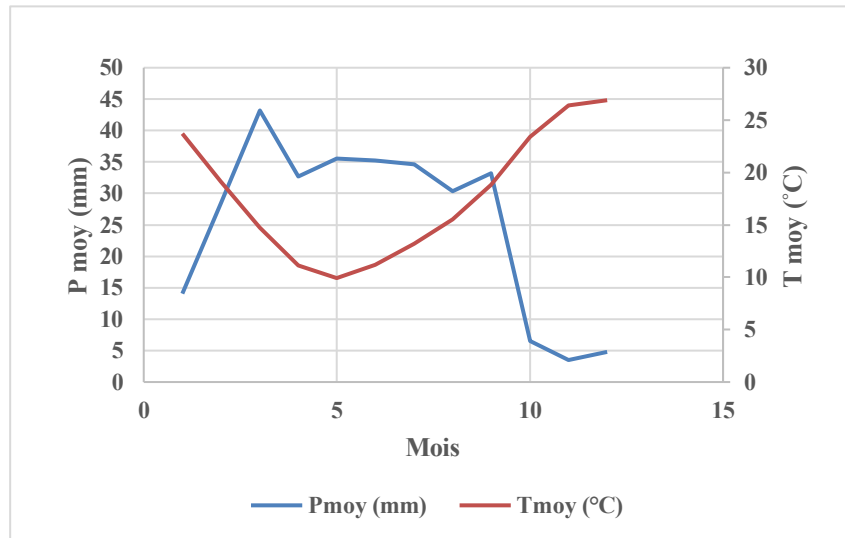


Fig. IV.7 : Diagramme pluviothermique de la station de Maghnia (1979/1980 – 2015/2016).

V. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

Sur le plan hydrogéologique, la région de Maghnia est traversée par plusieurs cours d'eau, notamment l'oued Tafna, qui prend sa source dans les montagnes voisines.

Ces cours d'eau jouent un rôle crucial dans l'approvisionnement en eau de la région et dans l'irrigation des terres agricoles. Toutefois, la région est confrontée à des problèmes de salinisation des sols et de pénurie d'eau, ce qui peut restreindre les rendements agricoles.



Fig. IV.9 : Vue de la station d'épuration de Maghnia (Google Earth)

1. Mode de fonctionnement de STEP de Maghnia

1.1. Fiche technique de la STEP

La station d'épuration a été conçue selon la fiche technique et les critères suivants (ONA, 2025):

- ✓ Type de réseau : Unitaire,
- ✓ Nature des eaux brutes : Domestiques,
- ✓ Population desservie : 150 000 habitants,
- ✓ Débit moyen journalier : 29 400 m³/j,
- ✓ Débit de déversement lors de pluies : 30 312 m³/h,
- ✓ Débit moyen horaire : 1 225 m³/h,
- ✓ Coefficient de pointe : 1.7,
- ✓ Débit de pointe : 3 266 m³/h,
- ✓ DBO₅ : 9 614 kg/j,
- ✓ MES : 17 640 kg/j,
- ✓ Ammonium à nitrifier : 1 880 kg/j.

1.2. Origine de l'eau brute

Les eaux brutes proviennent de la ville de Maghnia et sont transportées par les drains collecteurs. Le premier dispositif est un déversoir d'orage, qui limite l'accès à la station aux seuls 3266 m³/h. Tout débit supérieur à cette limite se déverse et rejoint l'Oued émissaire par le by-pass général de la station (ONA, 2025).

1.3. Installation de la STEP

La station d'épuration de Maghnia est dotée de deux filières : l'une pour le traitement des eaux usées et l'autre pour le traitement des boues (ONA, 2025).

1.4. Ouvrage de traitement de la STEP

La station utilise un procédé de boues activées avec aération prolongée, assuré par des aérateurs de surface à vitesse lente. L'eau entrant dans la station traverse initialement:

1.4.1. Déversoir d'orage

Un déversoir d'orage, situé en amont de la station, évacue le surplus de débit admissible via le by-pass général de l'installation. La hauteur de la lame de débordement est ajustée pour traiter un débit maximum de 3266 m³/h (ONA, 2025).



Photo. IV.1: Déversoir d'orage

1.4.2. Prétraitement

1.4.2.1. Grille grossière

Dans un premier temps, l'eau usée traverse une grille grossière, ce qui permet d'éliminer les principaux éléments en suspension. Les débris de taille supérieure à 5 cm seront capturés et évacués dans les "refus de grille" (ONA, 2025).



Photo. IV.2: Grille grossière manuelle (01 unité).

1.4.2.2. Relevage

Le relevage est réalisé grâce à la présence de quatre vis d'Archimède présentant :

- ✓ Un débit nominal de 1300 m³/h,
- ✓ Une puissance nominale de 18 kW (ONA, 2025).



Photo. IV.3: Bâtiment de relevage.

1.4.2.3. Dégrillage fin

Ensuite, un dégrilleur automatique fin est mis en place, avec un espacement de 20 mm entre les barreaux de la grille. Le moteur (triphase 320 V, 50 Hz, classe F-IP54-DOL) a une puissance de 0,37 kW (ONA, 2025).



Photo. IV.4: Grilles mécaniques.

1.4.2.4. Grille manuelle de By-Pass (01 unité)

En cas de dysfonctionnement, un dégrilleur manuel, ou grille de by-pass, est installé en parallèle et peut retenir des éléments dont le diamètre est supérieur à 3 cm (ONA, 2025).



Photo. IV.5: Grille manuelle

Tableau. IV.6 : Caractéristiques des grilles utilisées au niveau du prétraitement (ONA, 2025).

Caractéristiques	Grille grossière	Grille fine	Grille de by-pass
Nombre d'unité	1	2	1
Nettoyage	manuel	Mécanique	manuel
Largeur (m)	1.30	1.00	1.00
Profondeur du chenal (m)	-	1.50	1.00
Inclination	10°		
Forme des barreaux	Rectangle	Rectangle	Rectangle
Epaisseur des barreaux (mm)	10	10	10
Espacement des barreaux (mm)	50	20	30
Matériau	Aluminium	Aluminium	Aluminium

1.4.2.5. Refus de dégrillage

Un détecteur de niveau est placé en amont de la grille grossière et déclenche une alarme sonore si le niveau d'eau devient trop élevé, indiquant un colmatage. Installé en aval du déversoir d'orage, les matières retenues sont déposées dans une remise d'égouttage.

Chaque grille mécanisée dépose ces matières sur une bande transporteuse qui les élève dans un conteneur drainé. Le fonctionnement de cette bande est synchronisé avec celui des grilles, incluant une temporisation pour l'arrêt. Ainsi, le détecteur de niveau en amont de chaque grille active le mécanisme en cas de niveau d'eau trop élevé (ONA, 2025).

1.4.2.6. Dessableur – Déshuileur (02 unités)

Le chenal de fuite des grilles est muni de glissières conçues pour accueillir des batardeaux, destinés à isoler un ou deux dessableurs. En cas de besoin, un trop-plein de sécurité est installé en aval des grilles pour être relié au by-pass général de la station d'épuration.

Le dessableur, de type longitudinal avec deux compartiments, est réalisé sous la forme d'un chenal en béton trapézoïdal mesurant 26 mètres de longueur et 4 mètres de largeur. Il est équipé d'un motoréducteur de translation de 0,37 kW ainsi que d'un dispositif d'arrêt d'urgence de type "*coup de poing*".

Pour l'évacuation du sable déposé vers un lit de séchage, une pompe air-lift embarquée accompagne le groupe moto-surpresseur de 4 kW. Ces équipements sont complétés par une pompe submersible à effet vortex.

Une lame d'écumage réglable permet l'évacuation des flottants via un déversoir en bout d'installation. Le puisard dédié aux flottants dispose d'un motoréducteur de vidange capable de traiter 10 m³/h sous une pression de 10 mCE.

En fin d'ouvrage, l'effluent déborde sur un déversoir en paroi mince. Une fois collecté dans le puisard final, il est évacué par gravité vers les étapes ultérieures du traitement.

Les huiles flottantes et la suspension des matières organiques sont maintenues à l'aide d'air insufflé dans les dessableurs, par le biais de rampes poreuses incolmatables à grosses bulles. Les tuyauteries sont en acier galvanisé.

La production d'air est assurée par deux surpresseurs rotatifs (01 en fonctionnement et 01 de secours), chacun ayant une capacité de 580 m³/h sous une pression de 4 mCE (*ONA, 2025*).



Photo. IV.6: Dessableur – Déshuilleur.

1.4.3. Traitement biologique

1.4.3.1. Transport

Les eaux issues des dessableurs-déshuilleurs sont acheminées par gravité à travers un chenal vers les bassins d'aération. Si la partie biologique du traitement doit être contournée, ce chenal est équipé d'un trop-plein de sécurité relié au by-pass général de la station d'épuration (*ONA, 2025*).

1.4.3.2. Bassin d'aération (04 unités)

Les bassins de dénitrification et d'aération sont adjacents, formant une structure de 64 mètres de longueur et 63,5 mètres de largeur.

Les bassins d'aération comprennent :

- ✓ 04 vis d'Archimède avec un débit unitaire de 1300 m³/h (contre-épuisante),
- ✓ 04 mélangeurs submersibles de 4 kW, incluant le système de relevage,
- ✓ 04 déversoirs,
- ✓ 12 aérateurs de surface,
- ✓ 04 sondes pour mesurer l'oxygène dissous (*ONA, 2025*).



Photo. IV.7: Bassins d'aérations

Tableau. IV.7 : Caractéristiques du bassin d'aération (ONA, 2025).

Caractéristiques	Bassin d'aération	Bassin de dénitrification
Volume (m ³)	2723	725
Forme	Rectangulaire	Rectangulaire
Longueur (m)	55.50	18.50
Largeur (m)	18.50	8
Hauteur de béton (m)	5.60	5.60
Hauteur d'eau (m)	4.60	4.60

1.4.3.2.1. Fonctionnement au niveau des Bassins

La nitrification se produit dans tout environnement biologique dès lors que la température et la concentration en oxygène sont suffisamment élevées. Dans le système envisagé, la boue ayant atteint un âge adéquat dégrade la demande biologique en oxygène (DBO) et nitrifie l'azote. Si la nitrification n'est pas suivie d'une dénitrification volontaire, elle peut parfois engendrer des inconvénients sérieux.

Les eaux prétraitées arrivent dans un canal de distribution qui débouche en tête des bassins de dénitrification. Ce canal est doté de quatre vannes inversées permettant d'ajuster le débit nominal de chaque ligne de traitement, assurant ainsi une répartition équitable. En cas d'erreur de manipulation, comme une vanne fermée, le débit peut être redirigé par les vannes inversées pour éviter tout risque de débordement au sol.

Les vis d'Archimède situées à l'aval de chaque bassin d'aération renvoient la liqueur mixte en tête de la cellule de dénitrification. Un canal en béton est dédié à cet effet. Le fonctionnement des vis est contrôlé par un système de minuterie qui définit la fréquence de fonctionnement, influençant ainsi le taux de recirculation. Le bassin de dénitrification est équipé d'un déflecteur longitudinal en béton armé, ce qui permet aux eaux de circuler à une vitesse d'environ 0.20 m/s pour éviter le dépôt de boues.

Dans les bassins d'aération, le brassage et l'oxygénation de la liqueur mixte sont assurés par des aérateurs de surface à rotation lente installés sur des passerelles. La liqueur mixte est ensuite dirigée vers une goulotte de collecte par une lame de débordement et un cloisonnement siphon en béton, se poursuivant vers les décanteurs.

Le fonctionnement des aérateurs est régulé par une chaîne de mesure de l'oxygène dissous dans l'eau, avec des sondes munies d'un système de rinçage à jet d'eau et détergent dilué. En cas de surcharge de l'installation, un bassin peut être utilisé pour stabiliser aérobiquement les boues en excès.

Après stabilisation, les boues sont envoyées vers l'épaississeur grâce à deux pompes submersibles situées dans le bassin d'aération pouvant devenir bassin de stabilisation. Les angles à l'aval de chaque installation sont équipés de rampes d'arrosage pour lutter contre les mousses (ONA, 2025).

1.4.3.3. Tour de répartition

La liqueur mixte provenant des quatre bassins d'aération est acheminée par gravité vers une chambre de répartition qui distribue l'eau vers les deux décanteurs (ONA, 2025).

1.4.3.4. Décanteur secondaire (02 unités)

Après le traitement biologique, l'eau est dirigée vers le clarificateur, où les particules de boues sont séparées et se déposent au centre, grâce à la forme conique du compartiment de précipitation.

Chaque décanteur est circulaire, avec :

- ✓ Un diamètre de 46,00 m,
- ✓ Une surface de 1 661 m²,
- ✓ Une profondeur d'eau de 4,00 m à la périphérie.
- ✓ Le pont est construit avec des profilés en acier et tourne à une vitesse de 0,04

m/s.

Une fois clarifiées, les eaux sont envoyées vers le poste de désinfection. Les matières flottantes sont récoltées dans un puisard annexe à chaque structure, et équipées d'une pompe refoulant le liquide vers la tête de la station (**ONA, 2025**).



Photo. IV.8: Décanteurs secondaires

1.4.3.5. Puisard à boues

Le puisard à boues est relié hydrauliquement à deux décanteurs par le biais de tuyaux à boues situés sous les structures et de tubes télescopiques présents dans le puisard. Le relevage des boues est assuré par trois vis d'Archimède avec un débit nominal de 1300m³/h.

Les boues de recirculation sont dirigées vers l'entrée des bassins d'aération via un canal équipé d'un jaugeur Venturi, qui comprend une échelle graduée en m³/h (**ONA, 2025**).

1.4.4. Bassin de Chloration

La désinfection des eaux traitées vise à éliminer les germes pathogènes présents dans l'effluent. Cette opération est réalisée en ajoutant du chlore dans une cuve en béton d'une capacité de 700 m³, permettant ainsi un temps de contact supérieur à 30 mn au débit moyen (**ONA, 2025**).

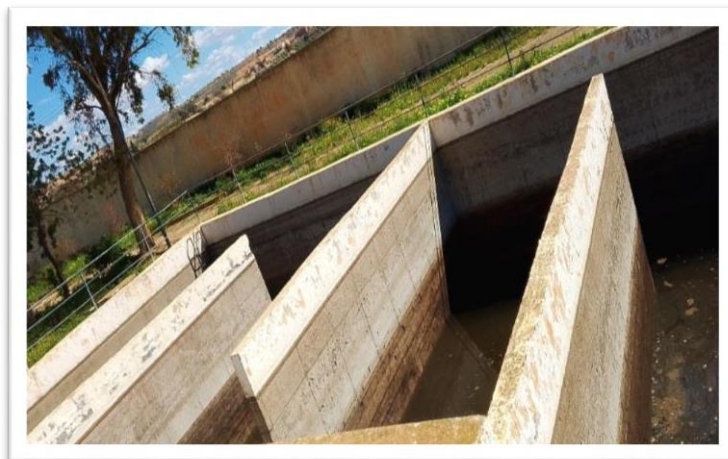


Photo. IV.9: Canal déversoir du rejet du bassin de chloration.

1.4.5. Description des ouvrages de traitement de la filière des Boues
Ce processus est effectué en suivant les étapes suivantes :

1.4.5.1. Epaisseur

Les boues excédentaires sont acheminées vers l'épaississeur, qui a un diamètre de 14 m et une hauteur de 4 m avec une pente de 1/10.

Les boues épaissies sont ensuite pompées et envoyées vers les lits de séchage (*ONA, 2025*).



Photo. IV.10: Epaisseur de boues.

1.4.5.2. Lits de séchage (14 lits)

- ✓ Longueur : 30,00 m,
- ✓ Largeur : 15,00 m,
- ✓ Surface : 450,00 m²,

Chaque lit est doté d'une vanne d'alimentation à passage direct ainsi que d'un ensemble de batardeaux servant de déversoir pour les eaux surnageantes (*ONA, 2025*).



Photo. IV.11: Lits de séchage.

1.5. Rendement de la STEP

Les analyses réalisées à l'entrée et à la sortie de la station montrent de bons résultats, ce qui suggère que l'eau rejetée respecte les normes en matière de caractéristiques physiques et chimiques. Le rendement qualitatif de la station d'épuration atteint 93,7 % pour la DBO₅ et 95,6 % pour les MES (ONA, 2025).

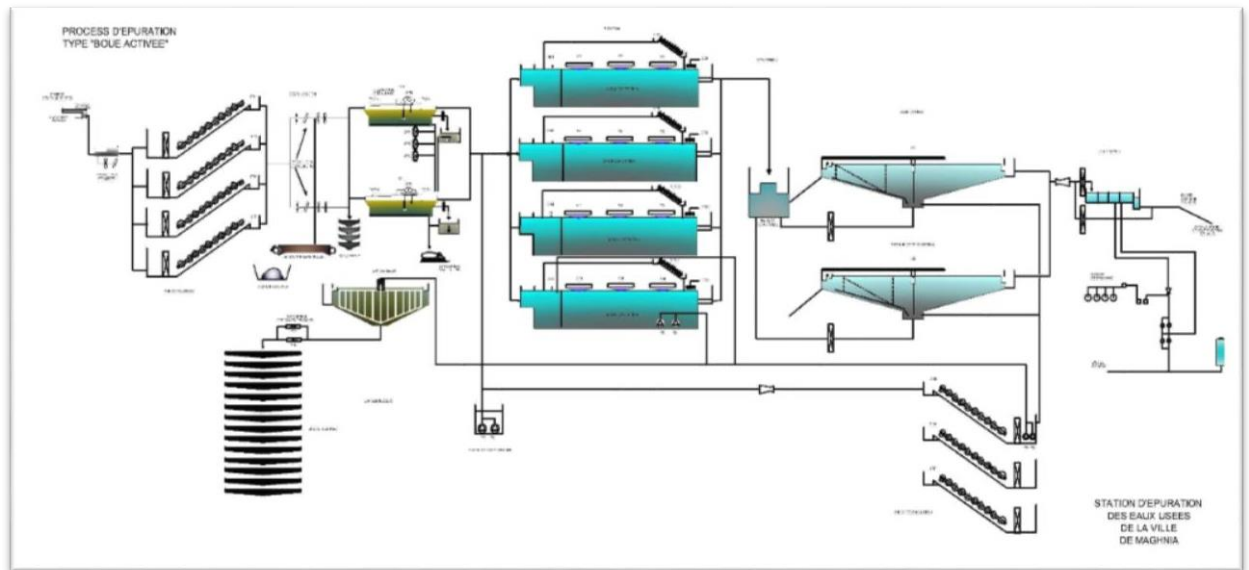


Fig. IV.10 : Schéma synoptique STEP de Maghnia.

Tableau. IV.8 : Débits au niveau de la STEP de Maghnia

Mois	Qe (m ³ /j)	Qs (m ³ /j)
Aout	25454.8387	24182.0968
Décembre /Janvier	26545.1613	25217.9032
Mars	23693.5484	22508.871

VIII. CONCLUSION

Maghnia est une commune relevant de la wilaya de Tlemcen, située à l'extrême nord-ouest de l'Algérie, tout près de la frontière Marocaine.

Le secteur d'étude porte sur la station d'épuration des eaux usées de la ville de Maghnia ainsi que dans la zone agricole d'El Kefaf.

Maghnia bénéficie d'un climat méditerranéen, appartenant à l'étage bioclimatique semi-aride, avec des hivers doux et pluvieux, et des étés chauds et secs. Les précipitations sont généralement concentrées durant la saison hivernale.

Les précipitations annuelles varient entre 400 et 500 mm, tandis que les températures moyennes annuelles se situent entre 15.81°C et 21.03°C.

Le réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Mouilah joue un rôle essentiel dans l'irrigation des terres agricoles et dans la régénération de la végétation des zones riveraines. On note également la présence d'autres réseaux hydriques, tels que l'oued El Abbès, un cours d'eau temporaire qui reçoit les eaux usées urbaines de la ville de Maghnia.

L'analyse des données climatologiques et des résultats obtenus à travers différentes méthodes confirme que la région est soumise à un climat semi-aride, marqué par deux grandes périodes :

- ✓ Une période humide allant de novembre à fin avril,
- ✓ Une période sèche couvrant le reste de l'année.

Par ailleurs, les indices annuels et mensuels d'aridité révèlent que la zone est fortement exposée à la sécheresse.

Chapitre V :

Matériels et Méthodes

Cinquième Chapitre : *MATERIELS ET METHODES*

I. INTRODUCTION

Ce chapitre présente de manière détaillée les différents matériaux, équipements et méthodes utilisés dans le cadre de notre étude. L'objectif est d'exposer les conditions expérimentales permettant de garantir la fiabilité et la reproductibilité des résultats. Après une description des cultures étudiées (olivier, haricot et tomate), nous abordons les dispositifs mis en place pour l'irrigation ainsi que les protocoles de prélèvement des échantillons d'eau. Enfin, les différentes méthodes d'analyses physico-chimiques appliquées in situ et en laboratoire sont précisées conformément aux normes en vigueur, afin d'assurer une évaluation rigoureuse de la qualité de l'eau utilisée.

II. GENERALITE SUR LES CULTURES

Dans le cadre de cette étude, le choix des cultures s'est porté sur des espèces facilement accessibles et adaptées à un cycle court, compte tenu du temps limité alloué à l'expérimentation. Parmi ces plantes, les herbacées telles que les haricots et la tomate ont pu être irriguées avec de l'eau épurée, ainsi que l'olivier, qui a été inclus dans l'essai en raison de son importance agricole et de sa capacité à s'adapter à l'irrigation avec de l'eau usée traitée.

1. Les oliviers

1.1. Conditions de croissance

- ✓ L'olivier en climat méditerranéen (15 à 25°C),
- ✓ Exigence plein soleil et sol bien drainé, même pauvre ou calcaire,
- ✓ Rustique jusqu'à -10°C pour certaines variétés, il craint l'humidité stagnante et les sols argileux compacts,
- ✓ Un pH de 6,5-8,5 lui convient parfaitement.

1.2. Méthode de culture

Planté de septembre à mars hors gel, l'olivier nécessite un large trou de plantation (1m×1m) avec drainage. Les 03 première années demandent une taille de formation, suivie d'une taille annuelle de fructification en février-mars pour aérer la ramure. La multiplication s'effectue principalement par bouturage.



Fig. V.1 : Les oliviers [8]

1.3. Besoins en eau

Les jeunes plants requièrent 20L d'eau/semaine en été durant 2-3 ans. Adultes l'olivier résiste à la sécheresse mais bénéficie 1-2 arrosages/mois en été (goutte-à-goutte idéal). Réduire l'eau avant récolte intensifie les arômes, tous en évitant absolument l'eau stagnante.

2. Les haricots

2.1. Conditions de croissance

- ✓ Les haricots exigent un terrain léger, parfaitement drainé et enrichi en compost.
- ✓ Une exposition pleinement ensoleillée et des températures comprises entre 15 et 25°C leur sont indispensables.
- ✓ Ces légumineuses présentent une sensibilité marquée aux basses températures, particulièrement aux gelées printanières.

2.2. Méthode de culture

Le semis en place intervient lorsque la terre s'est suffisamment réchauffée (généralement mi-mai). Selon les variétés, on distingue :

- ✓ Les formes naines : à planter en rangs espacés de 40 cm.
- ✓ Les variétés grimpantes : nécessitant un système de tuteurage solide.

2.3. Besoins en eau

L'arrosage doit être particulièrement suivi pendant deux phases critiques :

- ✓ La période de floraison.
- ✓ Le développement des gousses.

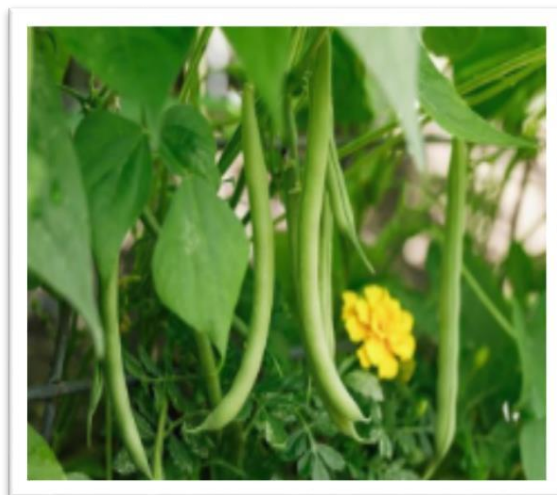


Fig. V.2 : Les Haricots [9]

Une humidité excessive est à proscrire, car elle favorise l'apparition de maladies comme l'antracnose ou la graisse du haricot. Un système d'irrigation au goutte-à-goutte permet d'optimiser l'apport hydrique tout en limitant les risques sanitaires.

3. La tomate

3.1. Conditions de croissance

- ✓ Les tomates exigent un climat chaud (18-25°C) et ensoleillé (minimum 6h/jour).
- ✓ Elles préfèrent un sol riche en matière organique, bien drainé avec un pH légèrement acide (6-7).
- ✓ Très sensibles au gel, elles se plantent après les dernières gelées printanières.

3.2. Méthode de culture

- ✓ Le semis s'effectue en intérieur 6-8 semaines avant la plantation.
- ✓ Les jeunes plantes sont repiquées en pleine terre avec un espacement de 50-70 cm et nécessitent un tuteurage solide.
- ✓ La taille des gourmands et un paillage organique sont recommandés pour optimiser la production.



Fig. V.3 : La tomate [10]

3.3. Besoins en eau

✓ Un arrosage régulier au pied (2-3 fois/semaine) maintient le sol frais sans excès d'humidité.

✓ L'irrigation doit être réduite en période de maturation des fruits pour concentrer les saveurs.

✓ Eviter absolument de mouiller le feuillage pour prévenir les maladies.

III. MATEREIL ET EQUIPEMENT D'IRRIGATION

1. Matériel nécessaire

- ☞ Un réservoir,
- ☞ Des tuyaux,
- ☞ Des goutteurs,
- ☞ Des raccords et bouchons.



Photo. V.1: Matériels d'équipement d'irrigation

2. Mise en place

2.1. Préparation du sol

La préparation du sol constitue l'étape initiale de toute culture, et sa bonne exécution conditionne le succès de l'ensemble des interventions ultérieures, notamment la mécanisation. Il est donc primordial de favoriser un bon enracinement.

Cela nécessite un ameublissement du sol sur 15 à 20 cm de profondeur, avec une structure fine et homogène, exempte de grosses mottes (supérieures à 20 mm). Un sol bien préparé permet ainsi un développement optimal des plantes et un grossissement uniforme des organes de production (*Amoura. M.,2022*).

Après avoir présenté l'importance de cette étape d'un point de vue général, nous allons exposer ci-dessous les travaux pratiques réalisés dans le cadre de notre étude :

☞ Il s'agit de retourner le sol à l'aide d'une houe pour l'ameublir et éliminer les mauvaises herbes.

☞ Ouverture de sillons d'une longueur de 2m est une profondeur de 10 à 15cm au nombre de 6 lignes espacés de 50cm.



Photo. V.2: Préparation du sol.

2.2. Conception du réseau d'irrigation

- ☞ Positionner le tuyau principal le long des cultures.
- ☞ Percer le tuyau principal aux emplacement souhaités.
- ☞ Connecter les tuyaux secondaires équipés de goutteurs.
- ☞ Espacer les goutteurs selon les besoins des plantes.
- ☞ Tester et ajuster le débit.



Photo. V.3: Installation finale du dispositif.

IV. IDENTIFICATION DES PROTOCOLES DE PRELEVEMENTS

A. PROTOCOLE DE PRELEVEMENT

Le prélèvement des échantillons a été réalisé conformément aux recommandations de la norme internationale *ISO 5667-2 :1991*.

1. Domaine d'application

Cette section de la norme **ISO 5667** sert de guide général sur les méthodes d'échantillonnage à appliquer pour recueillir des données fiables, utilisées dans les analyses de contrôle de la qualité de l'eau, l'évaluation de ses caractéristiques, ainsi que la détection des sources potentielles de pollution.

2. Préparation des équipements nécessaires

2.1. Consignes de sécurité

- ☞ Choisir un accès facile au point de prélèvement.
- ☞ Éviter tout contact direct avec l'échantillon.
- ☞ Porter la blouse, les gants et la bavette.
- ☞ Vérifier et préparer tout le matériel nécessaire.
- ☞ Ramasser et éliminer les déchets utilisés conformément aux protocoles.

2.2. Appareillages

- ☞ Appareil de mesure multi paramètre (type HACH).
- ☞ Récipients pour échantillonnage.
- ☞ Équipement de prélèvement.
- ☞ Fiche d'observation terrain.
- ☞ Étapes de calibrage (vérifier et ajuster les instruments de mesure avant chaque utilisation).

2.3. Matériels

- ☞ Seau de prélèvement en plastique.
- ☞ Glaisière (glacière de transport).
- ☞ Flacons en verre.
- ☞ Flacons en plastique PET (polyéthylène téréphtalate).
- ☞ Sacs en plastique ou boîtes pour prélèvement des sédiments.

3. Prélèvement des échantillons

La collecte d'un échantillon d'eau représente une étape sensible qui nécessite une grande précision et une méthode rigoureuse. La qualité de l'échantillon prélevé influence directement la validité des résultats analytiques ainsi que leur interprétation (*CCME, 2011*).

Il est donc primordial que l'échantillon soit représentatif de l'état réel de l'eau au moment du prélèvement, sans modification de ses caractéristiques physiques ou chimiques, notamment en ce qui concerne les gaz dissous et les particules en suspension.

Pour garantir la fiabilité des résultats, il est indispensable de mettre en place une démarche structurée, de confier cette tâche à un personnel compétent, de choisir avec soin les points de prélèvement, d'adopter une méthode adaptée au contexte et d'utiliser du matériel conforme aux exigences techniques. En pratique, les erreurs rencontrées lors de l'interprétation des données sont bien souvent liées à une mauvaise procédure d'échantillonnage plutôt qu'à une défaillance dans l'analyse elle-même.

Par ailleurs, il est fortement déconseillé de prélever des échantillons composites s'étalant sur plus de 24 heures, afin de préserver la représentativité des données recueillies.

Une attention particulière a également été portée à la propreté et à la nature du matériel utilisé pour le prélèvement, la conservation et le transport des échantillons, dans le but de limiter au maximum les risques de contamination.



Photo. V.4: Prélèvement d'échantillons

3.1. Méthodes de prélèvement

La méthode de prélèvement dépendra de la source d'eau. Pour une rivière (oued), une nappe phréatique à ciel ouvert, un réservoir ou une citerne, l'échantillonnage doit se faire en immergeant la bouteille à une profondeur intermédiaire, soit environ 50 cm sous la surface et au-dessus du fond. Le prélèvement doit être réalisé à une certaine distance des rives, des obstacles naturels ou artificiels, et en dehors des zones stagnantes ou soumises à des remous, tout en veillant à ne pas perturber les dépôts présents (**Rodier, 2009**).

Le volume requis pour effectuer une analyse complète de l'eau varie généralement entre 2 et 5 litres, sans compter les prélèvements spécifiques. Certaines mesures, telles que l'oxygène dissous, le pH, le potentiel d'oxydo-réduction, la température ou la conductivité, doivent être effectuées directement sur le terrain, car elles ne supportent pas de délai (**Rodier, 2009**).

En règle générale, un transport à une température de 4 °C, à l'abri de la lumière, dans des contenants isothermes, permet une bonne conservation des échantillons jusqu'à leur analyse.

3.2. Le remplissage

Après le prélèvement, les flacons en verre ou en plastique conçus spécialement pour l'échantillonnage sont remplis en fonction des paramètres à analyser. Avant cela, ils sont rincés deux à trois fois avec l'eau de l'échantillon afin d'éviter toute contamination.

Une fois remplis, les flacons sont soigneusement fermés de manière étanche, puis placés dans une glacière pour assurer un transport dans des conditions optimales (**Rodier, 2009**).

3.3. L'Étiquetage

Chaque échantillon d'eau prélevé doit être muni d'une étiquette indiquant toutes les informations essentielles, telles que la date, l'heure, le lieu exact de prélèvement, la profondeur, et le climat. Cette étape constitue ce qu'on appelle la codification de l'échantillon.

Il est également essentiel de préciser que tout le matériel utilisé pour le prélèvement doit être propre et soigneusement nettoyé, avant et après usage, à l'aide d'eau et de détergent. Par ailleurs, les conditions de conservation des échantillons varient selon les paramètres à analyser en laboratoire (*Rodier, 2009*).

3.4. Conservation des échantillons

Certains paramètres sont sensibles aux conditions de transport et de stockage. Afin d'obtenir des résultats d'analyse fiables, il est essentiel de choisir les récipients pour les échantillons de manière appropriée, et de garantir que les échantillons soient conservés selon les normes définies (*Rodier, 2009*).

B. PARAMETRES D'ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES

Les paramètres physico-chimiques de l'eau peuvent être mesurés en continu à l'aide de sondes installées dans des stations de surveillance de la qualité de l'eau. Ces analyses permettent de déterminer la nature et la concentration de différents éléments physiques et chimiques présents dans l'eau. Elles peuvent être réalisées directement sur site ou en laboratoire, et sont souvent complétées par des analyses biologiques afin d'obtenir une vision globale de la qualité de l'eau.

Les résultats obtenus permettent d'identifier les sources de pollution, de vérifier l'efficacité des systèmes de traitement de l'eau, et de suivre l'évolution de la qualité de l'eau dans le temps. Les normes de qualité sont fixées par des organismes internationaux comme l'Organisation mondiale de la santé (OMS) ou par les autorités locales, sur la base des données scientifiques fiables.

☞ **L'analyse physique** : porte sur des paramètres tels que la température, la salinité, le pH, l'oxygène dissous, les solides dissous totaux, la dureté, la turbidité et la conductivité.

☞ **L'analyse chimique** : inclut la mesure de la demande biologique en oxygène (DBO₅), la demande chimique en oxygène (DCO), les matières en suspension et décantables, le chlore résiduel, l'azote total, les huiles et graisses, le phosphore, les ortho-phosphates et les métaux lourds.

1. Paramètres mesurés in-situ

Certaines variables doivent impérativement être mesurées directement sur le terrain, soit à l'aide de capteurs portables, soit par d'autres méthodes, en complément des analyses réalisées en laboratoire. Cette répétition apparente des mesures s'explique par le fait que les échantillons peuvent subir des modifications au cours de leur transport entre le site de prélèvement et le laboratoire.

Il est essentiel de mesurer la température immédiatement après le prélèvement, à partir d'un échantillon distinct qui ne sera pas utilisé pour d'autres analyses. De plus, la concentration d'oxygène dissous est généralement déterminée à l'aide d'un appareil spécifique ou par la méthode de Winkler.

Deux autres paramètres, le pH et la conductivité spécifique, doivent également être mesurés sur place pour détecter toute variation pendant le transport. Quant à la turbidité, elle est souvent mesurée directement sur le terrain, parfois même en continu tout au long de la session d'échantillonnage.

1.1. Mesure du potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH de l'eau permet de mesurer la concentration en ions hydrogène (H^+) présents dans l'eau. Il reflète la stabilité de l'équilibre chimique entre les différentes formes de l'acide carbonique, et est étroitement lié au système tampon constitué principalement des carbonates et bicarbonates.

La mesure du pH se fait à l'aide d'un pH-mètre, un appareil qui indique aussi la température de l'échantillon (en degrés Celsius). Les valeurs sont directement affichées à l'écran de l'instrument.

1.1.1. Principe

Il s'agit d'une méthode potentiométrique, basée sur l'utilisation d'une électrode de verre spécialement conçue pour détecter les ions hydrogène (H^+). Le pH exprime le niveau d'acidité d'une solution, en représentant la concentration en ions H^+ (ou H_3O^+) selon la relation suivante :

$$\text{pH} = -\log[H_3O^+] \quad [\text{V.1}]$$

Un pH-mètre est un appareil électronique équipé d'un millivoltmètre connecté à deux électrodes réunies dans une même sonde. Il mesure la différence de potentiel entre ces électrodes, une valeur qui est directement corrélée au pH de la solution dans laquelle la sonde est plongée.



Photo. V.5: pH mètre de laboratoire.

La mesure du pH de l'échantillon d'eau est réalisée directement sur place à l'aide d'un appareil multi-paramètre de la marque HACH.

1.1.2. Mode opératoire

- ☞ Mettre l'appareil en marche et attendre sa stabilisation.
- ☞ Rincer l'électrode à l'eau distillée puis la sécher avec du papier absorbant.
- ☞ Immerger l'électrode dans l'échantillon d'eau.
- ☞ Lire la valeur affichée à l'écran.
- ☞ Rincer à nouveau l'électrode à l'eau distillée et la sécher.
- ☞ Éteindre l'appareil.

1.2. Mesure de la température (T°)

La température de l'eau influence plusieurs propriétés physiques et chimiques telles que la densité, la viscosité, la solubilité des gaz, la dissociation des sels dissous, ainsi que le déroulement des réactions chimiques et biochimiques. Elle impacte également le

développement et la croissance des organismes aquatiques, en particulier les micro-organismes (*Benkaddour, 2015*).

La mesure de la température de l'échantillon d'eau est réalisée directement sur le terrain à l'aide d'un appareil multi-paramètre.

1.2.1. Mode opératoire

- ☞ Allumer l'appareil et patienter jusqu'à sa stabilisation.
- ☞ Rincer l'électrode à l'eau distillée puis la sécher avec du papier absorbant.
- ☞ Immerger l'électrode dans l'échantillon d'eau.
- ☞ Relever la valeur indiquée à l'écran.
- ☞ Rincer à nouveau l'électrode à l'eau distillée et la sécher.
- ☞ Éteindre l'appareil.

1.2.2. Expression des résultats

Les mesures sont exprimées en degrés Celsius (°C).

1.3. Mesure de la turbidité

La turbidité correspond à la mesure de la capacité d'un échantillon à diffuser et absorber la lumière, plutôt que de la transmettre. Elle résulte de la présence de particules en suspension telles que les colloïdes, les algues, les micro-organismes ou encore l'argile [11].

Plus la concentration de ces particules est élevée, plus la lumière est diffusée et absorbée.



Photo. V.6 : Turbidimètre de laboratoire.

1.3.1. Mode opératoire

Après avoir calibré le turbidimètre :

- On remplit une cuvette d'eau distillée jusqu'au repère, puis on essuie soigneusement l'extérieur du récipient avec du papier absorbant pour éliminer toute goutte d'eau ou trace de doigt pouvant fausser la mesure.
- On procède ensuite rapidement à la mesure, en s'assurant qu'aucune bulle d'air n'est présente dans l'échantillon.
- Enfin, on lit et note la valeur affichée à l'écran. (*Norme : 5 NTU, Annexe. 01*).

1.4. Mesure de la conductivité électrique (CE)

La conductivité est mesurée à l'aide d'un appareil appelé conductivimètre. Cet appareil est équipé d'une sonde qu'on plonge dans l'échantillon.

La conductivité spécifique correspond à la mesure de la conductivité de l'eau à une température de référence de 25°C. Cette normalisation permet de comparer les résultats de manière cohérente. Elle est essentielle pour estimer la concentration en sels dissous, un paramètre directement lié à la qualité de l'eau, en indiquant la présence de substances dissoutes [12].

Cette mesure joue un rôle clé dans l'analyse des variations saisonnières et dans la détection d'éventuelles anomalies, telles que des sources de pollution.

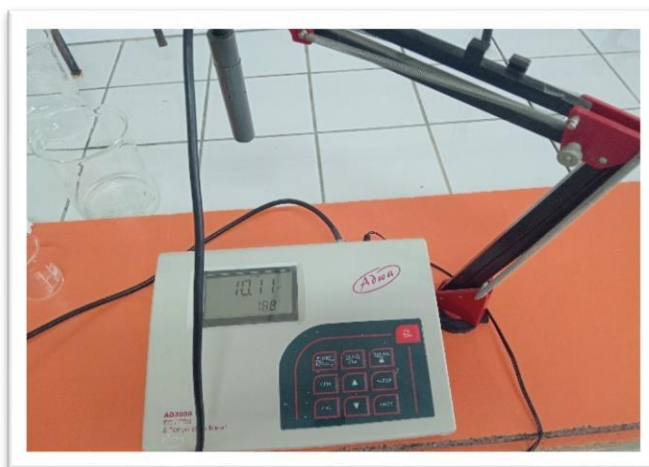


Photo. V.7: Conductivimètre de laboratoire.

1.4.1. Mode opératoire

- ☞ Allumer l'appareil et attendre qu'il se stabilise.
- ☞ Rincer l'électrode avec de l'eau distillée, puis la sécher à l'aide d'un papier absorbant.
- ☞ Plonger la sonde dans l'échantillon d'eau à analyser.
- ☞ Lire la valeur affichée à l'écran.
- ☞ Rincer à nouveau l'électrode avec de l'eau distillée et la sécher.
- ☞ Éteindre l'appareil.

1.4.2. Expression des résultats

Les résultats de conductivité sont exprimés en microsiemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

1.5. Mesure de l'Oxygène dissous (OD)

L'oxygène dissous joue un rôle vital dans les milieux aquatiques. Il est indispensable à la respiration des organismes aquatiques, à la dégradation de la matière organique ainsi qu'au processus de photosynthèse.

Une concentration suffisante en oxygène dissous favorise le maintien de la vie aquatique. En revanche, un déficit peut provoquer des déséquilibres écologiques importants, allant jusqu'à l'asphyxie des poissons et à la dégradation de la qualité de l'eau.

Le maintien d'un niveau adéquat en oxygène dissous est donc essentiel pour préserver la santé et le bon fonctionnement des écosystèmes aquatiques.

Plusieurs facteurs influencent cette concentration, notamment la pression atmosphérique, la température, la profondeur, la salinité et l'activité biologique [12].

La mesure de l'oxygène dissous dans l'échantillon d'eau a été réalisée à l'aide d'un appareil multi-paramètre équipé d'une sonde spécifique à l'OD, selon le protocole en vigueur du laboratoire régional de l'environnement.



Photo. V.8: Oxymètre de laboratoire.

1.5.1. Mode opératoire

Le protocole de mesure de l'oxygène dissous est identique à celui utilisé pour les paramètres précédents. Le même appareil multi-paramètre est utilisé, avec pour seule différence le remplacement de la sonde par une sonde spécifique à la mesure de l'oxygène dissous.

- ☞ Allumer l'appareil et attendre qu'il se stabilise.
- ☞ Rincer l'électrode avec de l'eau distillée, puis la sécher à l'aide d'un papier absorbant.
- ☞ Plonger la sonde dans l'échantillon d'eau.
- ☞ Lire la valeur affichée à l'écran.
- ☞ Rincer de nouveau l'électrode avec de l'eau distillée et la sécher.
- ☞ Éteindre l'appareil.

1.5.2. Expression des résultats

Les résultats obtenus sont exprimés en milligrammes d'oxygène par litre (mg O_2/L).

2. Paramètres physico-chimiques mesurés au laboratoire

Au laboratoire, les échantillons font l'objet de plusieurs types d'analyses. En général, celles-ci portent sur des paramètres dits classiques comme le pH, la conductivité spécifique, la salinité et la température.

On analyse également les solides (totaux, en suspension, dissous, organiques et inorganiques), les nutriments (formes variées d'azote, de phosphore et de carbone), les

métaux (sous forme totale, dissoute ou extractible), ainsi que les pesticides et divers composés organiques complexes, notamment les PCB, les HAP, les dioxines et les furanes.

Comme précisé auparavant, des paramètres comme le pH, la conductivité spécifique et la turbidité doivent être mesurés aussi bien sur le terrain qu'à la réception au laboratoire, afin de vérifier s'il y a eu des changements durant le transport.

De plus, il est courant en laboratoire de mesurer la température à l'arrivée, ce qui permet de juger si les échantillons ont été suffisamment refroidis pendant le transport, selon les conditions climatiques. Les échantillons prélevés en hiver sont généralement plus froids que ceux recueillis en été, et subissent moins de réchauffement.

Une description détaillée des méthodes normalisées d'analyse utilisées au sein du laboratoire de la STEP de Maghnia sera présentée ultérieurement. La majorité des paramètres ont été analysés à l'aide d'un spectrophotomètre de laboratoire HACH, modèle DR/3900.

2.1. Mesure des matières en suspension (MES)

La méthode de filtration employée par le Laboratoire Régional de l'Environnement pour mesurer les matières en suspension est conforme à la norme (ISO 11923/1997). Cette méthode consiste à effectuer une filtration sur filtre en fibres de verre, conformément à la norme algérienne (NA 6345).

2.1.1. Principe

À l'aide d'un dispositif de filtration sous vide ou sous pression, l'échantillon d'eau est filtré à travers un filtre en fibres de verre. Le filtre est ensuite séché dans une étuve à une température de $105\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$, puis la masse des résidus retenus est déterminée par pesée.

2.1.2. Mode opératoire

- ☞ Laisser l'échantillon d'eau atteindre la température ambiante (environ 25 °C).
- ☞ Vérifier que les filtres répondent à la condition selon laquelle la perte de masse ne doit pas dépasser $0,3\text{ mg}$ par filtre.
- ☞ Peser le filtre à l'aide d'une balance de précision.
- ☞ Éviter toute contamination par la poussière en manipulant le filtre à l'aide d'un dessiccateur.
- ☞ À l'aide d'une pince, placer la face lisse du filtre vers le bas dans l'entonnoir de filtration, puis connecter l'appareil au système d'aspiration (sous vide ou sous pression).
- ☞ Agiter énergiquement le flacon contenant l'échantillon, puis transférer immédiatement 100 ml dans une éprouvette graduée.
- ☞ Filtrer l'échantillon, rincer ensuite l'éprouvette avec environ 20 ml d'eau distillée et utiliser cette eau pour laver le filtre. Rincer également les parois internes de l'entonnoir avec 20 ml d'eau distillée supplémentaires. Si l'échantillon contient plus de 1000 mg/L de matières dissoutes, effectuer un lavage supplémentaire du filtre avec trois fois 50 ml d'eau distillée. Veiller à bien rincer le bord du filtre.
- ☞ Une fois que le filtre est presque sec, interrompre l'aspiration (vide ou pression).
- ☞ Retirer délicatement le filtre de l'entonnoir à l'aide d'une pince à bouts plats.
- ☞ Placer le filtre sur un support de séchage et le faire sécher dans une étuve à $105\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ pendant 2 heures.

- ☞ Sortir le support de l'étuve et le placer dans un dessiccateur jusqu'à refroidissement.
- ☞ Peser à nouveau le filtre selon la même méthode que précédemment.



Photo. V.9: Etuve de laboratoire.

2.1.3. Expression des résultats

Le dosage des Matières en Suspension (M.E.S) est exprimé en milligrammes par litre (mg/L). Il est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{MES} = \frac{(P_1 - P_0) * 1000}{V_e} \quad [\text{V.2}]$$

Où :

$$P_0 = b_0 - a_0$$

$$P_1 = b_1 - a_1$$

b_0 : Masse du filtre après filtration du blanc (en mg)

a_0 : Masse du filtre avant filtration du blanc (en mg)

b_1 : Masse du filtre après filtration de l'échantillon (en mg)

a_1 : Masse du filtre avant filtration de l'échantillon (en mg)

V_e : Volume de l'échantillon en millilitres (ml)

2.2. Mesure de la demande biochimique en oxygène (DBO₅)

2.2.1. Principe

La mesure de la Demande Biochimique en Oxygène (DBO) est un paramètre essentiel dans la gestion des ressources en eau. Elle permet d'évaluer la qualité de l'eau et l'efficacité des différentes étapes du traitement biologique des eaux usées. Ce paramètre est également crucial pour la planification et la conception des stations d'épuration.

La DBO sur 5 jours (DBO₅) correspond à la quantité d'oxygène consommée par les micro-organismes pour dégrader la matière organique contenue dans l'eau, pendant une période de 5 jours à une température constante de 20°C.

Cette mesure est réalisée à l'aide d'un dispositif Oxitop IS 6, un système de mesure basé sur la méthode manométrique [13].

2.2.2. Mode opératoire

☞ Préparation de l'eau de dilution : Pour chaque litre d'eau de dilution, ajouter successivement :

- ☞ 1 ml de solution tampon de phosphate.
- ☞ 1 ml de solution de chlorure de fer hexa hydraté ($Fe Cl_3 6H_2O$).
- ☞ 1 ml de solution de sulfate de magnésium heptahydraté ($Mg SO_4 7H_2O$).

❖ Saturation en oxygène : Saturer cette eau avec de l'oxygène en utilisant un compresseur à air pendant 10 minutes (barbotage).

❖ Température : Laisser reposer la solution jusqu'à atteindre la température ambiante (20°C).

❖ Ajustement du pH : Régler le pH de la solution entre 6 et 8.

❖ Préparation des dilutions : Prélever 10 ml de l'échantillon à l'aide d'une pipette jaugée et les transférer dans une fiole de 100 ml. Compléter avec de l'eau distillée pour obtenir une dilution au 1/10.

❖ Préparation des échantillons : Prélever 7 ml, 15 ml et 30 ml de cette solution diluée et les introduire dans des fioles spéciales pour la DBO_5 .

❖ Préparation des blancs : Préparer deux fioles de DBO avec uniquement l'eau de dilution (blancs).

❖ Ajout de l'eau de dilution : Transvaser 350 ml de l'eau de dilution dans une éprouvette d'un litre, agiter pendant 20 secondes, puis remplir toutes les fioles (blancs et échantillons dilués).

❖ Mesure initiale de l'oxygène : Mesurer la teneur en oxygène dissous à l'aide d'un oxymètre sous agitation. Cette valeur correspond à la DBO initiale.

❖ Incubation et mesure finale : Placer les fioles dans un incubateur à 20°C pendant 5 jours. Après incubation, mesurer à nouveau la DBO. Cette deuxième valeur représente la DBO_5 finale.

2.2.3. Expression des résultats

La valeur de la Demande Biochimique en Oxygène sur 5 jours (DBO_5) s'exprime en milligrammes d'oxygène par litre ($mg O_2/L$). Elle est déterminée à l'aide de l'équation suivante :

$$DBO_5 = [(DBO_1 - DBO_2) * F * V_t * V_e] \quad [V.3]$$

Où :

DBO_1 : Concentration initiale en oxygène dissous (mg/L).

DBO_2 : Concentration en oxygène dissous après 5 jours (mg/L).

V_t : Volume total dans la fiole (ml).

V_e : Volume de l'échantillon prélevé (ml).

F : Facteur de dilution.

2.3. Mesure de la demande chimique en oxygène (DCO)

La détermination de la Demande Chimique en Oxygène (DCO) est effectuée conformément à un protocole établi par le Laboratoire Régional de l'Environnement, en respectant la norme algérienne (NA : 1134) ainsi que la norme internationale (ISO : 6060/1989).

2.3.1. Principe

La Demande Chimique en Oxygène (DCO) correspond à la quantité d'oxygène consommée par la matière organique dissoute et en suspension lors de l'oxydation de l'échantillon d'eau, en présence d'un oxydant, sous des conditions spécifiées.

2.3.2. Mode opératoire

- ↻ Laisser l'échantillon d'eau jusqu'à ce qu'il atteigne la température ambiante (25°C).
- ↻ Prélever 10 ml d'échantillon à l'aide d'une pipette et les verser dans le tube à réaction.
- ↻ Sous la hotte aspirante, ajouter 5 ml \pm 0,01 ml de solution de Dichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$) dans le tube à réaction et agiter doucement.
- ↻ Ajouter doucement 15 ml de solution de Sulfate d'Argent (Ag_2SO_4) dans le tube à réaction.
- ↻ Placer les tubes à réaction dans le monobloc chauffant.
- ↻ Porter la température à $148^\circ C \pm 3^\circ C$ et chauffer pendant 120 minutes en appuyant sur le bouton ENTER sur le bloc de commande.
- ↻ Après l'arrêt automatique du chauffage, retirer les tubes du bloc chauffant et les laisser refroidir jusqu'à 60°C. Rincer ensuite les tubes à réaction avec un petit volume d'eau.
- ↻ Placer les tubes dans un système de refroidissement avec agitation jusqu'à ce qu'ils soient complètement refroidis.
- ↻ Ajuster les volumes des tubes à réaction à 100 ml avec de l'eau distillée.
- ↻ Mettre un barreau magnétique dans chaque tube et ajouter quelques gouttes de solution de Ferroïne (indicateur) [$C_{36}H_{24}Fe N_6O_4S$].
- ↻ Titrer l'excès de Dichromate de potassium avec une solution de Sulfate de Fer (II) Ammonium [$(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$]. Le virage du colorant passe du bleu-vert au rouge-marron.
- ↻ Noter le volume du titrant de Sulfate de Fer (II) Ammonium en millilitres (ml).



Photo. V.10: Bloc chauffant de laboratoire.

2.3.3. Expression des résultats

La Demande Chimique en Oxygène (DCO), exprimée en milligrammes d'oxygène par litre (mg/L), est calculée à partir de l'équation suivante :

$$[\text{DCO}] \text{ /L} = \frac{8000 * 0.12 * (V_0 - V_1)}{V_e} \quad [\text{V.4}]$$

Où :

- DCO : Concentration de la demande chimique en oxygène (en mg/L).
- C : Concentration du sulfate d'ammonium ferreux (II) (en mol/L).
- V_e : Volume d'échantillon utilisé pour le dosage sans dilution (en ml).
- V_0 : Volume consommé de sulfate d'ammonium ferreux (II) pour l'échantillon témoin (en ml).
- V_1 : Volume consommé de sulfate d'ammonium ferreux (II) pour l'échantillon d'eau (en ml).
- 8000 : Masse molaire de 1/2 mol d'oxygène (en mg/L).

2.4. Mesure de l'Azote ammoniacal (NH_4^+)

Les eaux naturelles ou usées contiennent systématiquement de l'azote ammoniacal, issu de la décomposition de l'azote organique présent dans des composés tels que les protéines, les acides aminés ou l'urée. Cependant, sa concentration dans les eaux naturelles devrait rester faible, car l'ammoniac est généralement oxydé en nitrites, puis en nitrates.

2.4.1. Principe

L'azote ammoniacal peut être quantifié de manière suffisamment précise à l'aide d'un titrage acide-base.

2.4.2. Réactifs

- ✓ Solution d'acide sulfurique (H_2SO_4).
- ✓ Indicateur : Rouge de méthyle à 2 %.

2.4.3. Mode opératoire

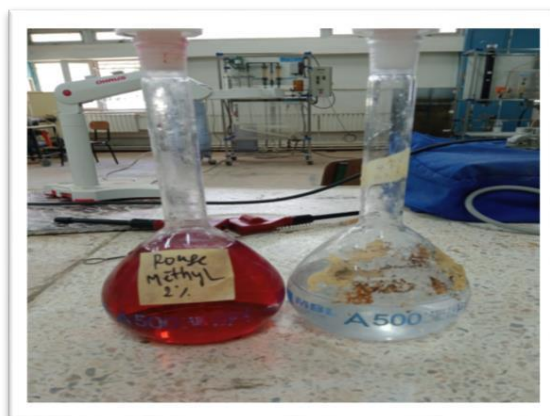


Photo. V.11: Les solutions.

- ☞ Prélever 10 ml de l'échantillon à analyser.
- ☞ Ajouter 2 gouttes de rouge de méthyle à 2 % (la solution prend une coloration rouge).
- ☞ Titrer avec la solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) à 0,1 N jusqu'à virage du rouge vers un rose clair.

∞ Calcul de la Concentration en Azote Ammoniacal (mg/L)

La concentration en azote ammoniacal est donnée par la formule :

$$NH_4^+ = \frac{(V_2 - V_1) \times 0.1 \times 1000 \times 18}{V} \quad [V.5]$$

Où :

V₂ = Volume d'acide sulfurique versé pour l'échantillon (ml).

V₁ = Volume d'acide sulfurique versé pour le témoin (eau distillée) (ml).

V = Volume de la prise d'essai (10 ml dans ce cas).

2.4.4. Expression des résultats

Le résultat est exprimé en mg/L d'azote ammoniacal.

2.5. Dosage des nitrates (NO₃⁻)

2.5.1. Objectif

Déterminer la concentration en ions nitrate (NO₃⁻) dans un échantillon d'eau en utilisant la spectrophotométrie UV, avec correction des interférences dues aux matières organiques.

2.5.2. Expression des résultats

- ∞ Les nitrates absorbent fortement à 220 nm.
- ∞ Les matières organiques absorbent à la fois à 220 nm et 275 nm.
- ∞ La mesure à 275 nm permet de corriger l'absorption parasite due aux composés organiques.

2.5.3. Matériel et réactifs

- ∞ Spectrophotomètre UV-Visible (avec cuvettes en quartz).
- ∞ Solutions étalons (0.5, 1, 2, 3, 4, 5 mg/L NO₃⁻) préparées à partir de NaNO₃ (1.372g/L).
- ∞ Eau distillée (pour le blanc et les dilutions).
- ∞ Fioles jaugées, pipettes.

2.5.4. Mode opératoire

- ∞ Préparation des solutions étalons.
- ∞ Diluer la solution mère de NaNO₃ pour obtenir des étalons à 0,5 – 5 mg/L NO₃⁻.
- ∞ Réglage du spectrophotomètre.
- ∞ Allumer l'appareil et laisser stabiliser.
- ∞ Régler successivement les longueurs d'onde :
 - 220 nm (absorption des nitrates + interférences)
 - 275 nm (absorption des seules matières organiques)
- ∞ Effectuer le blanc avec de l'eau distillée.
- ∞ Mesure des absorbances pour chaque étalon et l'échantillon inconnu (λ₂₂₀ et λ₂₇₅).
- ∞ Tracé de la courbe d'étalonnage.
- ∞ Déterminer la concentration.



Photo. V.12: Balance électronique.



Photo. V.13: Les solutions étalon.



Photo. V.14: Spectrophotomètre

2.5.5. Expression des résultats

La concentration en NO_3^- est exprimée en (mg/L).

V. CONCLUSION

L'ensemble des dispositifs et méthodes présentés dans ce chapitre a été sélectionné avec soin afin d'assurer la rigueur scientifique nécessaire à cette étude. La diversité des paramètres mesurés, tant sur le terrain qu'en laboratoire, ainsi que la conformité aux protocoles normalisés, garantissent des données fiables et représentatives.

Cette approche méthodologique constitue une base solide pour l'interprétation des résultats et pour l'évaluation de la faisabilité de la réutilisation des eaux épurées dans l'agriculture, qui fera l'objet des chapitres suivants.

Chapitre VI :

Résultats et Interprétations

Sixième Chapitre : RESULTATS ET INTERPRÉTATIONS

I. INTRODUCTION

Ce chapitre vise à interpréter de manière approfondie les résultats obtenus à l'issue des analyses physico-chimiques des eaux usées avant et après le traitement, ainsi que ceux relatifs aux charges polluantes mesurées à l'entrée et à la sortie de la station d'épuration. Ces données constituent une base essentielle pour évaluer l'efficacité du traitement appliqué et déterminer dans quelle mesure les eaux épurées peuvent être réutilisées en agriculture, conformément aux normes d'irrigation en vigueur.

L'analyse comparative des concentrations des différents paramètres (DCO, DBO₅, MES, nutriments, etc.) avant et après traitement permet de quantifier le rendement épuratoire de la STEP. En parallèle, l'interprétation des résultats issus du modèle prototype développé dans cette étude permet de valider ses performances et d'apprécier sa capacité à reproduire fidèlement le comportement du système réel.

Ce chapitre se propose donc d'établir un lien cohérent entre les observations expérimentales, les normes de référence et les prédictions du modèle, afin d'en tirer des conclusions pertinentes pour l'application pratique et la poursuite de la recherche.

II. RESULTATS ET DISCUSSIONS

1. Résultats des analyses physico-chimiques

Dans cette partie, l'accent sera mis sur l'étude de la qualité des eaux épurées. L'objectif principal est de présenter, d'analyser et de comparer les résultats obtenus aux normes et réglementations algériennes encadrant la qualité des eaux épurées. Une attention particulière est portée aux eaux destinées à l'usage agricole. Les données collectées ont été synthétisées dans les tableaux VI.1, VI.2.

Les expérimentations ont été menées sur une durée approximative de 20 jours.

Tableau. VI.1 : Résultats des analyses physico-chimiques (Entrée STEP)

	pH	T (C°)	MES (mg/L)
Sans javel	5.62	20.9	207.4
Avec javel	5.87	20	102.8
Normes	6.5-8.5	25	30

Tableau. VI.2 : Résultats des analyses physico-chimiques (Sortie de la STEP)

	pH	T (C°)	TUR (NTU)	CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	DCO (mg/L)	O ₂ (mg O ₂ /L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	MES (mg/L)
Avant javellisation	7,98	17,9	5,4	39,4	48	0,48	0,105	0,327	103,8
Après javellisation	7,76	18,2	7,68	40,5	57,6	0,54	0,48	0,381	104
Normes	6,5-8,5	25	/	2800	<90	5	<0,5	<1	30

Les résultats des analyses physico-chimiques des eaux à l'entrée de la station d'épuration (*tableau VI.1*) et à la sortie de la station (*tableau VI.2*) montrent une amélioration partielle de la qualité de l'eau grâce au procédé de traitement. Une hausse marquée du pH a été observée, passant d'un milieu acide dans les eaux brutes (5,62 avant javellisation et 5,87 après javellisation) à un pH proche de la neutralité après traitement (7,98 avant javellisation et 7,76 après javellisation), ce qui reflète un bon ajustement de l'acidité dans les limites acceptables (6,5 – 8,5).

Une diminution significative de la concentration en matières en suspension (MES) a également été relevée, passant de 207,4 mg/L à environ 104 mg/L après traitement. Toutefois, cette valeur demeure au-dessus de la norme recommandée (30 mg/L), indiquant une efficacité limitée du procédé pour l'élimination des particules solides.

Concernant l'effet de l'ajout de javel, on note une légère augmentation de la conductivité électrique (CE) et de la demande chimique en oxygène (DCO), accompagnée d'une hausse notable de la concentration en ions ammonium (NH₄⁺) de 0,105 à 0,48 mg/L, sans toutefois dépasser le seuil autorisé (0,5 mg/L).

Une légère amélioration de l'oxygène dissous (O₂) a également été observée en présence de javel (0,54 mg/L contre 0,48 mg/L), bien que ces valeurs restent nettement inférieures à la norme requise (5 mg/L), suggérant un déficit en aération ou en activité biologique.

En conclusion, le traitement a permis d'améliorer certaines caractéristiques physico-chimiques essentielles de l'eau, sans toutefois atteindre une conformité totale aux normes, notamment en ce qui concerne les MES et l'oxygène dissous. L'ajout de javel n'a pas entraîné d'amélioration significative, et semble même avoir contribué à l'augmentation de certains paramètres indésirables. Il est également possible que les valeurs élevées observées pour certains indicateurs soient dues aux conditions de stockage, notamment le maintien des échantillons au réfrigérateur pendant une longue période, ce qui aurait pu altérer certaines propriétés chimiques de l'eau.

2. Résultats des analyses à l'entrée et la sortie de la STEP

Dans cette partie, l'accent sera mis sur l'étude de la qualité des eaux usées épurées à l'entrées et à la sortie de la STEP.

2.1. Variation temporelle de la Température 'T' à l'entrée et à la sortie de la STEP

Le tableau VI.3, représente les résultats de la variations temporelles des températures 'T' au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.

Tableau. VI.3 : Résultats de la température à l'entrée et à la sortie de la STEP

Mois/ Paramètres	T Entrée (°C)	T Sortie (°C)	Normes
Janv-20	12,19	11,85	30
Fev-2020	15,18	15,4	30
Mars-20	16,21	16,58	30
Avr-20	17,97	18,33	30
Mai-20	21,21	21,95	30
Juin-20	24	24,95	30
Juil-20	25,86	25,28	30
Aout-2020	25,15	25,37	30
Sept-20	23,86	24,27	30
Oct-20	22,83	23,14	30
Nov-20	21,51	21,44	30
Dec-2020	18,51	18,39	30
Janv-21	17,05	17,31	30
Fevr-2021	17,43	17,74	30
Mars-21	17,72	18,08	30
Mars-25	18,58	18,37	30

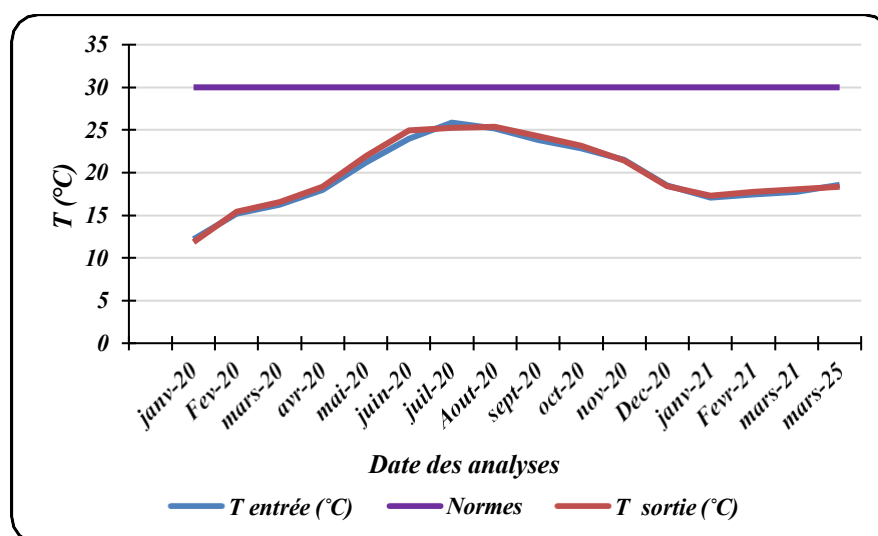


Fig. VI.1 : Variation temporelle de la température au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.

Le diagramme de la **figure VI.1** indique que, durant la période allant de Janvier 2020 à Décembre 2020, de Janvier 2021 à Mars 2021, puis en Mars 2025, les températures relevées dans les eaux au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP varient entre 11,85 °C et 26 °C. Ces valeurs sont en dessous et respectent la norme algérienne, qui fixe une limite maximale de 30 °C.

En comparant les valeurs d'entrée et de sortie de la STEP, on remarque des changements significatifs après le passage de l'eau par les diverses étapes de traitement.

La température diminue légèrement, en grande partie à cause des processus d'aération et de décantation dans la station.

Les valeurs finales de sortie demeurent stables et dans les limites acceptables sur les plans environnemental et sanitaire pour une utilisation agricole, ce qui atteste de l'efficacité du traitement sans compromettre la qualité de l'eau en termes de température. En outre, elles ne présentent aucun risque pour les sols ou les plantes.

Nous concluons donc que l'eau issue de la station est adaptée à l'irrigation agricole, sans qu'il soit nécessaire d'ajuster davantage ce paramètre.

2.2. Variation temporelle du potentiel d'hydrogène 'pH' à l'entrée et à la sortie de la STEP

Le tableau VI.4, représente les variations temporelles du potentiel d'hydrogène 'pH' au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.

Tableau. VI.4 : Résultats du potentiel d'hydrogène à l'entrée et à la sortie de la STEP

Mois/ Paramètres	pH Entrée	pH Sortie	Norme min	Norme max
Janv-20	8,04	8,23	6,5	8,5
Fev-20	8,03	8,19	6,5	8,5
Mars-20	7,74	8,03	6,5	8,5
Avr-20	8	8,15	6,5	8,5
Mai-20	7,92	8	6,5	8,5
Juin-20	7,81	7,86	6,5	8,5
Juil-20	7,66	7,59	6,5	8,5
Aout-20	7,73	7,67	6,5	8,5
Sept-20	7,57	7,6	6,5	8,5
Oct-20	7,54	7,46	6,5	8,5
Nov-20	7,68	7,89	6,5	8,5
Dec-20	8	8,26	6,5	8,5
Janv-21	8,15	8,35	6,5	8,5
Fevr-21	7,81	8,05	6,5	8,5
Mars-21	7,79	7,92	6,5	8,5
Mars-25	7,48	7,49	6,5	8,5

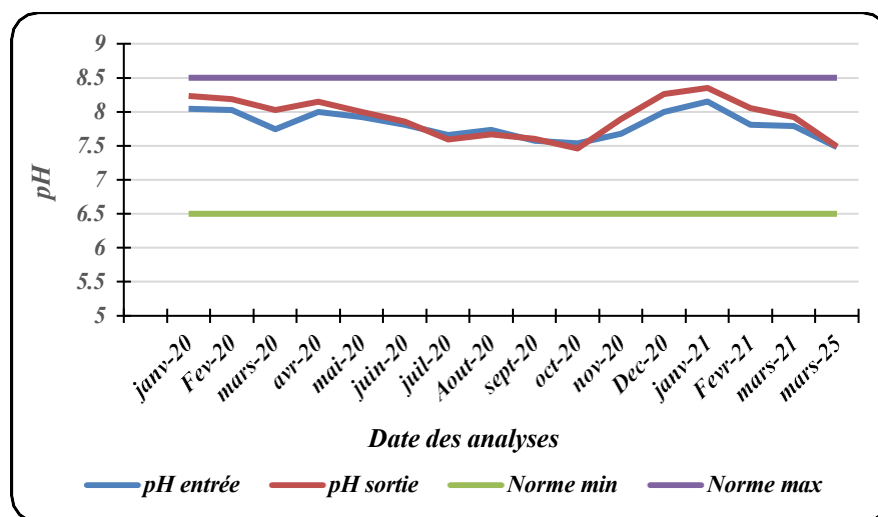


Fig. VI.2 : Variation temporelle du potentiel d'hydrogène au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.

Le diagramme de la **figure VI.2** indique que durant la période allant de janvier 2020 à décembre 2020, de janvier 2021 à mars 2021, puis en mars 2025, les valeurs de pH mesurées au se situent entre 7,46 et 8,35, ce qui reste conforme aux normes algériennes, dont les limites sont fixées entre 6,5 et 8,5.

En comparant les valeurs d'entrée et de sortie de la STEP, on remarque que le potentiel d'hydrogène pH décroît en raison des réactions chimiques et biologiques se produisant dans la station.

Les valeurs finales de sortie demeurent stables et dans les limites acceptables sur les plans environnemental et sanitaire pour une utilisation agricole, ce qui atteste de l'efficacité du traitement sans compromettre la qualité de l'eau en termes de pH. En outre, elles ne présentent aucun risque pour les sols ou les plantes.

2.3. Variation temporelle de l'oxygène dissous 'O₂' à l'entrée et à la sortie de la STEP

Le tableau suivant, représente les variations temporelles de l'oxygène dissous au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.

Tableau. VI.5 : Résultats de l'oxygène dissous à l'entrée et à la sortie de la STEP

Mois/Paramètres	O ₂ Entrée (mg O ₂ /L)	O ₂ Sortie (mg O ₂ /L)	Norme
Janv-20	4,30	7,22	5
Fev-20	3,64	5,96	5
Mars-20	3,37	5,31	5
Avr-20	3,41	6,31	5
Mai-20	2,74	6,18	5
Juin-20	2,44	6,19	5
Juil-20	1,98	5,73	5
Aout-20	1,87	5,08	5
Sept-20	1,92	4,82	5
Oct-20	1,93	3,78	5
Nov-20	2,02	3,62	5
Dec-20	2,21	3,00	5
Janv-21	1,85	3,29	5
Fevr-21	2,14	3,34	5
Mars-21	2,03	3,15	5
Mars-25	2,66	16,00	5

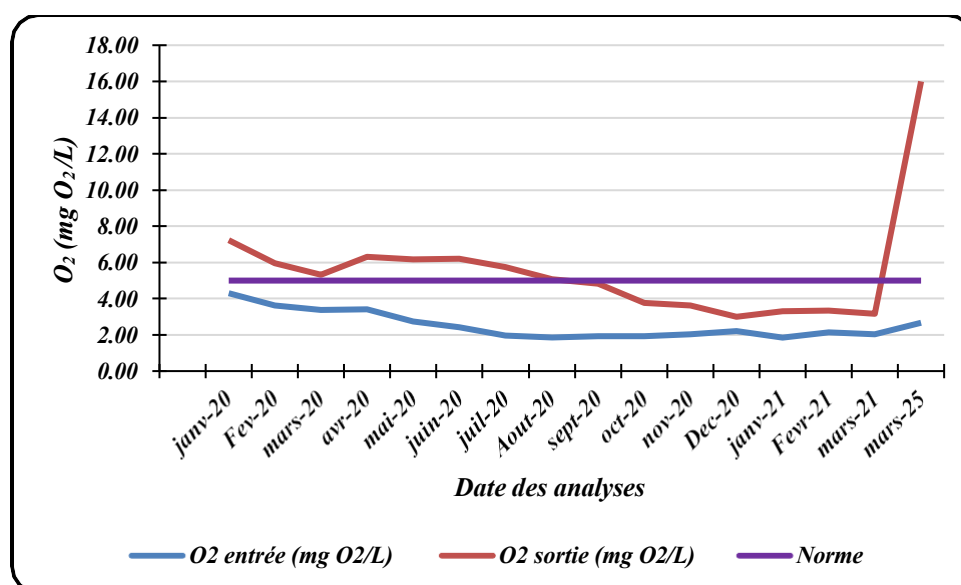


Fig. VI.3 : Variation temporelle de l'oxygène dissous au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.

La figure précédente indique que, durant la période allant de janvier 2020 à décembre 2020, de janvier 2021 à mars 2021, puis en mars 2025, les concentrations en oxygène dissous (O₂) varient entre 1,85 mg/L et 16 mg/L, avec une norme minimale fixée à 5 mg/L.

Il convient de noter que, durant la période de septembre 2020 à mars 2021, les concentrations d'oxygène dissous au niveau de la sortie de la STEP étaient inférieures à la

norme minimale, ce qui peut indiquer une aération insuffisante ou une forte activité biologique à cette étape du traitement.

En comparant les valeurs d'entrée et de sortie de la STEP, on remarque des changements significatifs après le passage de l'eau par les diverses étapes de traitement. L'oxygène dissous tend à augmenter après l'aération, améliorant ainsi la qualité de l'eau.

Les valeurs finales de sortie demeurent globalement stables et dans les limites acceptables sur les plans environnemental et sanitaire pour une utilisation agricole, ce qui atteste de l'efficacité du traitement sans compromettre la qualité de l'eau en termes d'oxygène dissous. En outre, elles ne présentent aucun risque pour les sols ou les plantes.

Nous concluons donc que, malgré une baisse ponctuelle des concentrations en oxygène dissous au niveau de la sortie entre septembre 2020 et mars 2021, l'eau issue de la station reste dans l'ensemble adaptée à l'irrigation agricole, sous réserve d'un bon maintien du système d'aération.

2.4. Variation temporelle des matières en suspension 'MES' à l'entrée et à la sortie de la STEP

Le tableau VI.6, représente les variations temporelles des Matières en suspension au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.

Tableau. VI.6: Résultats des Matières en suspension à l'entrée et à la sortie de la STEP

Mois / Paramètres	MES Entrée (mg/L)	MES Sortie (mg/L)	Norme
Janv-20	302,75	17,75	30
Fev-20	333,50	11,75	30
Mars-20	191,46	4,69	30
Avr-20	145,21	4,38	30
Mai-20	186,79	6,75	30
Juin-20	243,04	9,96	30
Juil-20	231,73	12,86	30
Aout-20	229,44	14,76	30
Sept-20	233,31	13,62	30
Oct-20	232,72	13,88	30
Nov-20	266,16	8,76	30
Dec-20	192,48	6,41	30
Janv-21	223,46	9,83	30
Fevr-21	223,50	7,38	30
Mars-21	240,33	19,96	30
Mars-25	257,38	26,75	30

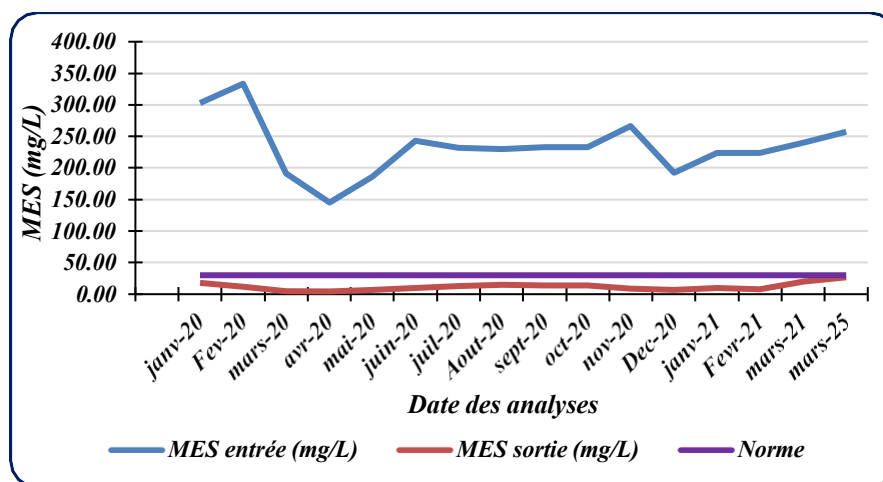


Fig. VI.4 : Variation temporelle des matières en suspension au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.

La figure indique que, durant la période allant de janvier 2020 à décembre 2020, de janvier 2021 à mars 2021, puis en mars 2025, les matières en suspension (MES) fluctuent entre 4,37 mg/L et 302 mg/L, alors que la norme maximale est de 30 mg/L.

En comparant les valeurs d'entrée et de sortie de la STEP, on remarque des changements significatifs après le passage de l'eau par les diverses étapes de traitement. Les matières en suspension sont fortement réduites grâce aux procédés de sédimentation et de filtration.

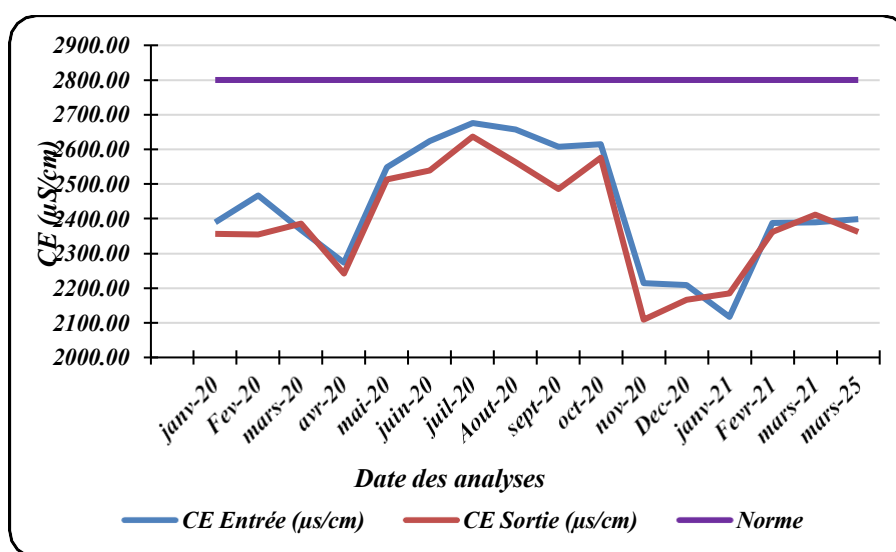
Les valeurs finales de sortie demeurent globalement stables et dans les limites acceptables sur les plans environnemental et sanitaire pour une utilisation agricole, ce qui atteste de l'efficacité du traitement sans compromettre la qualité de l'eau en termes d'MES, à l'exception de la période mentionnée. En outre, elles ne présentent aucun risque pour les sols ou les plantes.

2.5. Variation temporelle de la Conductivité électrique 'CE' à l'entrée et à la sortie de la STEP

Le tableau VI.7, représente les variations temporelles de la Conductivité électrique au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.

Tableau. VI.7: Résultats de la Conductivité électrique à l'entrée et à la sortie de la STEP

Mois/Paramètres	CE Entrée (µs/cm)	CE Sortie (µs/cm)	Norme
Janv-20	2389,58	2356,25	2800
Fev-20	2466,16	2354,16	2800
Mars-20	2368,30	2386,67	2800
Avr-20	2273,54	2242,46	2800
Mai-20	2548,71	2512,92	2800
Juin-20	2624,23	2538,46	2800
Juil-20	2675,91	2636,82	2800
Aout-20	2656,40	2562,40	2800
Sept-20	2606,54	2485,77	2800
Oct-20	2615,20	2576,80	2800
Nov-20	2214,24	2108,96	2800
Dec-20	2209,59	2166,19	2800
Janv-21	2116,96	2184,54	2800
Fevr-21	2387,25	2361,96	2800
Mars-21	2390,00	2411,48	2800
Mars-25	2399,62	2362,69	2800

**Fig. VI.5 :** Variation temporelle de la Conductivité électrique au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.

La figure VI.5 indique que, durant la période allant de janvier 2020 à décembre 2020, de janvier 2021 à mars 2021, puis en mars 2025, les valeurs observées de la conductivité électrique varient entre 2108 µS/cm et 2675 µS/cm, ce qui reste en dessous de la limite maximale recommandée de 2800 µS/cm pour l'utilisation agricole.

Une CE élevée indique une charge saline importante dans l'eau, susceptible d'affecter la croissance des plantes sensibles au sel, notamment en cas d'irrigation prolongée ou dans des sols peu perméables.

En conclusion, l'eau traitée peut être utilisée pour l'irrigation agricole à condition de respecter certaines précautions.

2.6. Variation temporelle de l'Azote ammoniacal 'NH⁺₄' à l'entrée et à la sortie de la STEP

Le tableau VI.8, représente les variations temporelles de l'Azote ammoniacal au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.

Tableau. VI.8: Résultats de l'Azote ammoniacal à l'entrée et à la sortie de la STEP

Mois/Paramètres	NH ⁺ ₄ Entrée (mg/L)	NH ⁺ ₄ Sortie (mg/L)	Norme
Janv-20	64,17	23,14	0,5
Fev-20	62,80	13,46	0,5
Mars-20	36,47	5,12	0,5
Avr-20	39,13	2,98	0,5
Mai-20	43,37	3,47	0,5
Juin-20	36,76	3,22	0,5
Juil-20	51,44	6,94	0,5
Aout-20	59,58	9,28	0,5
Sept-20	47,91	9,88	0,5
Oct-20	54,04	8,32	0,5
Nov-20	54,50	2,42	0,5
Dec-20	43,94	1,78	0,5
Janv-21	38,22	0,97	0,5
Fevr-21	46,80	1,36	0,5
Mars-21	60,59	26,47	0,5
Mars-25	58,33	19,67	0,5

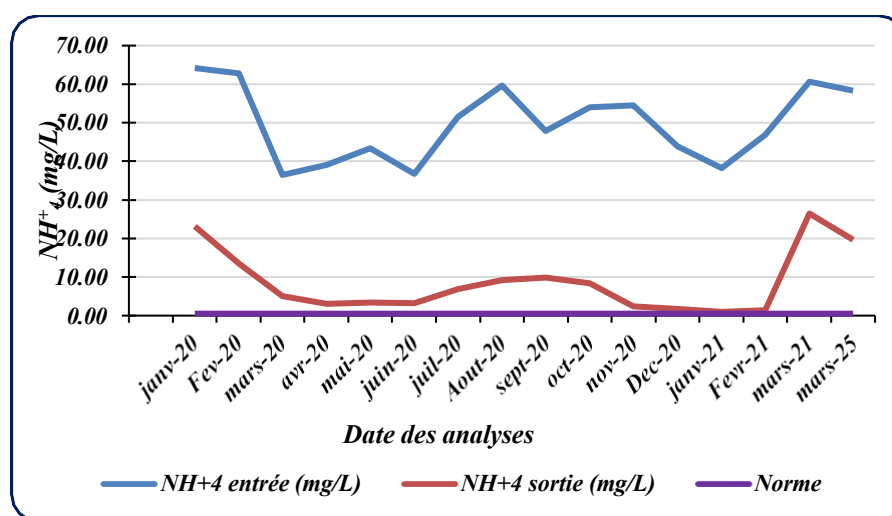


Fig. VI.6 : Variation temporelle de l'Azote ammoniacal au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.

La figure précédente indique que, durant la période allant de janvier 2020 à décembre 2020, de janvier 2021 à mars 2021, puis en mars 2025, les concentrations en ammonium (NH_4^+) varient entre 0,97 mg/L et 64 mg/L, dépassant largement la norme recommandée de 0,5 mg/L. Des teneurs élevées en ammonium peuvent être toxiques pour les plantes et entraîner une pollution azotée si l'eau est utilisée pour l'irrigation, en particulier en sol mal drainé ou acide.

Les données analysées montrent donc que, les teneurs excessives en ammonium nécessitent des précautions particulières avant toute réutilisation de cette eau à des fins agricoles.

En conclusion, l'eau traitée peut être utilisée pour l'irrigation agricole à condition de respecter certaines précautions, notamment en lien avec la teneur en ammonium, afin de préserver la qualité des sols et la santé des cultures.

2.7. Variation temporelle de la demande chimique en oxygène 'DCO' à l'entrée et à la sortie de la STEP

Le tableau VI.9, représente les variations temporelles de la demande chimique en oxygène au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.

Tableau. VI.9: Résultats de la demande chimique en oxygène à l'entrée et à la sortie de la STEP

Mois/Paramètres	DCO Entrée (mg/L)	DCO Sortie (mg/L)	Norme
Janv-20	667,25	20,5	90
Fev-20	708,75	22,08	90
Mars-20	605,5	19,65	90
Avr-20	578,5	31	90
Mai-20	631	35,88	90
Juin-20	702	32,62	90
Juil-20	668	35,44	90
Aout-20	704,5	50	90
Sept-20	711,75	36,45	90
Oct-20	743	34,23	90
Nov-20	638,75	43,63	90
Dec-20	515,75	39,13	90
Janv-21	688,5	39,25	90
Fevr-21	657,25	38,4	90
Mars-21	621	51,75	90
Mars-25	727,75	26,75	90

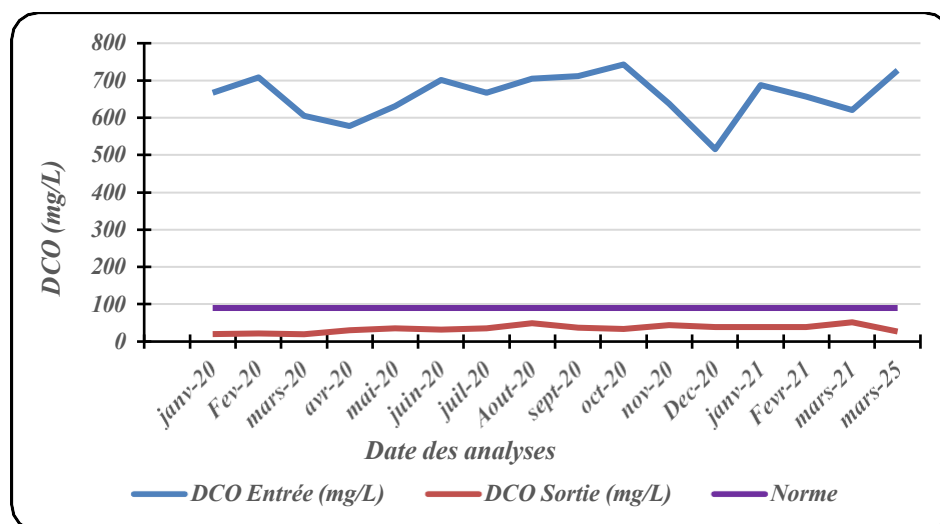


Fig. VI.7 : Variation temporelle de la demande chimique en oxygène au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.

Les données recueillies durant les périodes allant de janvier 2020 à décembre 2020, de janvier 2021 à mars 2021, ainsi qu'en mars 2025, montrent que les concentrations en DCO (demande chimique en oxygène) varient entre 20 mg/L et 730 mg/L, avec des valeurs très élevées à l'entrée de la station.

Cependant, les mesures réalisées à la sortie indiquent une réduction significative de la charge organique, avec des concentrations généralement inférieures à la norme recommandée de 90 mg/L pour une réutilisation agricole. Cela témoigne de la bonne efficacité du système de traitement.

2.8. Variation temporelle de la Demande biochimique en oxygène en 5 jours 'DBO₅' à l'entrée et à la sortie de la STEP

Le tableau VI.10 représente les variations temporelles de la Demande biochimique en oxygène en 5 jours 'DBO₅' au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.

Tableau. VI.10: Résultats de la Demande biochimique en oxygène à l'entrée et à la sortie de la STEP

Mois/Paramètres	DBO ₅ Entrée (mg/L)	DBO ₅ Sortie (mg/L)	Norme
Janv-20	367,67	11,00	30
Fev-20	400	6,00	30
Mars-20	300	9,75	30
Avr-20	363,33	18,00	30
Mai-20	406,67	7,00	30
Juin-20	427,5	7,75	30
Juil-20	470	16,50	30
Aout-20	445	14,75	30
Sept-20	410	16,25	30
Oct-20	742,5	15,75	30
Nov-20	342,5	18,25	30
Dec-20	372,5	5,50	30
Janv-21	405	9,00	30
Fevr-21	420	5,00	30
Mars-21	240	9,00	30
Mars-25	440	7,25	30

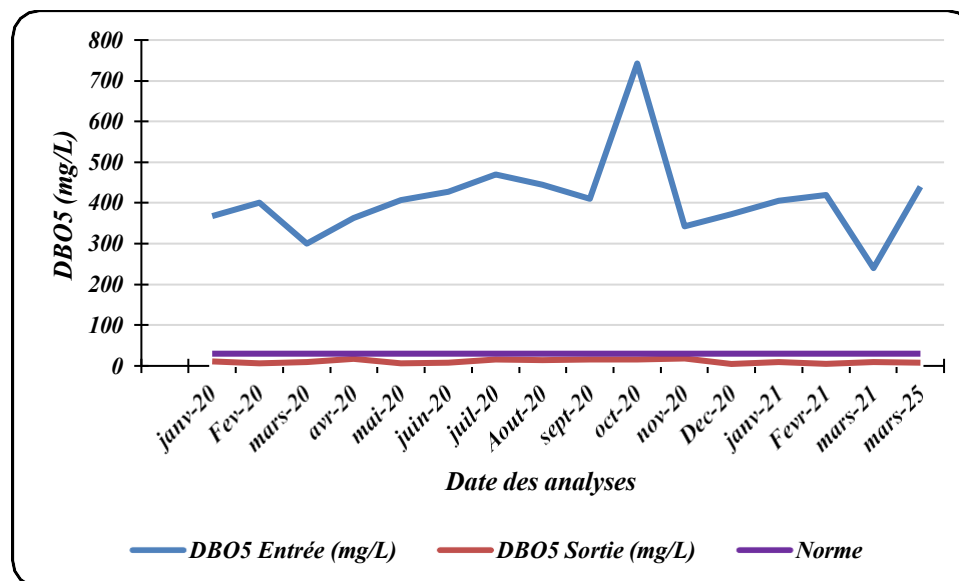


Fig. VI.8 : Variation temporelle de la demande biochimique en oxygène en 5 jours au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.

Les données recueillies durant les périodes allant de janvier 2020 à décembre 2020, de janvier 2021 à mars 2021, ainsi qu'en mars 2025, montrent que les concentrations en DBO₅ (demande biologique en oxygène sur 5 jours), qui fluctuent entre 5 mg/L et 500 mg/L, subissent une nette diminution en sortie, atteignant dans la majorité des cas des niveaux conformes à la limite réglementaire de 30 mg/L.

Ainsi, les valeurs observées en sortie de station montrent une qualité d'eau compatible avec les exigences de l'irrigation agricole, sous réserve d'un suivi régulier. Ces résultats confirment la performance du traitement et soutiennent la possibilité d'une réutilisation sécurisée dans le secteur agricole.

2.9. Rendement d'épuration

Le tableau VI.11 représente les variations temporelles du rendement d'épuration au niveau de la STEP.

Tableau. VI.11: Résultats du rendement d'épuration au niveau de la STEP

Mois	DCO (%)	DBO (%)
Janv-20	97	97
Fev-20	97	99
Mars-20	97	97
Avr-20	95	95
Mai-20	94	98
Juin-20	95	98
Juil-20	95	96
Aout-20	93	97
Sept-20	95	96
Oct-20	95	98
Nov-20	93	95
Dec-20	92	99
Janv-21	94	98
Fevr-21	94	99
Mars-21	92	96
Mars-25	96	98

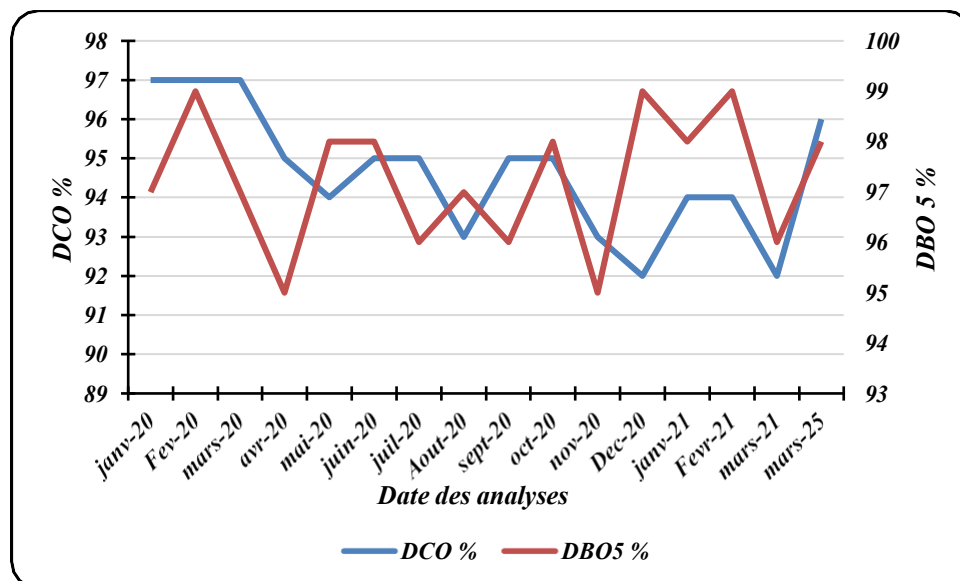


Fig. VI.9 : Variation temporelle du rendement d'épuration de la STEP.

Concernant l'efficacité du traitement en termes de DBO₅ (Demande Biologique en Oxygène sur cinq jours) et de DCO (Demande Chimique en Oxygène), les résultats ont révélé des rendements d'abattement élevés, variant entre 94 % et 99 % pour la DBO₅, et entre 91 % et 98 % pour la DCO.

Ces valeurs traduisent une performance remarquable de la station d'épuration. Les rendements élevés observés pour la DBO₅ indiquent une excellente élimination de la matière organique biodégradable, suggérant des conditions d'exploitation optimales en termes d'aération, de temps de séjour et d'activité microbienne.

De même, les rendements notés pour la DCO montrent une capacité significative à réduire la charge organique totale, y compris les composés difficilement biodégradables, ce qui reflète une bonne complémentarité entre les différentes étapes du traitement.

Ainsi, ces résultats confirment l'efficacité globale de la station en matière de réduction de la pollution organique, renforçant la qualité des eaux traitées et leur potentiel pour une réutilisation sécurisée, notamment en irrigation agricole, dans un contexte de stress hydrique croissant.

2.10. Variation temporelle des Nitrites 'NO₂' à l'entrée et à la sortie de la STEP

Le tableau VI.12 représente les variations temporelles des Nitrites au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.

Tableau. VI.12: Résultats des Nitrites à l'entrée et à la sortie de la STEP

Mois/Paramètres	NO ₂ Entrée (mg/L)	NO ₂ Sortie (mg/L)	Norme
Janv-20	0,15	0,11	1
Fev-20	0,17	0,099	1
Mars-20	0,19	0,16	1
Avr-20	0,15	0,14	1
Mai-20	0,17	0,11	1
Juin-20	0,2	0,1	1
Juil-20	0,19	0,02	1
Aout-20	0,22	0,04	1
Sept-20	0,17	0,05	1
Oct-20	0,22	0,08	1
Nov-20	0,17	0,16	1
Dec-20	0,27	0,04	1
Janv-21	0,21	0,12	1
Fevr-21	0,21	0,05	1
Mars-21	0,16	0,07	1
Mars-25	0,04	0,14	1

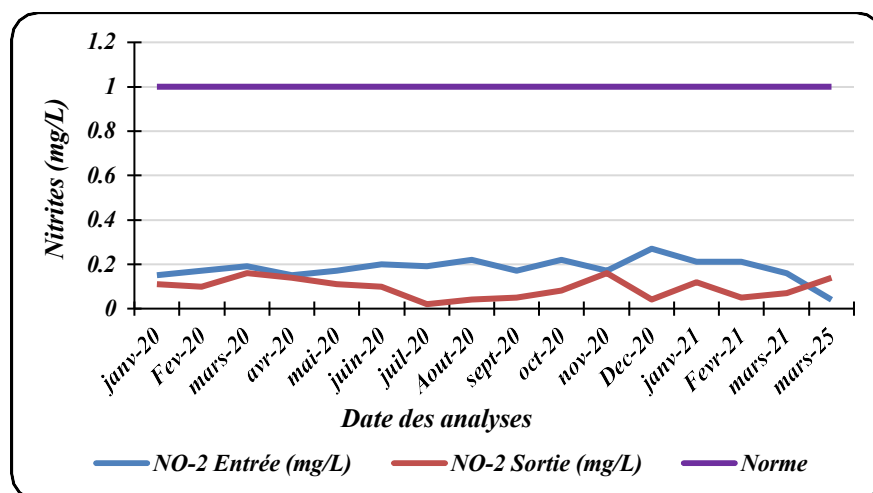


Fig. VI.10 : Variation temporelle des nitrites au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.

Les données collectées indiquent que les concentrations en nitrites (NO_2^-) varient entre 0,04 mg/L et 0,27 mg/L durant les périodes analysées. Ces niveaux, bien qu'ayant montré des fluctuations à l'entrée de la station, sont systématiquement réduits en sortie, atteignant des concentrations inférieures à la norme de 1 mg/L recommandée pour une réutilisation agricole.

2.11. Variation temporelle des Nitrates ' NO_3^- ' à l'entrée et à la sortie de la STEP

Le tableau VI.13 représente les variations temporelles des Nitrates au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.

Tableau. VI.13: Résultats des Nitrates à l'entrée et à la sortie de la STEP

Mois/Paramètres	NO_3^- Entrée (mg/L)	NO_3^- Sortie (mg/L)	Norme
Janv-20	0,53	0,62	1
Fev-20	0,39	0,53	1
Mars-20	0,28	0,6	1
Avr-20	0,32	0,44	1
Mai-20	0,35	0,23	1
Juin-20	0,4	0,1	1
Juil-20	0,42	0,06	1
Aout-20	0,44	0,07	1
Sept-20	0,43	0,07	1
Oct-20	0,51	0,19	1
Nov-20	0,46	0,28	1
Dec-20	0,29	0,43	1
Janv-21	0,48	0,94	1
Fevr-21	0,39	0,24	1
Mars-21	0,34	0,14	1
Mars-25	0,06	0,23	1

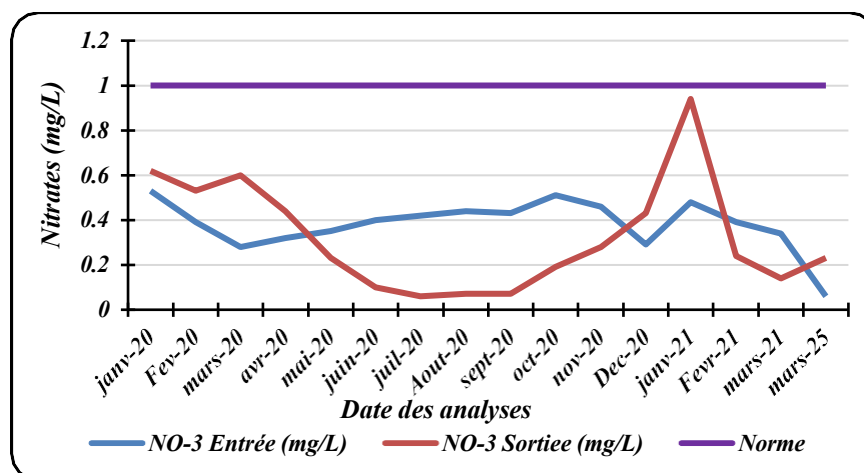


Fig. VI.11 : Variation temporelle des nitrates au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.

Les données collectées indiquent que les concentrations en nitrates (NO_3^-), oscillant entre 0,06 mg/L et 0,94 mg/L, demeurent également en dessous de cette limite en sortie de traitement. Ces résultats témoignent de la capacité du système à éliminer efficacement les composés azotés, renforçant ainsi la conformité de l'eau traitée aux critères de qualité requis pour une utilisation agricole sécurisée. Toutefois, un contrôle régulier reste nécessaire pour garantir la stabilité de ces performances.

2.12. Variation temporelle des Ortho-phosphates ' PO_4^{3-} ' à l'entrée et à la sortie de la STEP

Le tableau VI.14 représente les variations temporelles des Ortho-phosphates au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.

Tableau. VI.14: Résultats des Ortho-phosphates à l'entrée et à la sortie de la STEP

Mois/ Paramètres	PO_4^{3-} Entrée (mg/L)	PO_4^{3-} Sortie (mg/L)	Norme
Janv-20	8,575	0,825	10
Fev-20	14,55	2,205	10
Mars-20	13,75	5,265	10
Avr-20	9,106	10,95	10
Mai-20	14,925	12,275	10
Juin-20	12,54	9,275	10
Juil-20	16,525	12,25	10
Aout-20	15,075	9,075	10
Sept-20	12,05	7,69	10
Oct-20	14,35	9,91	10
Nov-20	15,64	11,35	10
Dec-20	11,1	18,08	10
Janv-21	13,85	21	10
Fevr-21	12,3	9,75	10
Mars-21	11,55	10,23	10
Mars-25	7,23	2,76	10

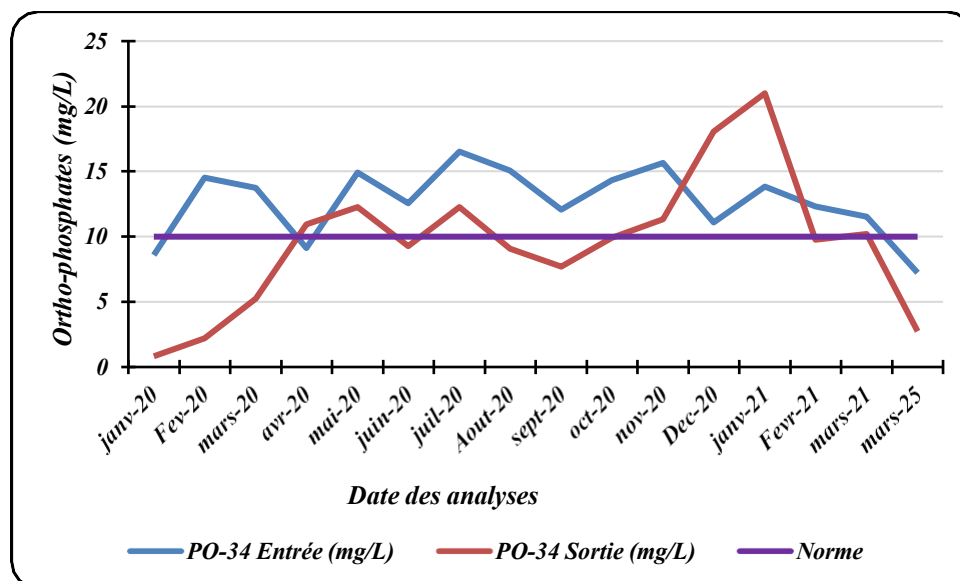


Fig. VI.12 : Variation temporelle des Ortho-phosphates au niveau de l'entrée et de la sortie de la STEP.

Les données collectées indiquent que les concentrations en ortho-phosphates (PO_4^{-3}) varient entre 1 mg/L et 22 mg/L au cours des périodes analysées. Si les valeurs mesurées à la sortie de la station montrent, dans la majorité des cas, une réduction significative par rapport à l'entrée traduisant une bonne efficacité du système de traitement pour l'élimination des composés phosphorés certaines périodes ont cependant enregistré des concentrations anormalement élevées en sortie, atteignant jusqu'à 21 mg/L, soit bien au-delà de la norme de 10 mg/L recommandée pour la réutilisation à des fins agricoles.

Un tel dépassement n'est pas considéré comme normal et pourrait indiquer des dysfonctionnements ponctuels au sein de la station, tels qu'une efficacité réduite des étapes de traitement, une surcharge hydraulique ou organique, ou encore une insuffisance dans le dosage des réactifs chimiques utilisés pour la précipitation du phosphore. Il est donc recommandé de procéder à une analyse approfondie des conditions de fonctionnement durant les périodes concernées afin d'identifier les causes de ces variations et de mettre en place les mesures correctives nécessaires.

De manière générale, les résultats confirment la capacité du système à réduire les concentrations en éléments nutritifs, y compris les ortho-phosphates, en dessous des seuils réglementaires requis pour une réutilisation agricole sécurisée. Néanmoins, la survenue de dépassements ponctuels souligne l'importance d'un suivi régulier et rigoureux afin de garantir la stabilité et la fiabilité des performances du traitement sur le long terme.

3. Résultats du prototype

3.1. Résultats du 27 mai 2025

3.1.1. Les haricots

A la date du 27 mai, une comparaison visuelle entre les deux plants d'haricot montre des différences significatives dans le développement.

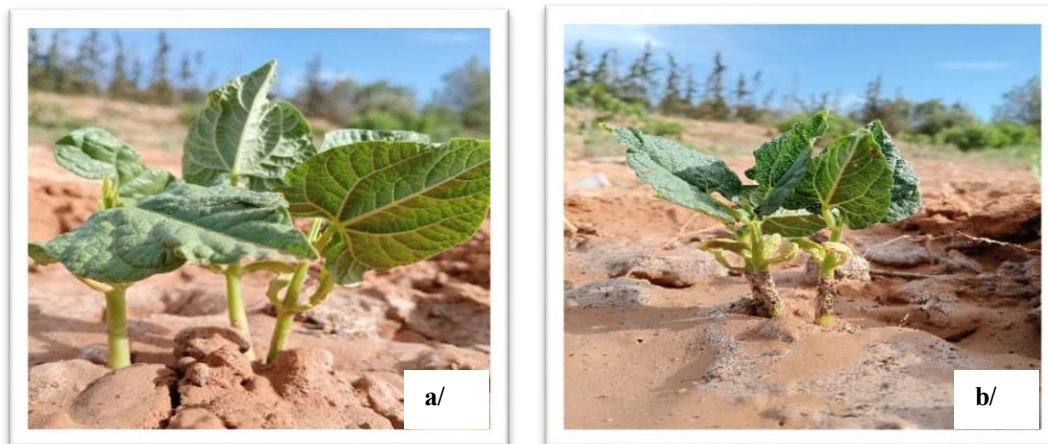


Photo. VI.1 : Comparaison entre la croissance des plants d'haricot irrigués avec : (a/ Eau épurée, b/ Eau douce).

Les plantes arrosées avec de l'eau épurée se distinguent par un feuillage plus dense, des feuilles bien formées et d'un vert intense, ainsi qu'une tige plus robuste. Son apparence générale suggère une croissance dynamique et régulière.

En revanche, le plant irrigué avec l'autre type d'eau (l'eau douce) présente une tige plus fine, quelques signes de jaunissement à la base, et un feuillage moins abondant. L'ensemble de ces observations indique un rythme de croissance plus lent et une vitalité légèrement réduite.

3.1.2. Les oliviers

L'olivier irrigué avec de l'eau épurée apparaît en bon état. Ses feuilles sont vertes, dressées et brillantes, avec une croissance apicale visible. Aucun signe clair de stress n'est observé, ce qui indique une croissance normale et équilibrée.

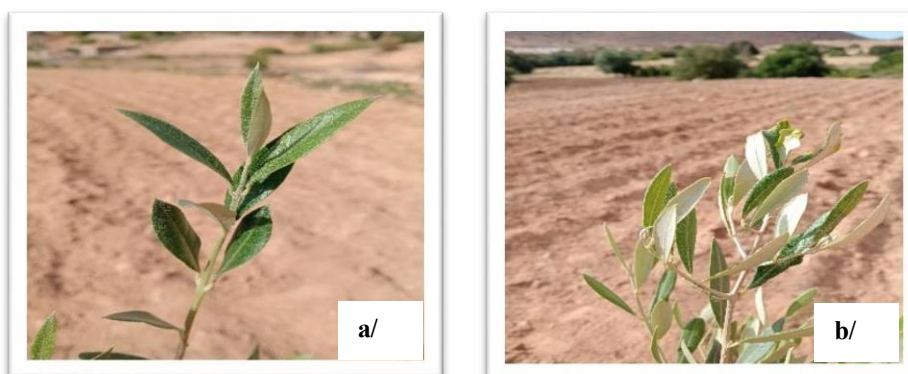


Photo. VI.2 : Comparaison entre la croissance de l'olivier irrigués avec : (a/ Eau épurée, b/ Eau douce).

L'olivier irrigué avec de l'eau douce semble moins vigoureux. Certaines feuilles sont enroulées et pales sur leur face inférieure. La pousse apicale est moins développée, et plusieurs feuilles paraissent légèrement déformées, ce qui peut indiquer un ralentissement de l'activité végétative.

3.1.3. La tomate

L'observation visuelle réalisée le 27 mai a révélé des différences notables entre les deux plants de tomate irrigués avec des sources d'eau différentes.



Photo. VI.3 : Comparaison entre la croissance de la tomate irrigués avec : (a/ Eau épurée, b/ Eau douce).

Le plant arrosé avec de l'eau épurée présentait un meilleur développement général, caractérisé par une plus grande densité foliaire, une couleur verte plus vive et une tige plus robuste, témoignant d'une croissance végétative saine et d'une bonne réponse à l'irrigation avec cette eau traitée.

En revanche, l'olivier irrigué avec de l'eau de puits montrait une croissance plus limitée, avec un feuillage moins dense et une structure végétale moins développée.

Ces observations suggèrent que l'utilisation d'eau épurée pourrait constituer une option efficace pour améliorer la croissance des plants de tomate, notamment dans un contexte de gestion optimisée des ressources en eau.

3.2. Résultats du 04 juin 2025

3.2.1. Les haricots

Le 4 juin, l'écart entre les deux plants de haricot devient plus marqué. Le plant arrosé avec de l'eau épurée continue à montrer une croissance saine : il a gagné en hauteur, les feuilles sont plus nombreuses, larges et d'un vert soutenu, avec une structure générale bien équilibrée. La tige est droite et les premières ramifications commencent à apparaître.

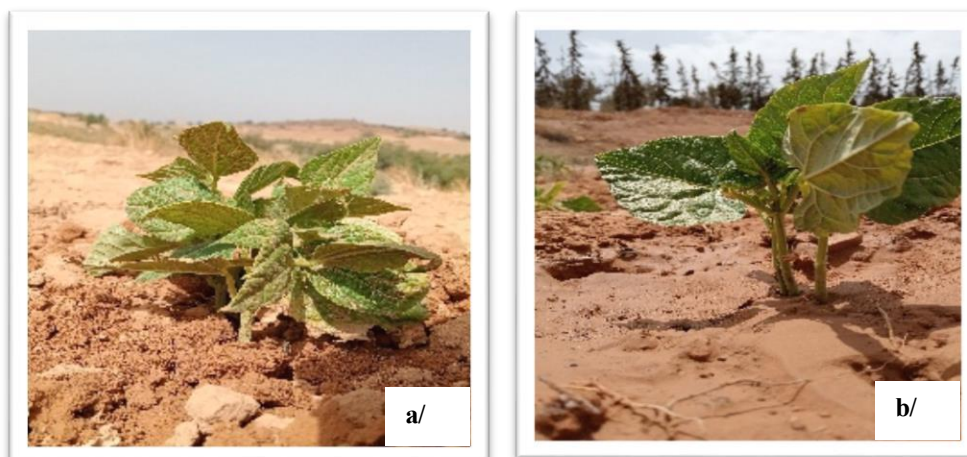


Photo. VI.4 : Comparaison entre la croissance des haricots irrigués avec : (a/ Eau épurée, b/ Eau douce).

En comparaison, le second plant montre une croissance plus modeste. Sa taille est inférieure, le feuillage est moins développé, et certaines feuilles présentent une légère décoloration. Ces différences suggèrent une dynamique de croissance moins favorable pour ce plant à ce stade.

3.2.2. Les oliviers

Le 4 juin, les deux oliviers irrigués avec des sources d'eau différentes ont montré une continuité dans la croissance en hauteur, mais des différences notables ont été observées sur le plan visuel.

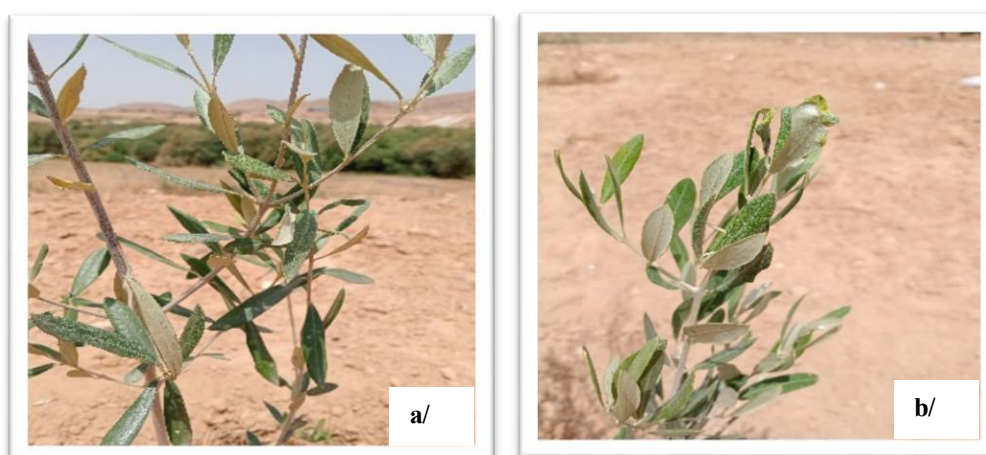


Photo. VI.5 : Comparaison entre la croissance du plant d'oliviers irrigués avec : (a/ Eau épurée, b/ Eau douce).

L'olivier irrigué avec de l'eau épurée présentait un aspect plus vigoureux, avec un feuillage vert, bien formé et sans signes visibles de ralentissement de l'activité. En

revanche, l'olivier irrigué avec de l'eau de puits a également poursuivi sa croissance, mais les feuilles n'ont pas montré d'évolution significative par rapport à l'observation précédente, conservant les mêmes caractéristiques visuelles.

3.2.3. La tomate

Une observation comparative entre deux plants de tomate cultivés dans des conditions similaires mais arrosés avec deux types d'eau différents (eau épurée et eau douce) a été réalisée le 4 juin. Le plant irrigué avec de l'eau épurée a montré une croissance plus vigoureuse, accompagnée de l'apparition de fleurs, marquant le début de la phase de reproduction.

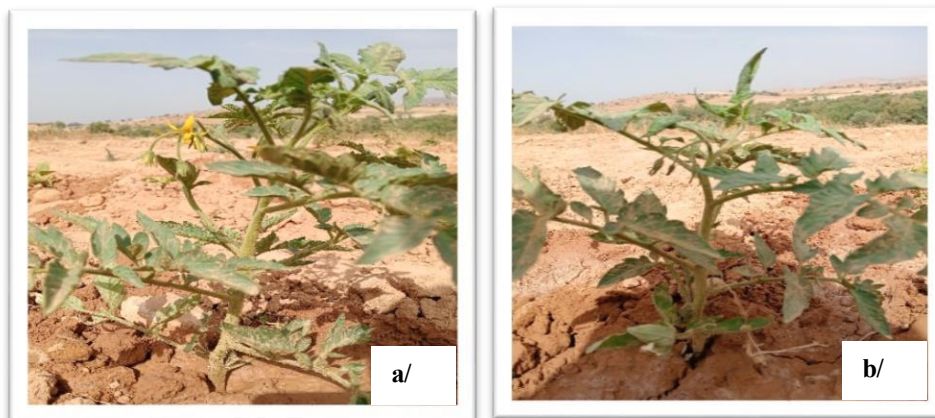


Photo. VI.6 : Comparaison entre la croissance des plants de tomate irrigués avec : (a/ Eau épurée, b/ Eau douce).

En revanche, le plant arrosé avec de l'eau douce présente un développement plus lent, une absence de floraison et des signes visibles de stress physiologique tels que le jaunissement partiel des feuilles.

3.3. Résultats du 16 juin 2025

3.3.1. Les haricots

Les observations visuelles finales ont révélé des différences nettes dans le développement végétatif des plants de haricot entre les deux modalités. Les plants irrigués avec de l'eau épurée ont montré une croissance plus vigoureuse en termes de hauteur et de densité foliaire, avec un feuillage plus abondant et d'un vert plus intense, reflétant une vitalité accrue et une meilleure réponse physiologique à la qualité de l'eau.



Photo. VI.7 : Comparaison entre la croissance des plants d'haricot irrigués avec : (a/ Eau épurée, b/ Eau douce).

En revanche, les plants irrigués avec de l'eau douce présentaient une croissance plus limitée, avec une taille réduite et un nombre de feuilles inférieur, suggérant une activité végétative relativement plus faible.

Ces constatations visuelles confirment que la qualité de l'eau d'irrigation a un impact significatif sur la croissance végétative du haricot, l'eau épurée ayant permis un développement plus équilibré et soutenu que l'eau douce.

3.3.2. Les oliviers

À la suite de l'observation finale des deux oliviers dans le cadre du modèle expérimental, des différences notables ont été relevées au niveau de l'aspect foliaire.

L'olivier irrigué avec de l'eau épurée présentait des feuilles saines, bien formées et uniformément colorées, reflétant un bon équilibre physiologique et un développement stable.



Photo. VI.8 : Comparaison entre la croissance des plants de l'olivier irrigués avec :
(a/ Eau épurée, b/ Eau douce).

En revanche, l'arbre irrigué avec de l'eau douce montrait des altérations morphologiques visibles au niveau des feuilles, telles que des déformations ou rétrécissements partiels, suggérant une réponse à un facteur environnemental défavorable.

Ces observations indiquent que la qualité de l'eau d'irrigation peut influencer directement la structure foliaire, même chez des espèces réputées pour leur tolérance comme l'olivier.

3.3.3. La tomate

À la suite de l'observation finale des plants de tomate dans le cadre du modèle expérimental, une différence marquée a été constatée dans l'évolution phénologique des deux groupes.



Photo. VI.9 : Comparaison entre la croissance des plants de tomate irrigués avec :
(a/ Eau épurée, b/ Eau douce).

Les plants irrigués avec de l'eau épurée ont atteint la phase de fructification, ce qui traduit une croissance plus rapide et une bonne adaptation aux conditions d'irrigation.

En revanche, les plants irrigués avec de l'eau douce étaient encore au stade de floraison, sans formation de fruits à ce stade.

Cette différence illustre l'influence du type d'irrigation sur la vitesse de transition entre les phases végétative et reproductive, et souligne l'impact potentiel de la qualité de l'eau sur le développement physiologique de la tomate.

III. CONCLUSION

Cette étude visait à évaluer la qualité des eaux usées épurées par la station d'épuration (STEP) de la ville de Maghnia, ainsi qu'à analyser leur potentiel d'utilisation pour l'irrigation agricole. Pour cela, des analyses physico-chimiques ont été réalisées sur une période de 20 jours.

Les résultats ont permis de caractériser plusieurs paramètres liés à la qualité organoleptique et physico-chimique de l'eau. Certains paramètres, tels que le pH, la température et les Orthophosphates (PO^{-3}_4), respectent les normes algériennes et celles de l'OMS. En revanche, d'autres indicateurs comme l'oxygène dissous (O_2), la demande chimique et biologique en oxygène (DCO, DBO₅) et les matières en suspension (MES) dépassent parfois les seuils réglementaires.

Malgré ces dépassements ponctuels, le système de traitement de la STEP de Maghnia améliore significativement la qualité des eaux usées, notamment en réduisant les charges organiques, les matières en suspension et les composés azotés (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-). Ces résultats suggèrent que ces eaux traitées peuvent être utilisées pour l'irrigation agricole, à condition d'assurer un suivi rigoureux, notamment pour le contrôle des niveaux d'ammonium.

Des tests de culture réalisés dans le cadre d'un prototype réalisé à l'aval de la STEP de Maghnia, composé de deux systèmes d'arrosage ; el l'occurrence, une irrigation via l'eau douce par des gaines de goutte-à-goutte (sur haricot, tomate et olivier), et le second système de même type arrosé par les eaux issues de la STEP en utilisant le même mode d'arrosage.

Nous avons constaté que l'ensemble des plantes irriguées avec les eaux épurées présentent une croissance plus vigoureuse et un meilleur état général par rapport à celles arrosées avec de l'eau douce.

Ces résultats expérimentaux confirment que la réutilisation des eaux épurées de la STEP de Maghnia est une solution durable et efficace pour l'agriculture, particulièrement dans un contexte de gestion rationnelle des ressources en eau et le rendement agricole vu leur richesse en nutriments et fertilisants organiques par rapport aux eaux normales.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

La recherche de ressources non conventionnelles comme les eaux usées traitées pour une utilisation plus efficace, est d'actualité. A cet égard, les pouvoirs publics se penchent de plus en plus sur la question de l'assainissement, et le traitement des eaux usées. Alors que le secteur agricole, sous l'effet de la pression de l'accroissement de la demande sur les produits agricoles, fait ample utilisation des eaux usées en irrigation, là où la ressource est disponible et durable.

Cette étude constitue une première étape cruciale dans la recherche sur la réutilisation des eaux usées épurées en agriculture, dans un contexte où la raréfaction des ressources en eau s'accroît sous l'effet des changements climatiques.

La commune de Maghnia, située dans une région méditerranéenne à tendance semi-aride, est particulièrement concernée. Elle se caractérise par des hivers doux et pluvieux, des étés chauds et secs, et des précipitations annuelles variant entre 400 et 500 mm, concentrées de novembre à avril. Les températures moyennes annuelles oscillent entre 15,81°C et 21,03°C, accentuant le stress hydrique de la région. Les indices d'aridité, mensuels et annuels, confirment cette vulnérabilité à la sécheresse, rendant impérative la recherche de solutions alternatives pour l'irrigation agricole.

Dans ce contexte, une expérimentation a été menée dans le périmètre agricole de Kefaf (commune de Maghnia), en utilisant un système d'irrigation localisée de type goutte-à-goutte, couplé à l'utilisation d'eaux usées épurées issues de la station d'épuration (STEP) locale. Trois cultures ont été ciblées pour cette étude: l'olivier, la tomate et le haricot vert.

L'objectif principal était d'évaluer la faisabilité et l'efficacité de l'utilisation des eaux épurées pour l'irrigation de cultures agricoles dans une région soumise à un stress hydrique important.

Les analyses physico-chimiques des eaux usées traitées, menées sur une période de 20 jours, ont permis de caractériser plusieurs paramètres clés. Certains, comme le pH, la température et les orthophosphates (PO_4^{3-}), respectent les normes algériennes et celles de l'OMS. D'autres, tels que l'oxygène dissous, la demande chimique et biologique en oxygène (DCO, DBO₅) et les matières en suspension (MES), ont parfois dépassé les seuils réglementaires. Néanmoins, les traitements appliqués par la STEP ont globalement permis une amélioration notable de la qualité de l'eau, avec une réduction significative des charges organiques, des matières en suspension et des composés azotés (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-).

Les tests de culture ont révélé des résultats encourageants : les plants de haricot, de tomate et d'olivier irrigués avec les eaux traitées ont montré une croissance plus vigoureuse et un meilleur état général que ceux irrigués avec de l'eau douce. Ces observations confirment que la réutilisation contrôlée des eaux usées traitées représente une solution efficace, durable et adaptée aux conditions semi-arides de la région.

À la lumière de ces résultats prometteurs, nous proposons la création d'une micro-entreprise spécialisée dans la réutilisation des eaux traitées pour l'irrigation agricole. Cette structure aurait pour principales missions :

- ↻ La conception et l'installation de systèmes d'irrigation goutte-à-goutte adaptés à la qualité des eaux disponibles,
- ↻ L'accompagnement technique des agriculteurs dans la mise en œuvre et l'optimisation de ces systèmes,
- ↻ La réalisation d'analyses régulières des eaux et des sols pour garantir une utilisation sécurisée,
- ↻ La valorisation des productions agricoles issues de ce mode d'irrigation comme solution économiquement viable et écologiquement durable.

Pour aller plus loin, plusieurs recommandations sont formulées :

- ↻ Améliorer les procédés de traitement de la STEP de Maghnia afin d'élever encore la qualité des eaux produites, notamment en vue de l'irrigation de précision,
- ↻ Étendre l'expérimentation à d'autres cultures et à des surfaces agricoles plus vastes pour confirmer la reproductibilité des résultats,
- ↻ Sensibiliser les agriculteurs aux bénéfices économiques et environnementaux liés à l'utilisation des eaux usées épurées, en insistant sur la préservation des nappes phréatiques,
- ↻ Étudier la faisabilité de la mise en place d'une unité commerciale dédiée à la valorisation des eaux usées et des sous-produits du traitement, dans une optique d'économie circulaire appliquée à l'agriculture.

Ce travail ouvre des perspectives concrètes pour la mise en œuvre de pratiques agricoles durables, contribuant à la sécurité alimentaire et à la préservation des ressources naturelles. Il pose les fondations d'un écosystème propice à l'innovation entrepreneuriale, avec la création de micro-entreprises axées sur la gestion rationnelle des ressources hydriques non conventionnelles. Ce modèle s'inscrit pleinement dans les exigences d'adaptation au changement climatique et de modernisation de l'agriculture dans les zones à fort stress hydrique.



***Références
Bibliographique***

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- A.N.R.H, (2012) : Agence Nationale des Ressources Hydriques. Bulletins mensuels de la qualité des eaux superficielles. Alger.
- Agence Nationale des Statistiques Agricoles, (2018) : *Emploi dans les zones irriguées : Cas du périmètre de Maghnia*. ANSA.
- Amorce, (2012) : Boues de station d'épuration, Techniques de traitement, valorisation et élimination. Note, Série Technique DT 51, France. Url : https://www.pseau.org/outils/ouvrages/amorce_boues_de_step_techniques_de_traitement_valorisation_et_elimination_2012.pdf
- Amoura, M. (2022). Étude de la réutilisation des eaux usées traitées en agriculture. Mémoire de fin d'études, Université de Tlemcen.
- Amoura, M., (2022) : *Contribution à l'analyse de la performance d'un système d'irrigation de cultures dans la région de Chlef*. Thèse de doctorat, Université Hassiba Benbouali, Chlef.
- Baba Hamed, K., (2007) : Hydrogéologie et modélisation d'une nappe alluviale, validation par approche géostatique. Application à la nappe de la plaine de Maghnia (N.W algérien). Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 183p.
- Baumont, S., Camard, J.P., Lefranc, A., & Franconi, A., (2004) : Réutilisation des eaux usées, risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France. Rapport ORS, 220 p.
- Bekkari, N., (2020) : Etude et suivi de procédé d'épuration des eaux usées sous climat aride (simulation par l'application des méthodes d'intelligence artificielle) cas de la station d'épuration de Touggourt. Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah, Ouargla. Université Kasdi Merbah Ouargla.
- Benkaddour, N., (2015) : Contribution à l'étude de l'efficacité de la graine de *moringa oleifera* dans la dépollution des eaux de l'oued Safsaf. Mémoire d'ingénieur. Université Abou Bekr- Belkaid, Tlemcen, faculté des sciences de la vie et de la nature et sciences de la terre et de l'univers. Département des sciences d'agronomie et des forêts.
- Boeglin, J., C., (2008) : Propriétés des eaux naturelles, technique de l'ingénieur, traité environnement G1-110.
- Boudjema, S., (2007) : Utilisation des eaux usées épurées en irrigation: étude expérimentale. Mémoire de Master, Université de Blida.
- Cardot, C., (2010) : Les traitements de l'eau pour l'ingénieur: procédés physico-chimiques et biologiques: cours et problèmes résolus. Edition Ellipses, Paris, France, 301 p.
- CCME, (2011) : Manuel des protocoles d'échantillonnage pour l'analyse de la qualité de l'eau au Canada. PN 1462. ISBN : 978-1-896997-79-7.
- Claude Gros C., (1999) : L'eau usage et pollution (tome 2).
- Cors, M., (2007) : Techniques extensives d'épuration des eaux usées domestiques. Le meilleur choix environnemental en zone rurale. Dossier IEW Inter-Environnement Wallonie.
- Dégremont., (2005) : Mémento technique de l'eau (11^e éd.). Lavoisier.
- Effebi, K. R., (2009) : Lagunage anaérobie: Modélisation combinant la décantation primaire et la dégradation anaérobie. Thèse de Doctorat Université de Liège, pp.7-9.
- F.A.O., (2003) : Irrigation avec les eaux usées traitées. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. Bureau Régional pour le Proche Orient et Bureau sous régional pour l'Afrique du Nord. 73 p.
- F.A.O., (2010) : Irrigation avec les eaux usées traitées. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. Bureau Régional pour le Proche Orient et Bureau sous régional pour l'Afrique du Nord. 60 p.

- Franck, R., (2002) : Analyse des eaux, Aspects réglementaires et techniques. Edition CRDP Aquitaine décembre, Bordeaux, France, pp. 165-239.
- Gaid, A. (1993) : Traitement des eaux usées urbaines. Techniques de l'Ingénieur, C5-220-2, 30 p.
- Generet, O., Bodart, O., Andre, N., Colmant, S., Bellino, D., Vonnecebe, L., Van Hooydonk, D., Laffineur, L., & Daum concept, B., (2005) : Etude d'incidences sur l'environnement relative à une demande de permis unique, AIDE S.C.R.L. Station d'épuration d'eaux résiduaires urbaines de Liège -Sclessin, Projet N°: 05.0258, Belgique, 82 p.
- Gleick, P. H., (1996) : "Water resources, In Encyclopedia of Climate and Weather, ed. by S. H. Schneider", Oxford University Press, New York, vol. 2, pp.817-823.
- Gobat. J.M, Agrano. M, Matthey.W, (2010): Le sol vivant, base de pédologie biologie des sols. Presses universitaires et romandes, EPFL, Lausanne, Suisse.
- Gomella. C, Guerre. H., (1982) : Les eaux usées dans les agglomérations urbaines et rurales : le traitement, (tome 2 mis à jour). Edition Eyrolles, Paris. 260p
- Grosclaude .G., (1999) : "L'eau : usage et polluant", Tome II. 4^{ème} Edition: INRA, Paris. 11pp.
- Hadji, F., (2019): Les marnes miocènes de l'Oranie: Caractérisation minéralogique et géochimique. *Thèse de Doctorat*, Université de Tlemcen, 186 p
- Hafied, Y., Marouf, N. & Meddour, A. S. E., (2017): La charge sédimentaire dans certains bassins du nord-ouest algérien. *Bulletin National University of Water and Environmental Engineering*, 2(78):3-15.
- Hannachi, C., Boudiaf, H., & Merabet, D., (2014) : Effet de l'irrigation par les eaux usées sur la qualité des sols agricoles. *Revue des Sciences de l'Environnement*, 7(2), 89-98.
- Institut Nationale de la D.P.A.T (Direction de Planification et de l'Aménagement de Territoire)., 2006 - Annuaire statistique de la wilaya de Ouargla. Direction de la planification et de l'aménagement du territoire: 8-12.
- ISO, (1991) : Organisation internationale de normalisation. *Qualité de l'eau – Echantillonnage-. Partie 2: Guide général sur les techniques d'échantillonnage*. ISO 5667-2:1991(F), deuxième édition 1991-07-15.
- ISO, (1997) : Organisation internationale de normalisation. *Qualité de l'eau - Dosage des matières en suspension par filtration sur filtre en fibres de verre*. ISO 11923, première édition 1997-02-01.
- Journal Officiel de l'Algérie n° 41, 2012.
- Lalam, F., (2017) : Évaluation de la qualité des eaux d'irrigation dans la région de Sidi Bel Abbès. Mémoire de Master, Université Djillali Liabès.
- Le byaric, R., (2009) : Caractérisation, Traitabilité et valorisation des refus de dégrillage des stations d'épurations. Thèse Doctorat, Institut National des Sciences appliquées, Lyon, France, 190 p.
- Mathieu, Y., & Pielman, R., (2003) : Gestion intégrée des ressources en eau: principes et méthodes. Éditions Lavoisier.
- Merzoug, A., (2022) : Contribution à l'étude qualitative des eaux potables dans la région de Biskra. Mémoire de Master. Faculté des Sciences exactes et sciences de la nature et de la vie, Département des Sciences Agronomiques. Université Mohamed Kheider de Biskra, 112p.
- Metcalf., et Eddy, (2003) : "Wastewater Engineering : Treatment and reuse, 4th Ed, révisé par Tchobanoglous, F.L. Burton et H.D. Stensel, McGraw-Hill Inc, New-York, p, 616, 928, 933, 969.

- Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural., (1974) : *Rapport sur l'aménagement hydro-agricole du périmètre de Maghnia*. Ministère de l'Agriculture.
- Moletta, R., (2008) : L'eau, sa pollution, et son traitement. Moletta Méthanisation, 2^{ème} édition, 1504 Route des Bottières 73470 Novalaise, France, 505 p.
- Monchy, H., (1978) : Techniques d'épuration des eaux industrielles. Éditions Techniques et Documentation.
- Office National de l'Assainissement (ONA), (2025) : *Fiche technique de la station d'épuration des eaux usées de la ville de Maghnia*. ONA.
- Organisation internationale de normalisation (ISO), (1989) : ISO 6060: Eaux Détermination de la demande biochimique en oxygène après 5 jours (DBO₅). Genève: ISO.
- Pasquini, L., (2013) : Micropolluants issus de l'activité domestique dans les eaux urbaines et leur devenir en station d'épuration. Thèse Doctorat, Université de Lorraine, France, 298 p.
- Ramade F., (1998) : Dictionnaire encyclopédique des sciences de l'eau (N°. 631.4 R165d). Ed science internationale, Paris, 786 p.
- Ramade, F., (2000) : Dictionnaire encyclopédique des populations : les polluants : de l'environnement à l'homme. Ed science international, Paris, France, 689 p.
- Rejsek, F., (2002) : Analyse des eaux: aspects réglementaires et techniques. Centre régional de documentation pédagogique d'Aquitaine.
- Rodier, J., (2005) : L'analyse de l'eau naturelle, eaux résiduaires, eaux de mer. 8^{ème} Edition DUNOD technique. Paris, 1008-1043.
- Rodier, J., (2009) : Analyse de l'eau. 9^{ème} édition Ed. Dunod bordas, Paris, 526p.
- Rodier, J., (2009) : L'Analyse de l'Eau: Eaux Naturelles, Eaux Résiduaires, Eau de Mer (9^{ème} édition, 1384 p). Paris: Dunod.
- Roland, V., (2010) : Eau, environnement et santé publique. Introduction à l'hydrologie, 3^{ème} édition, Lavoisier, paris, 301 p.
- Rurales. Tomes I : La collecte, Edition : Eyrolles. Paris. 512 pp.
- Saiyouri, N., (2012) : Méthode d'irrigation en milieu aride.
- Satin .M. & Salmi., (1999) : Guide technique de l'assainissement, Edition le Moniteur Paris.
- Soudi, B., Benosmane, F., Dimitri, X., & Mahi, M., (2009) : Etude ONEP / FAO - Atelier sur l'assainissement, l'épuration et la réutilisation des eaux usées. Présentation du Guide Technique de la Réutilisation des Eaux Usées Epurées Agadir, vol. 33, pp.45-50.
- Spellman, F. R., (2003) : "Hand book of water and wastewater treatment plant operation". Lewis publishers, USA.
- Tiercelin, J-R. & Vidal, A. : Traité d'irrigation.2 éd. Paris.
- Toubal, M., (2024) : Impact des eaux usées traitées sur la croissance des cultures maraîchères. Mémoire de Master, Université de Tlemcen.
- Urios, L., (2005) : "Technique D'épuration des eaux usées". Technique et documentation. Paris.
- Vaillant, J.R., (1974) : Perfectionnement et nouveautés pour l'épuration des eaux résiduaires, eaux usées urbaines et eaux résiduaires industrielles. Eyrolles édition, Paris, France, 413 p.
- Vasel, J. L., (2007) : "Evolution de l'assainissement individuel : Perspectives et questions en suspens", Tribune de l'eau, Vol. 60, N°641, pp.: 3-16.
- Zenasni, S., (2013): Modélisation de la qualité des eaux d'oued Mouillah jusqu'au barrage Boughrara-application du Hec-Ras. Mémoire de Magister en Hydraulique, Option : Gestion et traitement des eaux. Université des sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 191p.

Webographie

- [1] :https://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_de_l'eau#/media/Fichier:Watercycle-french.jpg.
- [2] :https://www.oieau.fr/audoc/system/files/documents/45/226190/226190_doc.pdf
- [3] :<https://www.suezwaterhandbook.fr/eau-et-generalites/quelles-eaux-a-traiter-pourquoi/les-effluents-urbains/reutilisation-des-eaux-usees>
- [4] :<https://eos.com/fr/blog/types-de-sol/>. (Consulté le 27/05/2025).
- [5] :<https://images.app.goo.gl/4GXApoCRYrqiZrMA> (consulté le 16/04/2025).
- [6] :<https://images.app.goo.gl/Mqqe4z4q6nzC7dzP6> (consulté le 16/04/2025).
- [7] :<https://images.app.goo.gl/pAgo5cms1bR1yAk1A> (consulté le 16/04/2024).
- [8] :<https://pixabay.com/fr/photos/alpilles-culture-olive-oliviers-7364547/>
(Consulté le 01/06/2025)
- [9] :<https://www.rustica.fr/plantes-a-z/tout-savoir-sur-culture-haricot-vert-legume-vedette-potager,18792.html> (Consulté le 01/06/2025)
- [10] :<https://www.yara.fr/fertilisation/solutions-pour-cultures/tomate/principes-agronomiques-tomates/> (Consulté le 01/06/2025)
- [11] : <https://sani-depot.ca/fr/comprendre-le-ph/>
- [12] : <https://www.leybold-shop.fr/vc4-4-1-3.html>
- [13] : <https://www.editions-eyrolles.com/Dico-BTP/definition.html?id=2989>

Annexes

Annexes

Annexe.1 : LES NORMES DE L'OMS POUR L'EAU POTABLE

(Les lignes directrices de l'OMS en ce qui concerne la qualité de l'eau potable, mises à jour en 2006 sont la référence en ce qui concerne la sécurité en matière d'eau potable).

PARAMETRES AVEC VALEURS INDICATIVES

Groupe de parametre	Paramètres	Unités	Valeurs indicatives
Paramètres physiques	pH		Pas de valeur guide mais un optimum entre 6,5 et 9,5
	Conductivité		pas de norme
	Température		acceptable
	Turbidité	NTU (1NTU pour la désinfection)	5
Paramètres organoleptiques	Couleur		Pas de valeur guide
	Goût et odeur		acceptable

PARAMETRES AVEC VALEURS LIMITES

Groupe de paramètre	Paramètres	Unités	VALEURS LIMITES (CMA)
Eléments toxiques	Arsenic (As)	mg/L	0,01
	Cadmium (Cd)	mg/L	0,003
	Chrome Cr ⁺³ , Cr ⁺⁶	mg/L	chrome total : 0,05
	Cyanure (CN ⁻)	mg/L	0,07
	Mercure (Hg)	mg/L	inorganique: 0,006
	Sélénium (Se)	mg/L	0,01
	Plomb (Pb)	mg/L	0,01
	Antimoine (Sb)	mg/L	0,02
	Fer (Fe)		Pas de valeur guide
	Manganèse (Mn)	mg/L	0,4
Eléments indésirables	Aluminium(Al)	mg/L	0,2
	Cuivre (Cu ²⁺)	mg/L	2
	Ammonium (NH ₄ ⁺)	mg/L	0,5
	Argent		Pas de valeur guide
	Fluorures	mg/L	1,5
	Zinc(Zn)	mg/L	3
	Bore(B)	mg/L	0,5
	Hydrocarbures aromatiques polynucléaires C ₂ H ₃ N ₁ O ₅ P _{1 3}	µg/L	0,1
	THM (Trihalométhanes) C Cl ₄	µg/L	4
Minéralisation globale	Calcium Ca ²⁺	mg/L	100
	Chlorures(Cl)	mg/L	250
	Magnésium Mg ²⁺	mg/L	50
	Dureté mg/l CaCO ₃	Ppm	200
	Sodium (Na)	mg/L	20

	Potassium (K⁺)	mg/L	12
	Sulfates (SO₄)	mg/L	500

PARAMETRES MICROBIOLOGIQUES

Groupe de paramètre	Paramètres	Unités	Valeurs indicatives
Paramètres microbiologiques	Coliformes totaux	nb/100ml	0
	Coliformes fécaux	nb/100ml	0
	Streptocoques fécaux	nb/100ml	0
	Clostridium Sulfito-Réducteurs	nb/100ml	0
	Staphylocoques pathogènes	nb/100ml	0
	Spoires des bactéries	nb/20ml	0
	Vibrions cholériques	nb/10ml	Absence
	Salmonelles	nb/5L	Absence

Annexe.2 : LES NORMES ALGERIENNES DU MINISTRE DES RESSOURCES EN EAU (DEPUIS 22 MARS 2011)

(L'Algérie s'est basée sur les normes internationales, pour établir ses propres normes, on peut dire que c'est une combinaison de différentes normes qui existe sur le plan international).

PARAMETRES DE QUALITE DE L'EAU DE CONSOMMATION HUMAINE

PARAMETRES AVEC VALEURS INDICATIVES

Groupe des paramètres	Paramètres	Unités	Valeurs indicatives
Paramètres physico-chimiques en relation avec la structure naturelle des eaux	pH	Unité pH	≥ 6,5 et ≤ 9,5
	Conductivité	μS/cm à 20°C	2800
	Température	°C	25
	Dureté	mg/L en CaCO ₃	200
	Alcalinité	mg/L en CaCO ₃	500
	Calcium	mg/L en CaCO ₃	200
	Chlorures	mg/L	500
	Potassium	mg/L	12
	Résidu sec	mg/L	1500
	Sodium	mg/l	200
	Sulfates	mg/L	400
Paramètres organoleptiques	Couleur	mg/L Platine	15
	Turbidité	NTU	5
	Odeur 12°C	Taux dilution	4
	Saveur 25°C	Taux dilution	4

PARAMETRES AVEC VALEURS LIMITEES

Groupe des paramètres	Paramètres	Unités	Valeurs limites
Paramètres chimiques	Aluminium	mg/L	0,2
	Ammonium	mg/L	0,5
	Baryum	mg/L	0,7
	Bore	mg/L	1
	Fer total	mg/L	0,3
	Fluorures	mg/L	1,5
	Manganèse	μg/L	50
	Nitrates	mg/L	50
	Nitrites	mg/L	0,2
	Oxydabilité	mg/L O ₂	5
	Phosphore	mg/L	5
	Acrylamide	μg/L	0,5
	Antimoine	μg/L	20
	Argent	μg/L	100
	Arsenic	μg/L	10
	Cadmium	μg/L	3
	Chrome total	μg/L	50

	Cuivre	mg/L	2
	Cyanure	µg/L	70
	Mercure	µg/L	6
	Nickel	µg/L	70
	Plomb	µg/L	10
	Sélénium	µg/L	10
	Zinc	mg/L	5
	Hydrocarbures polycycliques aromatiques (H,P,A) totaux	µg/L	0,2
	Phénols	µg/L	0,5
	Pesticides (Totaux)	µg/L	0,5
	Bromates	µg/L	10
	Chlore	mg/L	5
	Chlorite	mg/L	0,07
	Trihalométhanes (THM) (Total)	µg/L	100
Radionucléides	Particules alpha	Picocurie/L	15
	Particules bêta	Millirems/an	4
	Tritium	Bequerel/L	100
	Uranium	µg/L	15
	Dose totale indicative (DTI)	(mSv/an)	0,1

PARAMETRES MICROBIOLOGIQUES

Groupe de paramètres	Paramètres	Unités	Valeurs limites
Paramètres microbiologiques	Escherichia Coli	nb /100ml	0
	Entérocoques	nb /100ml	0
	Bactéries sulfitoréductrices y compris les spores	nb/20ml	0

Annexe.3 : Valeurs limites maximales de la teneur en substances nocives des eaux usées autres que domestiques au moment de leur déversement dans un réseau public d'assainissement ou dans une station d'épuration

(Journal Officiel de la République Algérienne N°36, Année 2009).

Paramètres	Valeurs limites Maximales (mg/L)
Azote global	150
Aluminium	5
Argent	0,1
Arsenic	0,1
Bérylium	0,05
Cadmium	0,1
Chlore	3
Chrome trivalent	2
Chrome hexavalent	0,1
Chromates	2
Cuivre	1
Cobalt	2
Cyanure	0,1
Demande biochimique en oxygène (DBO₅)	500
Demande chimique en oxygène (DCO)	1000
Etain	0,1
Fer	1
Fluorures	10
Hydrocarbures totaux	10
Matières en suspension	600
Magnésium	300
Mercure	0,01
Nickel	2
Nitrites	0,1
Phosphore total	50
Phénol	1
Plomb	0,5
Sulfures	1
Sulfates	400
Zinc et composés	2

Annexe.4 : Valeurs limitent des paramètres de rejet dans un milieu récepteur (Journal Officiel de la République Algérienne, 2006).

PARAMÈTRES	UNITÉS	VALEURS LIMITES
Température	°C	30
pH	-	6,5 à 8,5
MES	mg/L	35
DBO₅	mg/L	35
DCO	mg/L	120
Azote Kjeldahl	mg/L	30
Phosphates	mg/L	02
Phosphore total	mg/L	10
Cyanures	mg/L	0,1
Aluminium	mg/L	03
Cadmium	mg/L	0,2
Fer	mg/L	03
Manganèse	mg/L	01
Mercure total	mg/L	0,01
Nickel total	mg/L	0,5
Plomb total	mg/L	0,5
Cuivre total	mg/L	0,5
Zinc total	mg/L	03
Huiles et Graisses	mg/L	20
Hydrocarbures totaux	mg/L	10
Indice Phénols	mg/L	0,3
Fluor et composés	mg/L	15
Étain total	mg/L	02
Composés organiques chlorés	mg/L	05
Chrome total	mg/L	0,5
(*) Chrome III +	mg/L	03
(*) Chrome VI +	mg/L	0,1
(*) Solvants organiques	mg/L	20
(*) Chlore actif	mg/L	1,0

Annexe.5 : Normes internationaux des rejets

Paramètres	Unités	Normes utilisées (OMS)
pH	-	6,5-8,5
DBO₅	mg/L	<30
DCO	mg/l	<90
MES	mg/L	<20
NH₄	mg/L	<0,5
NO₂	mg/L	1
NO₃	mg/l	<1
P₂O₅	mg/L	<2
Température T	°C	<30
Couleur	-	Incolore
Odeur	-	Inodore

BMC

Business Model Canevas

1. Partenariats clés (Key Partnerships)

Les partenariats clés reposent principalement sur la collaboration avec les stations d'épuration des eaux usées, qui constituent la source essentielle d'eau épurée destinée à l'irrigation agricole. Ces stations fournissent une ressource précieuse et alternative, permettant de répondre aux besoins croissants en eau dans un contexte de rareté. Les autorités locales et les municipalités jouent également un rôle stratégique en soutenant la logistique, la réglementation et la sensibilisation des agriculteurs. En complément, des partenariats peuvent être établis avec des organismes de contrôle environnemental afin de garantir la conformité aux normes sanitaires et écologiques.

2. Activités clés (Key Activities)

Parmi les activités principales figure l'analyse régulière de la qualité de l'eau traitée, afin de s'assurer qu'elle respecte les standards requis pour une utilisation agricole sécurisée. Un système de surveillance est mis en place pour garantir la constance de la qualité de l'eau fournie aux agriculteurs. En parallèle, l'entreprise développe des systèmes d'irrigation efficaces et adaptés à l'utilisation de cette eau, en tenant compte des contraintes techniques et des besoins spécifiques des cultures locales.

3. Ressources clés (Key Resources)

Les ressources essentielles comprennent l'accès continu à des quantités suffisantes d'eaux usées épurées, une condition indispensable pour garantir la stabilité du service d'irrigation. L'expertise technique représente également une ressource majeure, en particulier dans le domaine de la gestion de l'eau et des technologies d'irrigation durable. À cela s'ajoutent les équipements de surveillance, les infrastructures de distribution et les compétences humaines spécialisées dans la mise en œuvre de ces projets.

4. Segments de clientèle (Customer Segments)

La solution s'adresse à deux segments principaux. D'une part, les agriculteurs et porteurs de projets agricoles, qui peuvent bénéficier de cette eau alternative pour leurs cultures, tout en réduisant leurs coûts. D'autre part, les municipalités et conseils locaux qui cherchent à optimiser la gestion de leurs ressources en eau en adoptant des approches durables et innovantes. Ces deux segments partagent le besoin d'une ressource fiable, économique et respectueuse de l'environnement.

5. Proposition de valeur (Value Proposition)

L'offre vise à fournir une source d'eau alternative, durable et de haute qualité, adaptée à l'usage agricole. Cette solution permet de réduire considérablement la pression sur les ressources en eau naturelles, comme les nappes phréatiques et les rivières, souvent

surexploitées. En offrant une ressource stable et contrôlée, l'initiative contribue à la résilience du secteur agricole face aux défis climatiques et hydriques.

6. Relation avec les clients (Customer Relationship)

La relation client repose sur un accompagnement technique continu. Les agriculteurs bénéficient de formations, de conseils et de soutien pour intégrer l'eau épurée dans leurs systèmes de production. Cette relation se construit sur la confiance, l'assistance de proximité et la capacité à résoudre rapidement les éventuels problèmes techniques liés à l'utilisation de l'eau recyclée.

7. Canaux de distribution (Channels)

La distribution de l'eau est assurée par la mise en place de réseaux spécialisés, qui transportent l'eau épurée depuis les stations d'épuration jusqu'aux zones agricoles. Ces réseaux peuvent prendre la forme de canalisations, de citernes mobiles ou d'autres infrastructures adaptées à la géographie locale. La collaboration avec les autorités locales est essentielle pour installer et entretenir ces canaux efficacement.

8. Structure des coûts (Cost Structure)

Les principaux coûts incluent l'achat ou la valorisation de l'eau épurée auprès des stations d'épuration. S'ajoutent les dépenses liées à l'exploitation, à la maintenance et à la modernisation des réseaux de distribution et d'irrigation. D'autres charges concernent le contrôle de la qualité de l'eau, les services techniques fournis aux utilisateurs, ainsi que les frais administratifs et logistiques.

9. Sources de revenus (Revenue Streams)

Les revenus proviennent principalement de la vente d'eau épurée aux agriculteurs à un tarif accessible. À cela s'ajoute la commercialisation des récoltes produites grâce à cette eau, dans le cadre de coopérations agricoles ou de circuits courts. D'autres sources de revenus peuvent inclure la fourniture de services de conseil, ainsi que des accords contractuels avec des municipalités pour la gestion de leurs effluents et la valorisation de leurs ressources hydriques.

La vente de boue valorisée constitue également une source de revenus : cette boue, transformée en amendement organique, peut être commercialisée auprès d'agriculteurs ou de collectivités, avec une tarification basée sur le volume acheté.

Business Model Canevas : BMC

Partenaires clés Key Partnerships

الشراكة الرئيسية

- Stations d'épuration des eaux usées fournissant de l'eau épurée,
- Les autorités locales.

Activités clés Key Activities

الأنشطة الرئيسية

- Analyse des eaux épurée,
- Surveillance de la qualité de l'eau pour garantir son utilisation,
- Développement des systèmes d'irrigation

Ressources clés Key resources

الموارد الرئيسية

- Fourniture de quantités suffisantes d'eaux épurée.
- Expertise technique dans le domaine de l'irrigation.

Proposition de valeur Value Proposition

القيمة المقترحة

- Fournir une source alternative et durable d'eau de haute qualité,
- Réduire la dépendance aux ressources en eau naturelles.

Relation clients Consumer Relationship

علاقة مع العملاء

- Fournir un soutien technique aux agriculteurs et les guider dans l'utilisation des eaux usées épurée.

Canaux de distribution Channels

قنوات التوزيع

- Création de réseaux de distribution pour le transport de l'eau vers le périmètre agricole.

Coûts Coste structure التكاليف

- Coût d'achat de l'eau épurée.
- Dépenses d'exploitation et de maintenance des réseaux de distribution et d'irrigation.
- Coûts de contrôle de la qualité de l'eau.

Revenus (Revenue): مصادر الدخل

- Commercialisation de l'eau épurée et des produits agricoles issus de l'irrigation.
- Valorisation et vente de la boue activée traitée comme sous-produit à usage agricole ou industriel.