



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



Université Abou Bakr Belkaïd– Tlemcen –  
Faculté de TECHNOLOGIE

## MEMOIRE

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

**En : Hydraulique**

**Spécialité : Hydraulique Urbain**

**Par : MESSAOUDENE Ahlem & REZIOU Ikram**

**Sujet**

Etude et mise au point d'une mini-station de  
phyto-épuration des effluents hospitaliers : Réalisation de  
maquette/Etude de cas

Soutenu publiquement, le 25/06/2025, devant le jury composé de :

CHACHOUA Mounira	MCB	Université de Tlemcen	Présidente
BENMESSAOUD Nouara	MCB	Université de Tlemcen	Examinatrice
BENADDA Lotfi	MCB	Université de Tlemcen	Encadreur
KENICHE Assia	MCA	Université de Tlemcen	Encadreur
ELHABIRI Sid Ahmed	MCB	Université de Tlemcen	Co-encadreur
BITEUR Kada	MCB	Université de Tlemcen	Co-encadreur
BENACHENHOU Kamila	MCB	Université de Tlemcen	Expert I2E
MESSAOUDI Hanane	Ingénieur	DRE de Tlemcen	Expert Socio-économique

Année universitaire : 2024/2025

# ❀ ❀ ❀ ❀ ❀ **REMERCIEMENTS** ❀ ❀ ❀ ❀ ❀

Nous remercions tout d'abord Dieu, le Tout-Puissant, qui nous a accordé la force, la santé et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce mémoire.

Nous exprimons notre profonde gratitude à nos encadrants, **Mr. BENADDA Lotfi** et **Mme. KENICHE Assia**, ainsi que nos Co-encadrants Mrs. **ELHABIRI Sid Ahmed** et **BITEUR Kada** pour leur précieux encadrement, leur disponibilité constante, leurs conseils avisés ainsi que leur accompagnement bienveillant tout au long de ce travail. Nous tenons également à remercier les membres du jury, **Mme. CHACHOUA Mounira** d'avoir accepté de présider ce Jury et **Melle. BENMESSAOUD Nouara** pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer ce mémoire, leurs remarques pertinentes ne manqueront pas d'enrichir notre travail.

Nos remerciements s'adressent aussi à l'ensemble des enseignants du **Département d'Hydraulique** pour les efforts qu'ils ont fournis et les connaissances qu'ils nous ont transmises tout au long de notre parcours universitaire.

Nous souhaitons également exprimer notre reconnaissance à toute **l'Equipe du C.H.U de Tlemcen** pour leur accueil chaleureux, leur disponibilité, ainsi que leur précieuse collaboration lors de la réalisation de ce travail.

Enfin, nous adressons nos remerciements les plus sincères à nos chers parents, sans qui nous ne serions jamais arrivées là où nous sommes aujourd'hui.

Vous qui avez toujours guidé nos pas et soutenu nos rêves, ce travail vous est dédié.

À vous tous, un immense merci.

***Ikram & Ahlem***

# **DEDICACES**

**Je dédie ce mémoire**

**À mes chers parents, «Boumediene» et «Malika» qui m'ont soutenu avec amour,  
patience et dévouement tout au long de mon parcours.**

**Vos sacrifices et encouragements constants sont ma plus grande source de  
motivation.**

**À mon cher frère «Mohammed» et sa femme «Marwa» et ma chère sœur «Amel» et  
son époux «Said» leurs enfants «Zakaria» et «Firdaous Meriem» bien-aimés, pour  
leurs affections, leurs soutiens inestimables et leurs confiances en moi.**

**À toute ma famille, pour leur bienveillance et leur inspiration.**

**À mes amis et amis, pour les moments de partage et d'entraide qui ont enrichi  
mon expérience.**

**À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'accomplissement de ce  
travail.**

***Ikram***

# **DEDICACES**

**Merci Allah de m'avoir donné la capacité d'écrire**

**Et la patience d'aller jusqu'au bout de rêve.**

**Je dédie ce mémoire à mes parents :**

**A mon très cher père « Ghouti », qui m'a aidé à avancer dans la vie, et qui m'a élevé aux valeurs nobles inculquées, paix à son âme et que Allah l'accueille dans son vaste paradis et que ce travail soit le fruit de son éducation.**

**A ma très mère « Karima » qui a travaillé dure pour ma réussite, par son amour, son Soutien, ses sacrifices consentis et ses précieux conseils, j'exprime mes sentiments et mon éternelle gratitude à travers ce modeste travail. Merci ma mère pour votre assistance et votre présence dans ma vie.**

**Merci chère Maman**

**A mon frère « Mohamed »**

**A mes chères sœurs « Amel et Amine » et ses enfants « Maria,**

**Ghofrane, Amjed, Taha et Khalil »**

**A mes tantes « Fatiha et Zakia »**

**A ma grande famille MESSAOUDENE et DJEMAOUN**

**A mes amis et amies « Ikram, Nadia, Souad, Iman, Chahinez »**

**Que je remercie pour leur soutien pendant toutes ces années**

***Ahlem***

## RESUME

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la problématique environnementale liée à la gestion des eaux usées hospitalières. L'objectif principal est d'évaluer l'état du système de traitement des eaux usées au Centre Hospitalier Universitaire (C.H.U) de Tlemcen.

Une série d'analyses physico-chimiques, bactériologiques et organoleptiques a été réalisée pour caractériser ces eaux usées.

Une attention particulière a été accordée au phénomène de photo dégradation, en tant que mécanisme complémentaire de réduction des polluants organiques par l'action de la lumière.

Une solution alternative a été proposée sous forme d'une mini station de phyto-épuration, dimensionnée selon les caractéristiques locales et les résultats analytiques obtenus. Ce procédé écologique permet un traitement efficace à faible coût.

Les résultats démontrent l'efficacité de cette approche combinée (phyto-épuration et photo dégradation) dans l'amélioration de la qualité des rejets liquides hospitaliers.

**Mots clés :** Eaux usées Hospitalières, Analyses physico-chimiques, CHU-Tlemcen, Mini station de Phyto-épuration.

## ملخص

تتناول هذه المذكرة إشكالية بيئية تتعلق بإدارة المياه المستعملة الصادرة عن المؤسسات الاستشفائية، وتهدف إلى تقييم نظام المعالجة في المركز الاستشفائي الجامعي بتلمسان. تم إجراء تحاليل فيزيائية، كيميائية، بكتيرية وحسية لتحديد خصائص هذه المياه. كما تم التطرق إلى ظاهرة التحلل الضوئي كآلية إضافية تساعد على تفكيك الملوثات العضوية بفعل الضوء الطبيعي أو الاصطناعي. بعد التحليل، تم اقتراح تصميم محطة مصغرة للمعالجة النباتية (الفيتومعالجة)، تستجيب للمعايير البيئية المحلية والنتائج التجريبية. وتبين من خلال النتائج أن الجمع بين هذه التقنية والتحلل الضوئي يساهم بشكل فعال في تحسين نوعية المياه المطروحة من المؤسسات الصحية. **الكلمات المفتاحية:** المياه المستعملة في المركز الاستشفائي، التحاليل الفيزيائية و الكيميائية، المستشفى الجامعي لتلمسان، محطة مصغرة للمعالجة النباتية (الفيتومعالجة)

## Abstract

This thesis focuses on the environmental challenge of managing hospital wastewater. The main objective is to assess the treatment system at the University Hospital Center (C.H.U) of Tlemcen

A set of physico-chemical, bacteriological, and organoleptic analyses was conducted to characterize the wastewater.

Subsequently, an alternative solution was proposed through the design of a small-scale phytoremediation station, tailored to local conditions and informed by the analytical results. This ecological process ensures efficient and low-cost treatment.

The findings demonstrate the effectiveness of combining phyto remediation and photo degradation in improving the quality of hospital effluents.

**Keywords:** Managing hospital wastewater, physico-chemical Analysis, Tlemcen Academic-Hospital, Small-scale phyto remediation station.

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: Vue aérienne d'une station d'épuration.....	4
Figure 2: Eau d'industrielle .....	6
Figure 3: Les coliformes fécaux .....	14
Figure 4: Escherichia coli.....	14
Figure 5: Les étapes du prétraitement .....	18
Figure 6 : Dégrillage grossier .....	19
Figure 7: Dégrillage fin .....	19
Figure 8: Grille manuelle.....	19
Figure 9: Grille mécanique .....	19
Figure 10: Dessableur.....	20
Figure 11: Décanteur primaire .....	22
Figure 12: Lit bactérien .....	22
Figure 13: Schéma général d'une station d'épuration par boues activées.....	23
Figure 14: Disque biologique .....	23
Figure 15: Système de lagunage naturel.....	24
Figure 16: Lagunage aéré .....	25
Figure 17: Représentation schématique d'un marais filtrant à écoulement sur la surface avec plantes flottantes .....	29
Figure 18: Représentation schématique d'un marais filtrant à écoulement sur la surface avec plantes émergentes .....	29
Figure 19: Représentation schématique d'un marais à écoulement horizontal sous la surface .....	30
Figure 20: Représentation schématique d'un marais à écoulement vertical sous la surface.....	31
Figure 21: Gradient hydraulique théorique d'un filtre horizontal.....	33
Figure 22: Réseau d'alimentation aérien avec la plaque anti-affouillement (à gauche), ou enterré lors d'une bâchée (à droite).....	35
Figure 23: Schéma présentant le principe de fonctionnement de cheminées d'aérations et photo d'une cheminée d'aération sur le filtre vertical.....	35
Figure 24: épaissement et déshydratation des boues .....	37
Figure 25: Photo de boues en cours de séchage.....	38
Figure 26: CHU de TLEMCEN.....	44
Figure 27: station d'épuration de l'hôpital de Tlemcen .....	47
Figure 28:L'échantillon prélevé.....	48
Figure 29: Le genévrier .....	49
Figure 30: poudre de genévrier .....	50
Figure 31 : Balance électronique.....	51
Figure 32: agitateur .....	52
Figure 33: dispositif de filtration .....	51
Figure 34: Oxymétrie .....	52
Figure 35: DCO mètre.....	53
Figure 36: Réactifs pour la mesure de la DCO.....	54
Figure 37: agitations.....	54

Figure 38: Etuve.....	55
Figure 39: pH mètre .....	56
Figure 40: Incubateur .....	57
Figure 41: DBO mètre.....	58
Figure 42: Conductimètre.....	57
Figure 43: spectrophotomètre .....	58
Figure 44: la lampe visible UV 365 nm.....	60

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Classification des eaux selon leurs pH.....	11
Tableau 2: Volumes d'eau utilisés dans l'analyse de la DBO <sub>5</sub> .....	12
Tableau 3: Coefficient de biodégradabilité.....	12
Tableau 4 : Les valeurs de R $\theta$ et de Kr .....	32
Tableau 5: La porosité et la conductivité hydraulique du substrat. ....	33
Tableau 6: les classifications botanique .....	49
Tableau 7: traitement d'échantillon brut .....	63
Tableau 8: traitement d'échantillon de javel .....	64
Tableau 9: traitement d'échantillon de la poudre de genévrier.....	64
Tableau 10: traitement d'échantillon de la poudre de genévrier avec l'eau de javel.....	65
Tableau 11: traitement d'échantillon de photo dégradation .....	65

## SYMBOLES

<b>CDBO<sub>5</sub></b>	: Concentration moyenne journalière en DBO <sub>5</sub>
<b>CHU</b>	: Centre Hospitalier Universitaire
<b>DBO<sub>5</sub></b>	: Demande biologique
<b>DCO</b>	: Demande Chimique en Oxygène
<b>h</b>	: Profondeur du filtre en m
<b>MES</b>	: Matières En Suspension
<b>MESP</b>	: Marais à écoulement sur la surface avec plantes
<b>MEHS</b>	: Marais à écoulement horizontal sous la surface
<b>MEVS</b>	: Marais à écoulement vertical sous la surface
<b>MMS</b>	: Matières Minérales Sèches
<b>MVS</b>	: Matières Volatiles Sèches
<b>n</b>	: Porosité du gravier en %
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	: l'Azote ammoniacal
<b>pH</b>	: potentiel d'hydrogène
<b>STEP</b>	: Station d'Épuration
<b>T</b>	: Température

## TABLE DES MATIERES

Remerciements.....	
Dédicaces.....	
Dédicaces.....	
Résumé .....	
LISTE DES FIGURES .....	
LISTE DES TABLEAUX .....	
SYMBOLES.....	
Table des matières .....	
Introduction Générale.....	<a href="#">1</a>
Chapitre 1 .....	<a href="#">3</a>
Recherche Bibliographique.....	<a href="#">3</a>
1.1. INTRODUCTION.....	4
1.2. DEFINITION D'UNE STATION D'EPURATION.....	4
1.2.1. OBJECTIFS PRINCIPAUX D'UNE STATION D'EPURATION.....	4
1.2.2. CONDITIONS D'IMPLANTATION D'UNE STEP .....	5
1.3. DEFINITION DES EAUX USEES.....	5
1.4. NATURE ET ORIGINE DES EAUX USEES .....	5
1.4.1. EAUX DOMESTIQUES.....	5
1.4.2. EAUX USEES INDUSTRIELLES ET HOSPITALIERES .....	5
1.5. COMPOSITION DES EAUX USEES .....	7
1.6. ORIGINE DE LA POLLUTION DES EAUX.....	7
1.6.1. POLLUTION PHYSIQUE.....	7
1.6.2. POLLUTION CHIMIQUE.....	8
1.6.3. POLLUTION MINERALE .....	8
1.6.4. POLLUTION ORGANIQUE .....	8
1.6.5. poLLUTION AGRICOLE.....	9
1.6.6. pOLLUTION MICROBIOLOGIQUE .....	9
1.6.7. PARAMETRE DE CARACTERISATION DE L'EFFLUENT .....	9
1.6.7.1. PARAMETREs PHYSIQUEs.....	10
1.6.7.2. PARAMETRE ORGANOLEPTIQUE .....	11
1.6.7.3. PARAMETREs CHIMIQUEs .....	11
1.6.7.4. PARAMETRES BACTERIOLOGIQUES .....	13
1.7. EFFETS DE LA POLLUTION DE L'EAU .....	14
1.8. LA REUTILISATION DES EAUX USEES TRAITEES .....	15
1.9. CONCLUSION .....	16
Chapitre II.....	17
Théorie de dimensionnement d'une mini station de phyto-épuration.....	17
2.1. INTRODUCTION.....	18
2.2. PRETRAITEMENT (TRAITEMENT PRIMAIRE).....	18
2.2.1. DEGRILLAGE .....	19
2.2.2. DESSABLAGE .....	20
2.2.3. DEGRISSAGE –DESHUILAGE .....	21

2.2.4.	TAMISAGE.....	21
2.2.5.	DECANTEUR PRIMAIRE.....	21
2.3.	TRAITEMENT SECONDAIRE INTENSIF .....	22
2.3.1.	EPURATION PAR LIT BACTERIEN.....	22
2.3.2.	EPURATION PAR BOUES ACTIVEES .....	23
2.3.3.	EPURATION PAR DISQUE BIOLOGIQUE.....	23
2.4.	TRAITEMENT SECONDAIRE EXTENSIF .....	24
2.4.1.	EPURATION PAR LAGUNAGE NATUREL.....	24
2.4.2.	EPURATION PAR LAGUNAGE AERE.....	24
2.4.3.	EPURATION PAR FILTRE PLANTE DE MACROPHYTES .....	25
2.4.3.1.	MARAIS A ECOULEMENT SUR LA SURFACE AVEC PLANTES .....	28
2.4.3.2.	MARAIS A ECOULEMENT HORIZONTAL SOUS LA SURFACE .....	29
2.4.3.3.	MARAIS A ECOULEMENT VERTICAL SOUS LA SURFACE .....	30
2.4.3.4.	Dimensionnement des marais artificiels .....	31
2.4.3.5.	technique de la mise en œuvre de la station de phyto-épuration.....	34
2.5.	TRAITEMENT DES BOUES.....	36
2.5.1.	Epaississement .....	36
2.5.2.	déshydratation.....	37
2.5.3.	séchage naturel des boues.....	37
2.6.	Désinfection .....	38
2.6.1.	dimensionnement d'un réacteur UV .....	39
2.7.	Conclusion .....	39
	Chapitre III .....	40
	Matériel et méthode.....	40
3.1.	Introduction .....	41
3.2.	Présentation sur CHU de Tlemcen .....	41
3.2.1.	SITUATION FEOGRAPHIQUE.....	41
3.2.2.	Définition et mission .....	41
3.2.3.	3.2.2. Capacité en lits .....	41
3.2.4.	3.2.3. Services hospitaliers .....	42
	3.2.4. Services à haut risque .....	43
3.3.	Définition des effluents hospitaliers .....	44
3.3.1.	Origine des effluents au CHU de Tlemcen.....	44
3.3.2.	Composition des effluents hospitaliers.....	45
3.3.3.	Problématique du traitement au CHU de Tlemcen .....	45
3.3.3.1.	Adsorption à base de matériaux végétaux .....	46
3.3.3.2.	Photo dégradation par UV à 365 nm .....	46
3.4.	Matériels et protocoles d'analyses.....	48
3.4.1.	Protocoles expérimentaux.....	48
3.4.1.1.	Échantillonnage .....	48
3.4.2.	genévrier (Juniperus spp) .....	48
3.4.2.1.	Classification botanique.....	49
3.4.2.2.	Principaux composants chimiques .....	49
3.4.2.3.	Répartition géographique.....	49

3.4.2.4.	Utilisation du Genévrier dans la Purification.....	49
3.4.3.	PROTOCOLE opératoire .....	50
3.4.3.1.	Paramètres physico-chimique .....	51
3.5.	Conclusion .....	61
	Chapitre IV .....	62
	Résultat et interprétation.....	62
4.1.	Introduction.....	63
4.2.	Synthèse et interprétation des résultats.....	63
4.2.1.	Traitement sans additifs (échantillon brut).....	63
4.2.2.	Traitement à l'eau de Javel.....	64
4.2.3.	Traitement avec la poudre de genévrier .....	64
4.2.4.	Résultats de la photo dégradation UV 365 nm.....	65
4.3.	DIMENSIONNEMENT DE LA MINI-STATION DE PHYTO-EPURATION POUR LE chu-TLEMCEN.....	67
4.3.1.	Données de base pour la conception.....	67
4.3.2.	Dimensionnement du filtre à écoulement vertical .....	67
4.3.2.1.	Demande en oxygène (DO).....	67
4.3.2.2.	Surface du filtre vertical (Sv).....	68
4.3.2.3.	Temps de rétention hydraulique (TV) .....	68
4.3.3.	Dimensionnement du filtre à écoulement horizontal .....	68
4.3.3.1.	Hypothèses de conception.....	68
4.3.3.2.	Calcul de la surface du filtre horizontal (Sh) .....	68
4.3.4.	Traitement et séchage des boues.....	68
4.3.4.1.	Volume journalier de boues .....	69
4.3.4.2.	Surface de séchage nécessaire.....	69
4.3.5.	Résumé du dimensionnement .....	69
4.4.	REALISATION DU PROTOTYPE .....	69
4.5.	Conclusion .....	71
	Conclusion .....	72
	Générale.....	72
	Conclusion générale .....	73
	Référence.....	75

# **INTRODUCTION GENERALE**

Le traitement des eaux usées avant leur rejet dans l'environnement constitue un défi majeur pour de nombreux pays dans le monde. Ce problème est particulièrement prononcé dans les pays en développement, qui font face à un manque de financement et à une urbanisation et industrialisation désorganisées. En Afrique, la gestion des eaux usées est critique. La plupart des réseaux d'évacuation d'eaux usées connectés à des stations de traitement mises en place après les indépendances ne fonctionnent plus aujourd'hui, et les eaux usées brutes sont déversées dans les zones basses [1].

Cependant, de nombreuses études soulignent les impacts négatifs du mauvais assainissement sur les plans sanitaire, environnemental et économique, des centaines de millions de personnes dans le monde sont victimes de la schistosomiase, du choléra, de la fièvre typhoïde, de maladies parasitaires et autres infections. En outre, chaque année, 3,5 millions d'enfants meurent de diarrhée, principalement en raison de mauvaises conditions sanitaires. 51% des pays africains connaissent une pollution environnementale sévère, menaçant leurs ressources en eau [1].

Ces effets peuvent être amplifiés lorsqu'il s'agit de déchets dits spéciaux, comme ceux provenant des établissements hospitaliers. En effet, outre les composants des eaux usées domestiques, les eaux des établissements de santé contiennent davantage de détergents, de produits chimiques, ainsi que des germes pathogènes et des parasites.

Malgré les nombreux rapports de chercheurs, très peu d'actions ont été entreprises pour remédier à cette situation. Au Cameroun, la majorité des eaux usées provenant des zones urbaines et des industries sont aujourd'hui rejetées directement dans la nature sans traitement préalable. La plupart des stations d'épuration sont soit en panne, surchargées, soit abandonnées depuis plus d'une décennie [1].

La loi sur le régime de l'eau stipule que : « Il est interdit de déverser, écouler, jeter, infiltrer, enterrer, épandre, ou déposer directement ou indirectement dans les eaux toute matière solide, liquide ou gazeuse, en particulier les déchets industriels, agricoles ou nucléaires, susceptibles de nuire à la qualité des eaux de surface ou souterraines, ou des eaux maritimes, de porter atteinte à la santé publique, à la faune et à la flore aquatique ou sous-marine, ou d'affecter le développement économique et touristique des régions ». Ainsi, toutes les structures, telles que les établissements hospitaliers, sont appelées à traiter les eaux usées avant leur rejet dans l'environnement [1].

En Algérie, la gestion des rejets des eaux usées constitue un enjeu environnemental majeur, notamment en raison des grandes quantités de détritiss qui sont enfouies chaque année. Parmi ces rejets, ceux issus du secteur médical et pharmaceutique occupent une proportion significative, ce qui soulève des préoccupations particulières en matière de santé publique et de protection de l'environnement [2].

Face à cette problématique, les autorités algériennes ont mis en place des mesures spécifiques. Dès 2003, le ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement a commencé à s'intéresser de près à la gestion des déchets générés par les activités de soins. Pour encadrer cette question, une réglementation a été adoptée afin d'assurer un traitement plus rigoureux et sécurisé de ces déchets, qui peuvent représenter un risque biologique et chimique important [2].

Dans cette dynamique, le ministère de la Santé et de la Réforme hospitalière a pris le relais en intégrant les préoccupations environnementales dans ses politiques publiques. Il a renforcé le cadre législatif existant en émettant plusieurs directives complémentaires, destinées à améliorer la gestion des déchets médicaux et à garantir leur élimination dans des conditions respectueuses des normes de sécurité et de salubrité [2].

Malgré ces efforts, des lacunes persistent. En 2009, l'Institut National de Santé publique a mené une enquête approfondie à l'échelle nationale afin d'évaluer la gestion des rejets hospitaliers en Algérie. Cette étude a mis en évidence de nombreuses failles et insuffisances dans l'application des réglementations en vigueur, soulignant ainsi la nécessité de renforcer encore les dispositifs existants et de mettre en place des mesures plus efficaces pour assurer un meilleur contrôle et un traitement plus approprié de ces déchets sensibles [2].

L'Hôpital de Tlemcen (C.H.U) de Tlemcen, l'un des plus grands hôpitaux du pays, est un exemple de cette situation. Malheureusement, la station d'épuration destinée à traiter ses effluents est hors service depuis longtemps, ce qui engendre d'importants problèmes sanitaires et environnementaux. La situation est d'autant plus préoccupante que cet hôpital est situé en plein centre urbain. Il est donc crucial que des mesures soient prises pour améliorer la qualité des eaux rejetées par cette institution [1].

Le présent travail s'inscrit dans ce contexte et a pour objectif principal d'évaluer l'efficacité du système de gestion des eaux usées du C.H.U de Tlemcen. De manière plus Spécifique, il vise à :

- Diagnostiquer l'état actuel de la gestion des eaux usées au C.H.U.
- Évaluer l'efficacité du système existant dans le traitement des eaux usées.
- Proposer un système plus adapté au traitement des eaux usées du C.H.U.

Notre travail s'articule sur quatre chapitres, en l'occurrence :

- Chapitre 1 : Recherche bibliographique ;
- Chapitre 2 : Théorie de dimensionnement d'une mini station de phyto-épuration ;
- Chapitre 3 : Dimensionnement de la mini station de phyto-épuration de CHU-Tlemcen
- Chapitre 4 : Réalisation de la maquette, Résultats et interprétations

**CHAPITRE 1**  
**RECHERCHE**  
**BIBLIOGRAPHIQUE**

## 1.1. INTRODUCTION

L'épuration de l'eau consiste à éliminer les contaminants, en particulier dans les eaux usées domestiques, mais aussi dans les eaux naturelles polluées, par exemple, par le biais du lagunage. Le traitement des eaux usées est le processus d'élimination des polluants présents dans les eaux usées, principalement celles provenant des foyers.

Ce traitement peut être biologique et écologique, comme dans le cas de la bio-épuration ou de la bio-remédiation. Des plantes épuratrices sont utilisées dans le lagunage et la phyto-épuration pour prévenir la pollution des milieux aquatiques. Un sous-produit de ce traitement est généralement une boue semi-solide, connue sous le nom de boues d'épuration ou boues activées, qui nécessitent un traitement complémentaire avant d'être éliminée ou utilisée à des fins agricoles. Ce processus est géré par la station d'épuration [3].

## 1.2. DEFINITION D'UNE STATION D'EPURATION

C'est une installation conçue pour traiter les eaux usées domestiques ou industrielles, ainsi que les eaux pluviales, avant leur rejet dans le milieu naturel. L'objectif du traitement est de séparer l'eau des substances nuisibles pour l'environnement récepteur.

La première tentative d'épuration des eaux usées remonte à 1914, lorsqu'elle a été inventée par des scientifiques anglais [4].



**Figure 1:** Vue aérienne d'une station d'épuration [3]

### 1.2.1. OBJECTIFS PRINCIPAUX D'UNE STATION D'EPURATION

Les stations d'épuration (STEP) ont pour but principal de préserver l'environnement et la santé publique. Parmi leurs objectifs, on peut citer :

- Protéger la nappe phréatique contre la pollution.
- Éviter aux agriculteurs d'irriguer les terres agricoles avec des eaux usées.
- Réduire les risques de maladies transmises par l'eau.
- Permettre la réutilisation des eaux épurées pour l'irrigation.
- Réaliser des économies significatives d'eau.
- Prévenir la surexploitation des nappes souterraine [4].

### **1.2.2. CONDITIONS D'IMPLANTATION D'UNE STEP**

La station d'épuration doit être située en tenant compte des conditions suivantes :

- Minimiser les risques d'implantation dans des zones inondables.
- Prendre en considération les zones urbanisées et urbanisables en raison des nuisances potentielles telles que les mauvaises odeurs et les maladies transmissibles par l'air.
- L'implantation doit se faire en aval du réseau d'assainissement (près de l'exutoire) pour éviter le relevage, ce qui permet de réduire les coûts associés.
- La station d'épuration doit être située à un endroit où la collecte des eaux usées est optimale, par exemple, à un point stratégique entre deux agglomérations.
- Le rejet des eaux épurées doit être effectué de manière à ne pas nuire au milieu récepteur, notamment en évitant l'inondation des terres agricoles [4].

### **1.3. DEFINITION DES EAUX USEES**

Les eaux usées, également appelées eaux résiduaires, sont des eaux contenant des résidus, qu'ils soient solubles ou non, issus des activités humaines industrielles ou agricoles, et qui sont dirigées vers les canalisations d'évacuation. Bien qu'elles constituent une portion du volume des ressources en eau utilisables, leur qualité très dégradée nécessite un traitement préalable avant leur rejet dans le milieu naturel [5].

### **1.4. NATURE ET ORIGINE DES EAUX USEES**

#### **1.4.1. EAUX DOMESTIQUES**

Elles proviennent des habitations et sont généralement acheminées par le réseau d'assainissement jusqu'à une station d'épuration. Ces eaux se distinguent par leur forte teneur en matières organiques, en sels minéraux (azote, phosphore), en détergents et en germes fécaux. Elles peuvent être classées en trois catégories selon leur origine :

- Eaux de cuisine : Elles contiennent des matières minérales en suspension issues du lavage des légumes, des substances organiques (glucides, lipides, protides) provenant des aliments, ainsi que des détergents utilisés pour la vaisselle, qui contribuent à la solubilisation des graisses.
- Eaux des salles de bains : Elles sont enrichies en produits d'hygiène corporelle, principalement composés de matières grasses hydrocarbonées.
- Eaux de vannes : Issues des sanitaires, elles sont particulièrement riches en matières hydrocarbonées, en azote et en phosphore. Ces eaux, bien qu'adaptées aux procédés de traitement biologique, peuvent contenir des agents pathogènes tels que des bactéries, des virus et des parasites divers [6].

#### **1.4.2. EAUX USEES INDUSTRIELLES ET HOSPITALIERES**

Les eaux usées industrielles proviennent des activités des entreprises et des usines, qui produisent de grandes quantités de déchets contenant des produits chimiques toxiques et divers polluants. Ces déchets incluent souvent des métaux lourds, des hydrocarbures, des solvants et d'autres substances dangereuses pouvant nuire à l'environnement et à la santé humaine.

Une grande partie de ces déchets est rejetée dans les eaux douces, telles que les rivières et les lacs, sans traitement adéquat. Ces eaux contaminées sont ensuite transportées par les cours d'eau, polluant progressivement les canaux, les nappes phréatiques et, finalement, les mers et océans. Ce phénomène impacte directement les écosystèmes aquatiques, menaçant la faune et la flore qui y vivent.

Une autre source majeure de pollution est liée à la combustion de combustibles fossiles (comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel). Ces combustions libèrent des polluants atmosphériques tels que le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote, responsables de la formation des pluies acides. Ces pluies acides, en tombant sur le sol, s'infiltrant dans les cours d'eau, les réservoirs et d'autres étendues d'eau, augmentant la contamination chimique des milieux aquatiques.

Ces pollutions industrielles, qu'elles soient directes ou indirectes, aggravent la dégradation de l'eau, rendant parfois son traitement coûteux ou inefficace, et posent un défi majeur pour la préservation des ressources en eau et des écosystèmes [7].



**Figure 2:** Eau d'industrielle [8]

Quant-aux hôpitaux constituent une source significative de composés pharmaceutiques dans les eaux usées. Selon les estimations, leur contribution en produits pharmaceutiques et de soins personnels (PPSP) peut atteindre jusqu'à 59 %, en fonction de la taille de l'établissement, du type de services offerts et du nombre de patients desservis. La composition des effluents hospitaliers peut fortement influencer les niveaux de contamination détectés dans l'environnement, jouant ainsi un rôle déterminant dans la composition des effluents municipaux.

Une étude réalisée au Portugal a révélé la présence de 62 produits pharmaceutiques sur les 78 composés étudiés dans divers effluents hospitaliers. Ces rejets peuvent représenter une part significative des contaminants dans les eaux municipales, avec des contributions allant jusqu'à 50 % pour les analgésiques, 74 % pour les antihistaminiques H<sub>2</sub> et 49 % pour les antibiotiques. Par exemple, en Australie, la roxithromycine provenant des hôpitaux représentait 56 % des niveaux mesurés dans les effluents municipaux.

Les eaux usées hospitalières contiennent des concentrations bien plus élevées en produits pharmaceutiques que les eaux usées domestiques. Cela en fait une cible privilégiée pour un traitement à la source, afin de limiter la présence de ces composés dans l'environnement.

De plus, les effluents hospitaliers sont une source importante d'antibiotiques et de gènes de résistance aux antibiotiques, contribuant ainsi à l'émergence de résistances dans les milieux aquatiques. Par exemple, en Roumanie, des concentrations élevées d'antibiotiques, allant jusqu'à 53,05 µg/L, ont été détectées dans les eaux hospitalières.

Même les traitements conventionnels, tels que les boues activées et la désinfection au chlore, ne permettent pas une élimination complète. Pour l'ampicilline, par exemple, le taux de réduction n'est que de 55 %. Par ailleurs, une étude a montré une surexpression de deux gènes de résistance aux β-lactamines dans les effluents hospitaliers comparés au milieu récepteur.

Ainsi, la mise en place de traitements efficaces pour les effluents hospitaliers est essentielle. Cela contribuerait non seulement à réduire la concentration de produits pharmaceutiques dans l'environnement, mais également à ralentir la propagation de la résistance aux antibiotiques. Il devient donc impératif de traiter ces eaux avant qu'elles n'atteignent les stations d'épuration municipales [9].

### **1.5. COMPOSITION DES EAUX USEES**

Les eaux usées urbaines se caractérisent par une composition complexe, regroupant différentes impuretés d'origines variées. Elles contiennent principalement des matières minérales et organiques, qui proviennent des activités domestiques, industrielles ou urbaines.

Les matières organiques peuvent inclure des restes alimentaires, des graisses, des déchets biologiques (comme les excréments humains), ainsi que des produits ménagers (savons, détergents, etc.). Ces matières organiques peuvent être biodégradables ou non. Ces impuretés sont transportées par l'eau sous différentes formes :

- Les matières en suspension : Ce sont des particules visibles à l'œil nu, comme les déchets solides, qui peuvent flotter ou se déposer au fond selon leur densité.
- Les matières décantables : Ces particules plus lourdes ont tendance à se déposer rapidement lorsqu'elles sont immobiles, comme le sable ou les graviers.
- Les matières flottantes : Ce sont des substances légères qui restent à la surface, comme les huiles ou les mousses.
- Les matières colloïdales : Il s'agit de particules très fines, invisibles à l'œil nu, qui restent dispersées dans l'eau sans se déposer, créant une apparence trouble.

En plus des matières solides, les eaux usées contiennent aussi des substances dissoutes, comme les sels minéraux, les produits chimiques ou les nutriments (azote, phosphore). Cette diversité rend nécessaire un traitement spécifique pour éviter leur impact sur l'environnement [10].

### **1.6. ORIGINE DE LA POLLUTION DES EAUX**

On peut généralement classer les polluants de l'eau en trois grandes catégories :

#### **1.6.1. POLLUTION PHYSIQUE**

La pollution physique résulte de la présence de particules ou de déchets solides dans l'eau, capables d'obstruer le lit des cours d'eau. Cela concerne notamment les eaux issues des mines, des usines de défilage de bois ou encore des tanneries.

### 1.6.2. POLLUTION CHIMIQUE

La pollution chimique de l'eau résulte principalement de l'introduction de substances toxiques issues de différentes activités humaines, notamment l'agriculture et l'industrie :

- **Origine Agricole** : Les engrais chimiques et les produits phytosanitaires, comme les pesticides et les insecticides, sont largement utilisés pour améliorer les rendements agricoles. Cependant, ces substances, lorsqu'elles ne sont pas absorbées par les sols, sont emportées par les eaux de ruissellement.

Elles contaminent alors les nappes phréatiques, les rivières et les lacs, perturbant ainsi les écosystèmes aquatiques. Par exemple, un excès d'engrais riche en azote ou en phosphore peut provoquer l'eutrophisation, un phénomène qui entraîne une prolifération excessive d'algues et une diminution de l'oxygène dans l'eau [5].

- **Origine Industrielle** : Les rejets industriels représentent une autre source majeure de pollution chimique. Les déchets liquides issus des usines peuvent être transportés par les eaux de ruissellement ou déversés directement dans les cours d'eau, les rivières ou les mers.

Ces rejets contiennent souvent des substances dangereuses comme des hydrocarbures, des solvants ou des produits chimiques toxiques.

Parmi les polluants industriels, les métaux lourds (comme le mercure, le plomb ou les cyanures) sont particulièrement nocifs. Ces métaux, utilisés dans les industries métallurgiques et chimiques, sont difficiles à éliminer et s'accumulent dans les organismes vivants, perturbant les chaînes alimentaires [5].

- **Impact Global Sur L'eau** : La pollution chimique dégrade la qualité de l'eau, la rendant impropre à la consommation humaine et nuisible pour les écosystèmes aquatiques.

Les métaux lourds et les produits chimiques toxiques affectent non seulement la faune et la flore aquatiques, mais peuvent aussi entraîner des risques pour la santé humaine, notamment par le biais de la contamination des poissons ou de l'eau potable [5].

### 1.6.3. POLLUTION MINERALE

Proviennent principalement des rejets industriels contenant des substances inorganiques telles que les sels, nitrates, chlorures, phosphates, ions métalliques, ainsi que des métaux comme le plomb, le mercure, le chrome, le cuivre, le zinc et le chlore.

Ces substances peuvent :

- Nuire à la santé humaine,
- Perturber le fonctionnement des bactéries dans les stations d'épuration,
- Avoir un impact négatif sur les cultures agricoles [5].

### 1.6.4. POLLUTION ORGANIQUE

Représente souvent la part la plus importante des pollutions, car elle résulte de multiples activités humaines, qu'elles soient urbaines, industrielles, artisanales ou rurales. Chaque secteur génère des composés spécifiques qui peuvent être biodégradables ou non. Dans le cadre des eaux usées urbaines, on distingue plusieurs types de matières organiques, notamment les éléments courants tels que les protéides, les lipides et les glucides.

Aussi, on y trouve également des détergents, classés en fonction de leur charge ionique (anioniques, cationiques ou non ioniques), ainsi que des substances comme les huiles et les goudrons. Ces divers composés peuvent avoir des effets variés sur l'environnement, en fonction de leur nature et de leur dégradation [11].

#### **1.6.5. POLLUTION AGRICOLE**

Découle principalement de l'usage excessif d'engrais chimiques et de pesticides dans les pratiques agricoles et d'élevage. Cette utilisation entraîne une accumulation excessive d'azote et de phosphore dans les rivières et autres cours d'eau, perturbant ainsi les écosystèmes aquatiques. Les pesticides, qui constituent un problème majeur pour l'environnement, englobent toutes les substances utilisées pour éliminer ou contrôler les organismes nuisibles, qu'ils soient d'origine animale ou végétale. Ces produits sont conçus pour lutter contre des espèces considérées comme nuisibles pour l'homme ou pour d'autres formes de vie, mais leur utilisation abusive a des conséquences graves sur la biodiversité et la santé des sols et de l'eau [5].

#### **1.6.6. POLLUTION MICROBIOLOGIQUE**

Fait référence à la présence de micro-organismes pathogènes (bactéries, virus, protozoaires, parasites) dans les eaux usées. Ces micro-organismes proviennent généralement des matières fécales humaines ou animales. Lorsque des individus ou des animaux excrètent, ces matières peuvent contenir des agents pathogènes qui, une fois dans l'eau, peuvent se multiplier et contaminer l'environnement.

Les bactéries fécales, comme *Escherichia coli* (*E. coli*), sont souvent utilisées pour détecter cette pollution. Leur présence dans l'eau est un indicateur que celle-ci a été contaminée par des déchets humains ou animaux. Ces bactéries ne sont pas seulement des indicateurs; certaines d'entre elles peuvent être directement responsables de maladies chez l'homme, comme des infections gastro-intestinales.

Lorsque les eaux usées contenant ces agents pathogènes sont rejetées dans des rivières, lacs ou océans, elles peuvent entraîner de graves risques sanitaires. Par exemple, l'eau contaminée peut être utilisée pour boire, cuisiner ou irriguer des cultures, exposant ainsi les populations à des maladies dangereuses comme le choléra, la dysenterie, ou l'hépatite.

Au-delà de la santé humaine, cette pollution peut également affecter l'écosystème aquatique. Les micro-organismes peuvent perturber l'équilibre écologique des milieux aquatiques en nuisant aux organismes vivants, en particulier aux poissons et autres espèces aquatiques. Cela peut déstabiliser des habitats naturels et réduire la biodiversité dans ces zones [11].

#### **1.6.7. PARAMETRE DE CARACTERISATION DE L'EFFLUENT**

Dans cette section, nous examinerons les principaux paramètres physicochimiques et bactériologiques analysés lors de la phase expérimentale.

### 1.6.7.1. PARAMETRES PHYSIQUES

Les paramètres physiques sont :

- **Débit:** La mesure du débit permet d'évaluer la quantité de pollution rejetée par habitant équivalent, qui correspond au volume moyen d'eau usée déversé par habitant chaque jour. En effet, le débit représente un paramètre fondamental pour déterminer l'habitant équivalent [6]
- **Matières Volatiles Sèches (MVS):** Les MVS désignent la fraction organique des matières en suspension (MES), c'est-à-dire la partie composée principalement de substances organiques telles que les résidus végétaux, les microorganismes, et les composés carbonés. Lorsqu'elles sont chauffées à haute température (environ 550 °C), elles se volatilisent, laissant une fraction minérale résiduelle. Les MVS constituent généralement 70 à 80 % des MES, ce qui en fait un indicateur clé pour évaluer la proportion de matière organique présente dans un échantillon d'eau ou de boue. Elles sont largement utilisées dans le domaine de l'analyse environnementale pour estimer la charge organique dans les eaux usées ou les sédiments [9]
- **Turbidité :** La turbidité est un paramètre qui diminue à mesure que la transparence de l'eau augmente. Elle constitue un indicateur essentiel de pollution, reflétant la présence de matières organiques ou minérales sous forme colloïdale en suspension dans les eaux usées. Son niveau varie en fonction de la quantité et de la nature des matières en suspension présentes dans l'eau [12]
- **Température :** Il est essentiel de mesurer avec précision la température de l'eau, car elle influence plusieurs paramètres importants. Elle affecte notamment la solubilité des sels et des gaz, la dissociation des sels dissous, ce qui a un impact sur la conductivité électrique, ainsi que la détermination du pH. De plus, la température peut fournir des indications sur l'origine de l'eau et sur d'éventuels mélanges. [13].
- **Matières en suspension (MES) :** Les matières en suspension désignent les particules solides de taille significative, généralement supérieures à 10 µm, présentes dans l'eau sous forme de suspension. Ces particules peuvent être d'origine organique ou minérale et constituent une forme importante de pollution particulaire. Elles restent réellement en suspension dans des conditions d'écoulement précises, notamment lorsque la vitesse minimale des effluents atteint 0,5 m/s. À cette vitesse, les turbulences permettent de maintenir les particules en suspension, empêchant leur sédimentation. La mesure des MES est un indicateur clé pour évaluer la qualité de l'eau, car elle reflète la charge en matières solides susceptibles de poser des problèmes pour le traitement ou l'écoulement des eaux usées [13].
- **Matières Minérales Sèches (MMS) :** Les MMS correspondent au résidu obtenu après une évaporation complète de l'eau. Ce résidu, également appelé extrait sec, est composé à la fois de matières en suspension et de matières solubles, telles que les chlorures, les phosphates et d'autres substances dissoutes dans l'eau [12].

### 1.6.7.2. PARAMETRE ORGANOLEPTIQUE

Les paramètres organoleptiques sont :

- **Couleur** : La coloration des eaux usées brutes est principalement liée à la présence de matières organiques dissoutes ou en suspension sous forme colloïdale. Ces matières peuvent provenir de sources naturelles ou anthropiques. Par ailleurs, certains composés chimiques solubles, comme les pigments et autres substances colorées, contribuent également à l'altération de la teinte de l'eau, ce qui peut refléter l'état de dégradation ou la composition des eaux usées [6].
- **Odeur** : L'odeur des eaux usées résulte principalement de la fermentation des matières organiques qu'elles contiennent. Ce processus biologique, souvent lié à des conditions anaérobies, libère des composés volatils tels que le sulfure d'hydrogène, les acides gras volatils ou encore l'ammoniac, responsables des odeurs désagréables caractéristiques des eaux usées. L'intensité et la nature de ces odeurs peuvent varier en fonction du type et de la concentration des matières organiques présentes [6].

### 1.6.7.3. PARAMETRES CHIMIQUES

Les paramètres chimiques sont :

- **Potentiel hydrogène (pH)** : Le pH est l'une des propriétés fondamentales de l'eau. Il est déterminé par la concentration des ions hydronium ( $H^+$ ) et hydroxyde ( $OH^-$ ) présents dans une substance. Lorsque les quantités de ces deux ions sont égales, la substance est considérée comme neutre. Le pH d'une substance peut varier entre 1 et 14. Si le pH est supérieur à 7, la substance est considérée comme basique, tandis que si le pH est inférieur à 7, la substance est acide, conformément aux recommandations de l'OMS [14].

**Tableau 1:** Classification des eaux selon leurs pH [14]

Ph	Etat et type d'eau
pH < 5	Acidité forte → présence d'acides minéraux ou organiques dans les eaux naturelles
pH = 7	pH neutre
7 < pH < 8	Neutralité approchée → majorité des eaux de surface
5.5 < pH < 8	Majorité des eaux souterraines
pH = 8	Alcalinité forte, évaporation intense

- **La demande biologique en oxygène (DBO<sub>5</sub>)** : La DBO<sub>5</sub> correspond à la quantité d'oxygène consommée par les bactéries, à une température de 20°C, dans l'obscurité et pendant une période de 5 jours d'incubation d'un échantillon préalablement ensemencé. Ce délai permet l'oxydation biologique d'une fraction des matières organiques carbonées. Ce paramètre évalue l'oxygène nécessaire à la dégradation des matières organiques par des processus d'oxydation aérobie. La réaction chimique peut être résumée ainsi :  $\text{Substrat} + \text{microorganismes} + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + \text{énergie} + \text{biomasse}$ . Le tableau suivant présente les volumes d'eau utilisés dans l'analyse de la DBO<sub>5</sub> [14].

**Tableau 2:** Volumes d'eau utilisés dans l'analyse de la DBO<sub>5</sub>

Portée de mesure (mg/l)	Quantité (ml)	Quantité (ml)	Facteur
0-40		432	1
0-80		365	2
0-200		250	5
0-400		164	10
0-800		97	20
0-2000		43.5	50
0-4000		22.7	100

- **Oxygène dissous** : L'eau contient toujours de l'oxygène dissous, et sa concentration varie en fonction de la température et de la pression partielle, en raison de l'équilibre entre l'oxygène de l'air et celui présent dans l'eau. Plus l'eau est superficielle, plus elle contient d'oxygène. Les concentrations maximales d'oxygène dissous dépassent rarement 10 mg/l [15]
- **Demande chimique en oxygène (DCO)** : La DCO mesure la quantité d'oxygène nécessaire pour dégrader toutes les matières oxydables présentes dans l'eau, qu'elles soient biodégradables ou non. Contrairement à la DBO, qui ne prend en compte que la dégradation biologique, la DCO inclut également les substances organiques difficiles à décomposer par les microorganismes. Elle est déterminée en utilisant du bichromate de potassium, un oxydant puissant, qui réagit avec les substances organiques présentes dans l'eau. La quantité d'oxygène consommée par le bichromate lors de cette réaction permet d'évaluer la charge organique totale dans l'eau. Cette mesure est importante pour évaluer l'impact environnemental des eaux résiduaires, car une forte DCO indique une grande quantité de matière organique susceptible de consommer de l'oxygène lorsqu'elle se dégrade, ce qui peut affecter la faune aquatique [15].
- **Coefficient de biodégradabilité K** : La biodégradabilité représente la capacité d'un effluent à être décomposé ou oxydé par les micro-organismes impliqués dans le processus d'épuration biologique des eaux. Elle est quantifiée à l'aide d'un coefficient K, défini par la relation suivante [16].

$$K = \frac{DCO}{DBO_5} \quad (1)$$

**Tableau 3:** Coefficient de biodégradabilité [16]

Coefficient de biodégradabilité k	Mode de traitement
k=1	Pollution totalement biodégradable
1<k<1.6	Épuration biologique très possible
1.6<k<3.2	Traitement biologique associé à un traitement physico-chimique
k>3.2	Traitement biologique impossible

- **L'azote et le phosphore** : Les concentrations en azote et en phosphore sont des paramètres essentiels à surveiller. Des rejets excessifs de ces éléments peuvent entraîner l'eutrophisation des lacs et des cours d'eau [14].
- **L'azote** : Dans les eaux usées domestiques, l'azote se trouve principalement sous forme organique et ammoniacale. Il est mesuré à travers le N-NTK (azote total non transformé) et le N-NH<sub>4</sub> (azote ammoniacal). La concentration du N-NTK représente environ 15 à 20 % de celle de la DBO. L'apport quotidien moyen d'azote par habitant varie entre 10 et 15 g [14].
- **Phosphore** : Le phosphore dans l'eau existe sous différentes formes : phosphates, poly phosphates, et phosphore organique. Les principales sources de phosphore proviennent des déjections humaines et animales, ainsi que des produits de nettoyage. Les composés phosphorés sont particulièrement indésirables dans les réservoirs d'eau potable, car ils favorisent la prolifération des algues et du plancton aquatique, ce qui nuit à la qualité de l'eau [14].

#### 1.6.7.4. PARAMETRES BACTERIOLOGIQUES

Les micro-organismes présents dans les eaux usées sont responsables du processus de traitement biologique.

- **Les virus** : Ces agents pathogènes sont présents dans les eaux résiduaires en grande quantité, avec des concentrations pouvant atteindre des milliers d'unités infectieuses par millilitre [15]
- **Les helminthes** : Les vers sont fréquemment trouvés dans les eaux usées urbaines, et le nombre d'œufs d'helminthes peut varier de 10 à 103 œufs par litre. Parmi ces œufs, on retrouve des parasites comme les *Ascaris* et le *tœnia* [15].
- **Les protozoaires** : Certains protozoaires, notamment ceux responsables de la dysenterie (une infection intestinale), représentent un danger sanitaire majeur. Ces micro-organismes forment des kystes résistants qui peuvent être transportés par les eaux usées et persister dans l'environnement [15].
- **Les coliformes** : sont des micro-organismes que l'on retrouve largement dans l'environnement, tels que dans le sol, la végétation, et dans les intestins des mammifères, y compris les humains. L'ensemble de ces coliformes est appelé coliformes totaux. Parmi eux, certains se trouvent dans les excréments d'animaux à sang chaud et sont appelés coliformes fécaux. *Escherichia coli* est l'espèce la plus fréquemment liée à ce groupe. Les coliformes fécaux constituent un sous-ensemble des coliformes totaux et incluent toutes les bactéries de la famille des Entérobactéries. Ces bactéries sont généralement aérobies ou anaérobies facultatives, de forme bâtonnette, de type Gram négatif, sporulées, et produisent des colonies bleues en moins de 24 heures à une température de 44,5°C sur une gélose contenant du lactose.



**Figure 3:** Les coliformes fécaux [14]

- **Escherichia coli (E. coli)** : aussi connue sous le nom de colibacille, est une bactérie naturellement présente dans le système digestif des humains et de nombreux animaux. Dans des conditions normales, elle n'est pas pathogène, c'est-à-dire qu'elle ne provoque pas d'infections, mais elle peut devenir dangereuse dans certaines situations. E. coli appartient à la famille des Entérobactéries. Il s'agit d'un bacille de type Gram négatif, en forme de bâtonnet, qui peut se déplacer à l'aide de flagelles ou être immobile [15].



**Figure 4:** Escherichia coli [14]

### 1.7. EFFETS DE LA POLLUTION DE L'EAU

La pollution de l'eau entraîne diverses répercussions, qui peuvent être regroupées en cinq grandes catégories :

- **Conséquences sur la santé** : Ces impacts concernent directement le bien-être des populations et doivent être pris en compte en priorité.
- **Conséquences écologiques** : Ces effets se manifestent par la détérioration des écosystèmes naturels. L'impact écologique d'une pollution est évalué en comparant

l'état d'un milieu pollué avec ce qu'il aurait été en l'absence de contamination. Cette évaluation peut être complexe, car la pollution peut parfois amplifier un phénomène naturel préexistant. De manière générale, elle entraîne une réduction des possibilités d'exploitation du milieu, notamment pour la pêche, l'aquaculture ou encore le tourisme [17].

- **Conséquence sur l'agriculture** : Dans plusieurs régions, l'eau, souvent utilisée à l'état brut pour l'irrigation et l'arrosage, joue un rôle essentiel en agriculture. Cependant, sa qualité impacte directement la structure du sol, la biodiversité microbienne, ainsi que la croissance des cultures et la santé du bétail. De plus, les boues issues du traitement des eaux usées peuvent polluer les sols si elles contiennent des substances toxiques, notamment des métaux lourds [17].
- **Conséquences visuelles** : Bien que n'ayant pas d'impact majeur sur la santé ou l'environnement, cette forme de pollution affecte l'aspect esthétique d'un lieu. Elle altère la perception que l'on a d'un espace, comme lorsqu'on trouve des bouteilles en plastique sur une plage ou des résidus de goudron sur une route, nuisant ainsi à son attrait visuel.
- **Impacts sur l'industrie** : est un grand consommateur d'eau, avec des besoins souvent très élevés. Par exemple, la production de 1 kg d'aluminium nécessite 1 m<sup>3</sup> d'eau. Pour les usages industriels, la qualité de l'eau doit répondre à des exigences strictes, tant sur le plan chimique (minéralisation, corrosion, entartrage) que biologique (encrassement des canalisations par des micro-organismes). La pollution de l'eau peut ainsi freiner le développement industriel, ce qui explique pourquoi les préoccupations liées à cette problématique sont apparues en premier dans les pays industrialisés [17].

### 1.8. LA REUTILISATION DES EAUX USEES TRAITEES

L'eau usée une fois épurée peut être réutilisée dans divers secteurs, notamment l'agriculture, l'industrie et les usages domestiques, couvrant respectivement 70 %, 20 % et 10 % de leurs besoins en eau.

Ces dernières années, la réutilisation des eaux usées a connu une forte croissance, avec une augmentation annuelle des volumes recyclés allant de 10 à 29 % en Europe, aux États-Unis et en Chine, et atteignant même 41 % en Australie. Actuellement, plusieurs pays, dont la Californie, la Floride, le Mexique et la Chine, réutilisent quotidiennement entre 1,5 et 1,7 million de m<sup>3</sup> d'eau traitée, un chiffre particulièrement impressionnant.

L'Algérie, pays au climat semi-aride, a dû faire face à des périodes de sécheresse. Aujourd'hui, sa stratégie nationale de développement durable repose sur un plan stratégique intégrant trois dimensions essentielles : sociale, économique et environnementale. Le pays compte actuellement 134 stations d'épuration (STEP et lagunes) en activité, avec une capacité totale estimée à 12 millions d'équivalents habitants, soit environ 800 hm<sup>3</sup> par an. La réutilisation des eaux usées traitées, notamment pour l'irrigation agricole, constitue désormais un axe majeur de la politique nationale en matière de gestion des ressources en eau [18].

## **1.9. CONCLUSION**

Les eaux usées résultent principalement des activités humaines, qu'elles soient domestiques, industrielles ou agricoles, d'où leur appellation. Elles contiennent divers polluants, notamment des particules en suspension qui entravent la vie des organismes photosynthétiques et favorisent l'envasement des cours d'eau.

La présence de matière organique réduit la concentration en oxygène dissous, ce qui peut altérer voire éliminer certaines espèces aquatiques. De plus, la pollution par l'azote et le phosphore entraîne des nuisances, telles que l'eutrophisation des milieux récepteurs.

Afin de limiter ces impacts, les eaux usées sont collectées par le réseau d'assainissement urbain, puis acheminées vers une station d'épuration où elles subissent différents traitements [12].

**CHAPITRE II**  
**THEORIE DE**  
**DIMENSIONNEMENT D'UNE**  
**MINI STATION DE PHYTO-**  
**EPURATION**

## 2.1. INTRODUCTION

Les eaux usées contiennent une forte concentration de substances polluantes, qui représentent un danger à la fois pour l'environnement et pour la santé humaine. Afin de limiter leur impact, ces eaux doivent être traitées avant d'être rejetées dans la nature ou réutilisées.

Le traitement des eaux usées comprend plusieurs étapes :

- Le prétraitement (élimination des déchets grossiers, des sables et des graisses).
- Le traitement primaire (décantation des matières en suspension).
- Le traitement secondaire.

L'épuration des eaux usées est essentielle pour :

- préserver les écosystèmes naturels.
- protéger la santé des populations.
- permettre la réutilisation des eaux traitées.
- valoriser les boues issues des stations d'épuration [19].

## 2.2. PRETRAITEMENT (TRAITEMENT PRIMAIRE)

Les prétraitements et les traitements primaires ont pour principal objectif d'éliminer les matières flottantes et les particules en suspension contenues dans les eaux arrivant à la station d'épuration. Ces étapes précèdent les traitements biologiques.

Le prétraitement comprend généralement les opérations suivantes: le dégrillage (ou tamisage), le dessablage et le déshuilage [19].

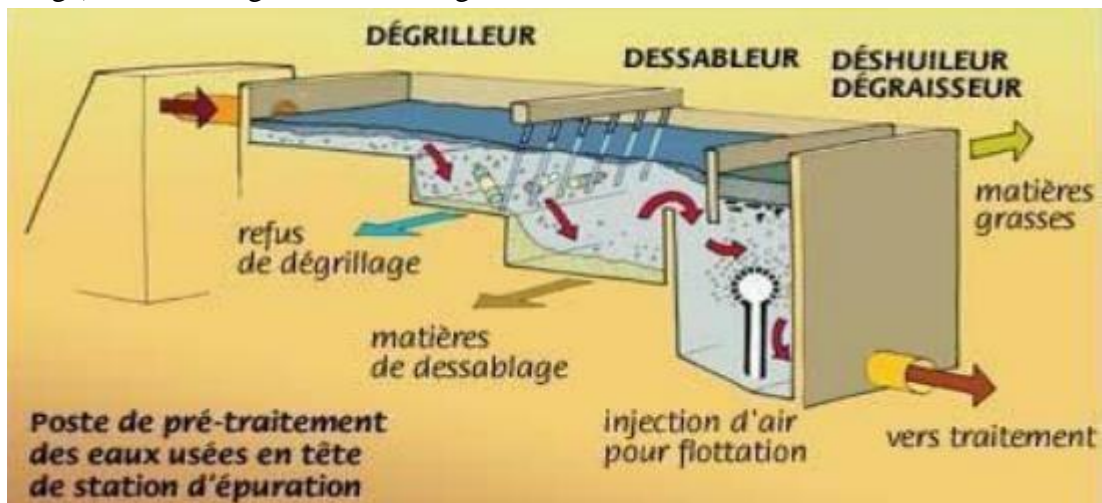


Figure 5: Les étapes du prétraitement [20]

### 2.2.1. DEGRILLAGE

Le dégrillage consiste à faire passer les eaux usées à travers une grille dont les barreaux, plus ou moins espacés, retiennent les déchets les plus grossiers. Cette étape permet de protéger les équipements situés en aval dans la station d'épuration. L'espacement des barreaux est choisi en fonction des caractéristiques de l'effluent à traiter [19].

On distingue trois types de dégrillage selon la largeur des intervalles entre les barreaux :

- **Le pré-dégrillage:** espacement de 30 à 100 mm ;
- **Le dégrillage moyen:** espacement de 10 à 25 mm ;
- **Le dégrillage fin:** espacement de 3 à 10 mm.



Figure 6 : Dégrillage grossier [21]



Figure 7: Dégrillage fin [22]



Figure 8: Grille manuelle [23]



Figure 9: Grille mécanique [21]

Le dimensionnement dépend du :

1. Débit à traiter (Q) : Le débit maximal horaire (Q max) doit être connu. Il est exprimé en m<sup>3</sup>/h.
2. Vitesse de passage de l'eau à travers la grille (V) :
  - Pour éviter le dépôt des matières: 0,6 à 1,2 m/s
  - Typiquement: 0,8 à 1 m/s en période de débit maximal
3. Surface utile de la grille (S) : Elle est calculée par la formule :

$$S = \frac{Q}{V} \quad (2)$$

Avec :

- S: surface utile en m<sup>2</sup>
  - Q: débit en m<sup>3</sup>/s
  - V: vitesse de passage en m/s
4. Espacement des barreaux : Selon le type de dégrillage :
    - Pré-dégrillage: 30–100 mm
    - Dégrillage moyen: 10–25 mm
    - Dégrillage fin: 3–10 mm

### 2.2.2. DESSABLAGE

Le dessablage a pour objectif d'éliminer, des eaux brutes, les sables et autres particules minérales de taille généralement supérieure à 0,2 mm. Cela permet d'éviter l'accumulation de dépôts dans les conduites et les canaux, tout en protégeant les pompes et les équipements contre l'usure due à l'abrasion.

La vitesse de décantation des particules dépend de plusieurs facteurs: leur taille, leur nature, ainsi que la viscosité du liquide dans lequel elles se trouvent [19].



**Figure 10:** Dessableur [24]

Le dimensionnement dépend du :

1. Vitesse de l'eau dans le dessableur : varie de 0,2 à 0,4 m/s, Cette vitesse permet aux particules de se déposer sans être emportées par l'écoulement.
2. Temps de séjour : Recommandé de 30 à 60 secondes
3. Dimensions du canal ou du bassin : Pour un dessableur à canal rectangulaire :
  - Longueur (L): généralement 10 à 20 fois la hauteur (H) du canal
  - Largeur (l): selon le débit, souvent  $H \approx l$
  - Hauteur (H): dépend de la vitesse et du temps de chute des particules

Formules de base

- Temps de séjour (T) :

$$T = \frac{L}{V} \quad (3)$$

Où :

L = longueur du canal (m)

V = vitesse de l'eau (m/s)

- Volume utile ( $V_u$ ) :

$$V_u = Q \times T \quad (4)$$

Où :

Q = débit en m<sup>3</sup>/s

T = temps de séjour en s

- Vitesse de chute ( $V_c$ ) : Pour un sable de 0,2 mm dans de l'eau à 15°C,  $V_c \approx 2,5$  cm/s

### 2.2.3. DEGRISSAGE –DESHUILAGE

Un séparateur de graisses et d'huiles végétales est installé au niveau de la cantine. Son rôle est d'éliminer ces substances, car leur présence dans les eaux usées peut entraîner plusieurs problèmes, notamment :

- l'encrassement des décanteurs,
- la réduction de l'efficacité de l'oxygénation dans les systèmes de traitement,
- une mauvaise décantation des matières,
- l'obstruction des pompes et des canalisations.

Pour faire un bon dégraissage, il faut assurer une température de l'eau inférieure à 30°C [19]

Le dimensionnement dépend du :

- Temps de séjour (T)
  - Typiquement: 2 à 5 minutes pour un dégraisseur à flottation naturelle
  - Pour les systèmes à air (flottation à air dissous), un temps plus court peut suffire.
- Volume utile (V)

$$V=Q \times T \quad (4)$$

Où :

- V = volume du bassin (m<sup>3</sup>)
- Q = débit (m<sup>3</sup>/min)
- T = temps de séjour (min)

### 2.2.4. TAMISAGE

Le tamisage constitue la deuxième étape de prétraitement, offrant une séparation des déchets plus précise que celle assurée par le dégrillage dans les eaux usées brutes. Ce processus utilise des interstices de dimensions variant de 6 mm à 0,25 mm, réalisés à l'aide de tôles perforées ou grillagées, également appelées mailles Johnson. Le tamisage est généralement automatisé grâce à des systèmes motorisés de collecte tels que vis, tambours ou racles. Il existe également des options manuelles, plus économiques, mais nécessitant l'intervention d'un opérateur. Les déchets solides récupérés peuvent ensuite être envoyés vers un dispositif de compactage permettant de réduire leur poids et leur volume tout en optimisant leur taux de siccité [25].

### 2.2.5. DECANTEUR PRIMAIRE

Il s'agit de la décantation primaire où plus de 75% de matières en suspension sont éliminées par sédimentation [26].



**Figure 11:** Décanteur primaire [26]

## **2.3. TRAITEMENT SECONDAIRE INTENSIF**

### **2.3.1. EPURATION PAR LIT BACTERIEN**

Le fonctionnement des lits bactériens repose sur l'écoulement gravitaire de l'effluent, préalablement décanté, sur un lit de matériaux comme la pierre ou la pouzzolane, dont la taille des grains varie entre 4 et 8 cm. Ce lit, équipé d'un système d'aération, sert de support au développement des bactéries chargées de traiter les polluants. Ces lits sont le plus souvent construits sous forme circulaire, avec des diamètres allant de quelques mètres à une cinquantaine de mètres.



**Figure 12:** Lit bactérien [27]

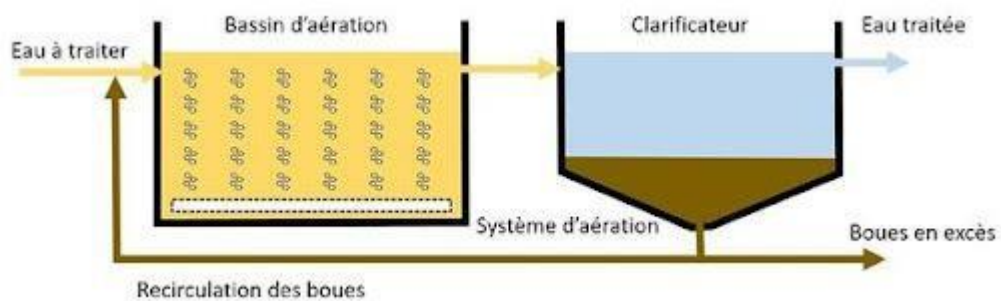
### 2.3.2. EPURATION PAR BOUES ACTIVEES

Le procédé des boues activées est un système de traitement en continu, dans lequel les eaux usées sont mises en contact, pendant une durée suffisante, avec des floccs bactériens maintenus en suspension et agités dans le liquide, afin de favoriser un contact étroit avec l'ensemble de l'effluent.

Ces floccs, qui forment les boues activées, sont constamment renouvelés grâce à une recirculation continue. Le traitement se déroule en conditions aérobies, nécessitant un apport constant en oxygène, assuré par des aérateurs de surface.

Le système de traitement par boues activées comprend trois étapes principales :

- Un bassin biologique où les micro-organismes épurateurs sont maintenus en suspension et bien oxygénés.
- Un décanteur secondaire servant à séparer les boues du liquide clarifié.
- Un mécanisme de recirculation des boues vers le bassin biologique.



**Figure 13:** Schéma général d'une station d'épuration par boues activées [28]

### 2.3.3. EPURATION PAR DISQUE BIOLOGIQUE

Les disques biologiques forment un dispositif (technologie biodisques) utilisé pour le traitement secondaire des eaux usées. Ce système comprend de grands disques biologiques en rotation, partiellement immergés dans une cuve contenant des eaux usées brutes, permettant ainsi le contact entre les eaux usées et des micro-organismes, dans un environnement aérobie [29].



**Figure 14:** Disque biologique [30]

## 2.4. TRAITEMENT SECONDAIRE EXTENSIF

### 2.4.1. EPURATION PAR LAGUNAGE NATUREL

Le lagunage est principalement utilisé comme traitement secondaire des eaux usées, notamment en milieu rural. Il est généralement mis en place en aménageant des dépressions naturelles, en creusant le sol ou en construisant une digue étanche. Lorsque le sol est perméable, il est nécessaire de le recouvrir d'une membrane plastique ou d'une couche de bentonite afin d'éviter toute contamination des nappes phréatiques.

Parmi les principaux avantages du lagunage naturel, on peut citer son faible coût d'exploitation, sa bonne intégration dans le paysage environnant, ainsi qu'une efficacité notable dans l'élimination des agents pathogènes [31].



**Figure 15:** Système de lagunage naturel [32]

### 2.4.2. EPURATION PAR LAGUNAGE AERE

Le lagunage aéré, également appelé étang ou bassin aéré, est un procédé de traitement des eaux usées basé sur une aération artificielle visant à stimuler l'oxydation biologique. Bien qu'il repose sur une intervention mécanique, ce type de traitement reste respectueux de l'environnement, car il utilise des processus naturels et biologiques. Il peut d'ailleurs être intégré dans des bassins écologiques dotés de filtres bactériens.

Pour assurer le bon fonctionnement du système à boues activées dans un lagunage aéré, il est essentiel de réguler la concentration en micro-organismes, le taux d'oxygène dissous dans l'eau et la durée de séjour des effluents dans le bassin d'aération. Les étapes d'égalisation, d'aération et de clarification peuvent d'ailleurs être réalisées dans un même réacteur fonctionnant de manière séquentielle [33].



**Figure 16:** Lagunage aéré [34]

### 2.4.3. EPURATION PAR FILTRE PLANTE DE MACROPHYTES

La méthode de traitement des eaux usées domestiques à l'aide de filtres plantés de macrophytes a vu le jour dans les années 1970, à la suite des travaux du Dr Seidel en Allemagne.

Depuis cette période, le procédé a été adapté à de nombreuses situations. En France, dès la fin des années 1980, des essais ont été menés pour utiliser directement les eaux usées non prétraitées sur ces filtres, ce qui a permis de supprimer une étape de traitement initial et de simplifier notablement la gestion des boues.

Aujourd'hui, cette solution est largement utilisée par les petites collectivités en métropole, et elle est appréciée pour sa fiabilité, ses bonnes performances ainsi que pour son coût réduit d'investissement et d'exploitation par rapport à d'autres systèmes [35].

Ainsi, la phyto-épuration est un procédé de traitement des eaux polluées par divers contaminants comme la matière organique, les métaux lourds, les hydrocarbures ou encore les pesticides. Cette technique repose sur l'aptitude de certaines plantes à croître dans des environnements contaminés, et à interagir avec les polluants en les absorbant, en les accumulant, en les stabilisant, en les transformant ou en les faisant volatiliser [36].

L'intégration des plantes aquatiques dans les systèmes de traitement des eaux s'inspire du rôle naturel que jouent les zones humides dans le maintien de la qualité des milieux aquatiques. Si l'utilisation de ces milieux pour traiter les eaux usées remonte à environ un siècle, elle relevait davantage d'un usage opportuniste – souvent au détriment de l'écosystème – que d'une véritable stratégie de traitement. Ce n'est qu'à partir des années 1950, grâce à une meilleure compréhension du fonctionnement écologique des zones humides, que l'idée de concevoir des marais artificiels dédiés au traitement (appelés *constructed wetlands* en anglais) a émergé.

Historiquement, le Dr Käthe Seidel, en Allemagne, fut pionnière en testant ce type de filière dans les années 1960. Ses premières installations ont montré un potentiel prometteur pour les petites collectivités, bien qu'elles aient nécessité des études approfondies pour garantir leur efficacité et leur durabilité.

Contrairement aux systèmes traditionnels de traitement des eaux, ces marais artificiels sont des écosystèmes complexes, nécessitant une approche pluridisciplinaire impliquant l'hydraulique, la chimie, la microbiologie et la physiologie végétale pour en saisir les mécanismes. Jusqu'au début des années 2000, l'évaluation de ces filières s'est appuyée sur des suivis quotidiens des performances à chaque étape, sans permettre de quantifier précisément les mécanismes internes. Malgré cela, ces observations ont permis de définir les premières bases de dimensionnement, notamment une surface de 2,5 m<sup>2</sup> par équivalent-habitant (EH), selon Boutin (1987). Pendant près de quinze ans, Irstea, avec le soutien des SATESE, a conduit de nombreuses études pour affiner les conceptions, en tenant compte de la diversité des réseaux, des conditions climatiques et des configurations de filtres [36].

Un marais artificiel se compose principalement d'un bassin rempli d'eau et d'un substrat constitué de sédiments, de matières organiques et, le plus souvent, de plantes vasculaires. En complément de ces éléments, d'autres composantes typiques des milieux humides, comme les communautés microbiennes et les invertébrés, s'y établissent naturellement.

- **UN BASSIN**

La création d'une zone humide artificielle peut tirer parti de la topographie naturelle du site, complétée par des travaux d'aménagement spécifiques. Il est essentiel de garantir l'imperméabilité du sol afin d'éviter l'infiltration des effluents collectés dans le bassin. Par ailleurs, le choix de l'emplacement ainsi que le dimensionnement de ce bassin doivent être adaptés à la configuration du terrain et à la zone de drainage environnante.

- **L'EAU**

Les marais se forment lorsque l'eau s'accumule dans une zone en dépression où une couche imperméable empêche son infiltration dans le sol. Dans la conception d'un marais artificiel, l'hydrologie joue un rôle central, car elle conditionne le fonctionnement global du système. Elle est souvent considérée comme le principal facteur déterminant la réussite ou l'échec de ce type d'aménagement [36].

- **LE SUBSTRAT, SEDIMENT ET DETRITU**

Dans la construction d'un marais artificiel, les substrats utilisés sont généralement composés de sol, de sable, de gravier, de roches ainsi que de matière organique compostable, cette dernière étant définie comme biodégradable par l'action des microorganismes (Société québécoise de phytotechnologie, 2014). En raison de la faible vitesse d'écoulement des eaux usées à travers le système, des sédiments et des débris organiques ont tendance à s'y accumuler.

Ces substrats jouent un rôle clé dans le fonctionnement du marais pour plusieurs raisons :

- Ils abritent une grande diversité d'organismes vivants.
- Leur perméabilité influence directement le mouvement de l'eau dans le marais.
- Ils sont le siège de nombreuses transformations biologiques, notamment microbiennes.
- Ils servent de réservoir à divers polluants.

- L'accumulation de détritiques augmente la teneur en matière organique, qui offre des surfaces propices à l'attachement microbien et constitue une source de carbone pour les processus biologiques.

Lorsqu'ils sont saturés d'eau, les caractéristiques physiques et chimiques des substrats évoluent. L'eau remplace alors les gaz présents dans les pores du sol, et l'oxygène est rapidement consommé par l'activité microbienne. Une fois l'oxygène épuisé, il ne peut être remplacé que lentement par diffusion, ce qui conduit à un environnement anoxique (sans oxygène). Ce type de milieu réducteur est essentiel pour la rétention et la transformation de certains polluants, notamment l'azote et les métaux.

- **LES PLANTES**

Les plantes vasculaires (plantes supérieures) et non vasculaires (comme les algues) jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement des zones humides artificielles. Par le processus de photosynthèse, les algues contribuent à augmenter la concentration d'oxygène dissous dans l'eau, ce qui influence la dynamique des nutriments et des métaux.

Au-delà de leur aspect esthétique, la végétation présente dans ces systèmes assure de nombreuses fonctions écologiques et épuratoires :

- Les plantes vasculaires stabilisent le substrat, limitant ainsi l'érosion et réduisant la vitesse de l'écoulement de l'eau.
- En ralentissant le flux hydraulique, elles favorisent la décantation des matières en suspension et des nutriments.
- Lorsqu'elles meurent, les plantes produisent de la matière organique et de la litière, contribuant à la continuité du cycle biologique au sein du marais.
- Elles absorbent le carbone, les nutriments et les oligo-éléments, qu'elles intègrent dans leurs tissus.
- La végétation participe aussi aux échanges gazeux entre l'atmosphère et les sédiments, influençant les conditions biochimiques du système.
- Le choix des espèces végétales à planter repose sur plusieurs critères clés :
- leur capacité à s'adapter aux conditions climatiques locales,
- la durée de leur cycle végétatif,
- leur vitesse de croissance,
- la facilité d'exportation de la biomasse produite,
- et leur efficacité dans les processus d'épuration.
- Parmi les espèces les plus fréquemment utilisées figurent les phragmites (roseaux), typhas, joncs, massettes et bambous

- **MICROORGANISMES**

Les marais artificiels abritent une grande diversité de microorganismes, parmi lesquels on trouve notamment des bactéries, des algues, des champignons microscopiques (mycètes), des protozoaires, des zooplanctons, des virus et des nématodes. Parmi ces organismes, les bactéries occupent une place centrale en raison de leur implication directe dans les processus de traitement des eaux, ce qui en fait les plus étudiées.

Leur fonction principale, comme dans tout procédé biologique, consiste à dégrader la matière organique.

Grâce à ces processus d'oxydation et de réduction, les bactéries génèrent l'énergie nécessaire à leur croissance (biosynthèse) tout en transformant les composés azotés et phosphorés en formes assimilables par les plantes. Elles jouent également un rôle clé dans les cycles de l'azote, notamment à travers les phénomènes de nitrification et de dénitrification.

Lorsque l'on parvient à créer des conditions alternant phases aérobies et anaérobies dans le système, les bactéries nitrifiantes convertissent l'azote ammoniacal en nitrites puis en nitrates dans les zones oxygénées. Ensuite, dans les zones dépourvues d'oxygène, les bactéries dénitrifiantes transforment ces nitrates en azote gazeux, qui est alors libéré dans l'atmosphère.

En plus de leur rôle biochimique, les microorganismes forment également des floccs biologiques qui facilitent la décantation des matières en suspension (MES), un mécanisme particulièrement efficace dans les systèmes à écoulement en surface.

On peut classer les marais filtrants selon le type d'écoulement et selon que l'eau soit libre ou sous la surface du substrat.

#### **2.4.3.1. MARAIS A ECOULEMENT SUR LA SURFACE AVEC PLANTES**

Ce type de marais artificiel, à écoulement horizontal de surface, est constitué d'un bassin peu profond dans lequel les eaux usées circulent à travers des plantes flottantes et émergentes (Gagnon et al. 2013). Une couche imperméable située sous le bassin empêche l'infiltration de l'eau dans le sol, tandis qu'une couche supérieure de sol sert de support pour l'enracinement des végétaux.

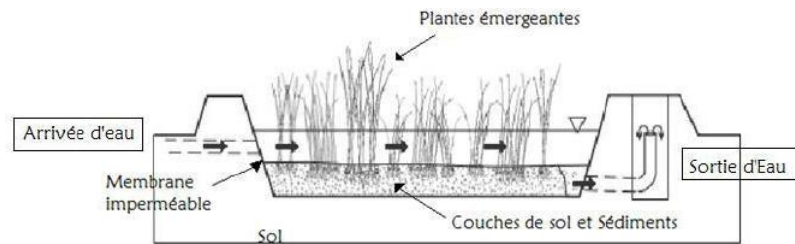
L'eau s'écoule horizontalement, de l'entrée vers la sortie du système, par simple gravité. Pour assurer cet écoulement, une pente douce de 1 à 3 % doit être intégrée dans le design du bassin. Un environnement aérobie est présent dans la fine couche d'eau en contact avec l'air et autour des racines (rhizosphère), tandis que le reste du bassin est majoritairement en conditions anaérobies.

Le principal atout de ce type de marais (appelé MESP – Marais à Écoulement de Surface Planté) réside dans ses faibles coûts d'installation et d'exploitation. Toutefois, pour atteindre une efficacité équivalente à celle d'autres types de marais, il nécessite une surface plus importante. Ce système est peu adapté aux régions froides, car en cas de gel, une couche de glace se forme, interrompant les processus biologiques essentiels au traitement.

Par ailleurs, la mort des plantes entraîne une augmentation de la vitesse d'écoulement, ce qui réduit le temps de rétention des eaux usées dans le marais. Ce phénomène ralentit le métabolisme des bactéries responsables de la dégradation des polluants, rendant le traitement moins efficace. En cas de charges organiques importantes, ce type de marais devient aussi plus vulnérable aux nuisances telles que les proliférations d'insectes et les mauvaises odeurs [36].



**Figure 17:** Représentation schématique d'un marais filtrant à écoulement sur la surface avec plantes flottantes [36]



**Figure 18:** Représentation schématique d'un marais filtrant à écoulement sur la surface avec plantes émergentes [36]

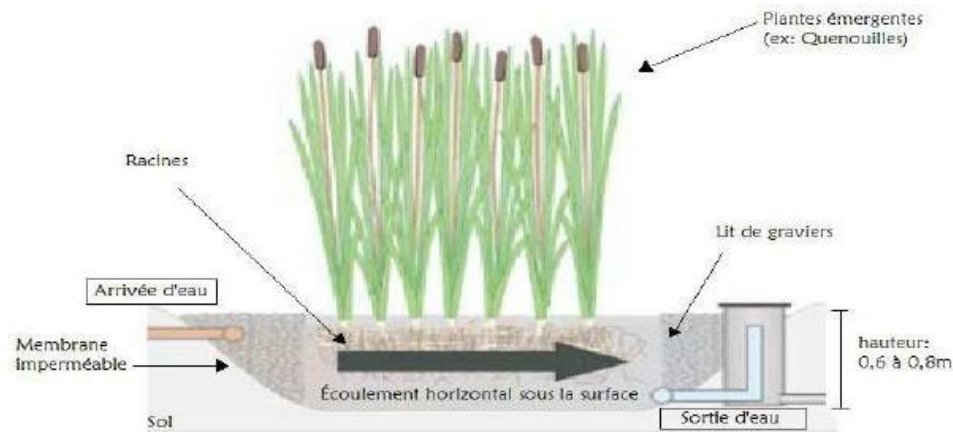
#### 2.4.3.2. MARAIS A ECOULEMENT HORIZONTAL SOUS LA SURFACE

Ce type de marais artificiel se compose d'un bassin imperméable rempli d'un substrat poreux dans lequel sont plantées des espèces émergentes. Une couche étanche est installée à la base du bassin pour empêcher toute infiltration des eaux vers le sol. Au-dessus, deux couches distinctes composent le substrat filtrant: une couche de gravier d'une épaisseur de 0,6 à 0,8 m et une couche de sable dont l'épaisseur peut varier selon les besoins.

Les plantes sont implantées dans la couche de gravier, où elles développent leur système racinaire. Les effluents traversent ensuite le substrat horizontalement, en passant à travers les graviers et les racines. L'environnement du marais est majoritairement anaérobie, ce qui favorise l'élimination de l'azote grâce à l'activité des bactéries dénitrifiantes.

Le niveau d'eau doit être soigneusement maintenu sous la surface du substrat de gravier. Si ce niveau varie, des débordements peuvent survenir, entraînant un court-circuitage du système, c'est-à-dire un écoulement direct des eaux usées non traitées vers la sortie. Ce type de dysfonctionnement a été observé dans certaines installations européennes, avec pour conséquence une inhibition des processus de dénitrification et des concentrations élevées d'azote ammoniacal en sortie.

Pour éviter le colmatage du substrat par les matières en suspension (MES), un prétraitement est indispensable. Celui-ci permet de retirer une partie de MES avant l'arrivée dans le marais. En l'absence de cette étape, le système sature rapidement et perd en performance. C'est pourquoi ce type de marais est souvent intégré dans des systèmes hybrides, combiné à d'autres filtres plantés, à des bassins de décantation ou à des dispositifs de régulation du débit.



**Figure 19:** Représentation schématique d'un marais à écoulement horizontal sous la surface [36]

Le marais à écoulement horizontal sous surface (MEHS) présente plusieurs avantages par rapport au marais à écoulement de surface planté. L'un des atouts majeurs du MEHS est sa meilleure résistance aux conditions climatiques froides, puisque les eaux usées circulent sous la surface, les protégeant ainsi du gel et des températures basses de l'air ambiant.

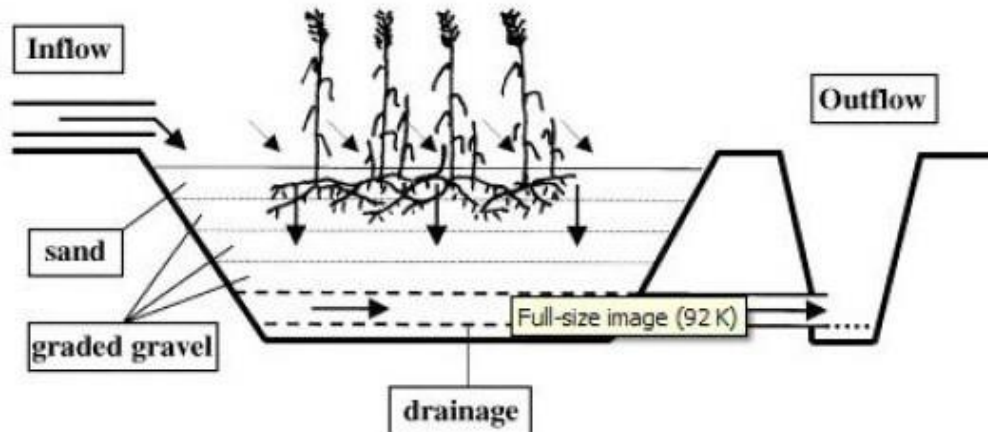
À superficie égale, ce système offre une efficacité de traitement supérieure à celle des autres types de marais. Le gravier utilisé comme substrat fournit une large surface spécifique permettant l'adsorption des nutriments et des matières en suspension (MES). Toutefois, cette technologie implique des coûts plus élevés en termes d'achat des matériaux, d'installation, d'entretien et de réparations.

#### 2.4.3.3. MARAIS A ECOULEMENT VERTICAL SOUS LA SURFACE

Ce type de marais artificiel est constitué d'un bassin imperméable, qui est formé de plusieurs couches de matériaux. La couche supérieure est composée de sable, tandis que les couches inférieures sont constituées de gravier, dont la taille des grains augmente avec la profondeur. Par exemple, le gravier immédiatement sous la couche de sable a un diamètre de 6 mm, tandis que celui qui se trouve au fond du marais peut atteindre entre 30 et 60 mm.

Sous ces couches, une membrane imperméable est installée pour maintenir l'eau et les substrats dans le bassin. Des macrophytes (plantes aquatiques) sont ensuite plantées dans le gravier, facilitant l'enracinement.

L'eau entre dans le marais par un tuyau qui capte les eaux de ruissellement et les répartit uniformément à la surface. Elle s'infiltre ensuite à travers les différentes couches de substrat et les racines des plantes avant d'atteindre un réseau de drainage situé au fond du marais. L'eau est ensuite évacuée par gravité ou à l'aide d'une pompe via ce système de drainage.



**Figure 20:** Représentation schématique d'un marais à écoulement vertical sous la surface [36]

Les résultats du traitement de l'eau avec ce type de marais artificiel sont variés. Contrairement au marais à écoulement horizontal subsurface (MEHS), ce marais est alimenté de manière intermittente par l'eau de ruissellement, se remplissant dès qu'il pleut. Il n'est donc pas constamment saturé d'eau, ce qui permet de maintenir un environnement oxygéné. Ce milieu aérobie favorise le métabolisme des micro-organismes et le processus de nitrification, qui transforme l'ammoniac et les ions ammonium en nitrates.

Cependant, après le traitement par ce type de marais, on observe une réduction des matières en suspension et des matières organiques, mais une accumulation de nitrates dans l'eau. Ainsi, le marais à écoulement vertical superficiel (MEVS) est souvent utilisé comme une première étape dans un système hybride de traitement des eaux usées, souvent complété par un MEHS. Le MEHS permet de finaliser le traitement en transformant les nitrates en azote gazeux.

En ce qui concerne le phosphore, le MEVS ne le retient que de manière limitée, principalement en fonction du nombre de sites d'adsorption présents, notamment dans les couches argileuses. Toutefois, ces marais contiennent peu de particules d'argile, ce qui limite leur capacité à retenir le phosphore.

En comparaison avec le MEHS, le MEVS nécessite une plus petite surface pour atteindre un niveau d'épuration comparable des matières en suspension (MES). Cependant, les coûts d'entretien et d'installation sont plus élevés, notamment à cause des tuyaux et des pompes qui peuvent être nécessaires pour l'évacuation des effluents.

#### 2.4.3.4. DIMENSIONNEMENT DES MARAIS ARTIFICIELS

Pour le calcul du dimensionnement des bassins verticaux, il est nécessaire de calculer ce qui suit :

- la demande en oxygène sur la base de 1Kg d' $O_2$  par Kg de  $DBO_2$  à éliminer, et de 4,3 kg d' $O_2$  par Kg de  $NH_3$  à oxyder. Sachant que le coefficient d'aération superficielle de  $K_a=30$  grammes d' $O_2$  par  $m^2$  de surface par jour, et la hauteur du lit qui varie entre (0.45m à 1.20m). Il est recommandé d'utiliser une profondeur de substrat de 70 cm, qui permet une nitrification adéquate en plus de l'élimination des polluants organiques.
- La superficie obtenue est augmentée de 25% :

$$S_v = \frac{DO}{K_a} \times 1.25 \quad (5)$$

Avec la DO est la demande en oxygène en Kg/J

$$DO \text{ (kg/j)} = C_{DBO5} \text{ (Kg/m}^3\text{)} \times Q_{moy} \quad (6)$$

$Q_{moy}$  = le débit moyen journalier en m<sup>3</sup>/j.

$C_{DBO5}$  = le taux d'oxygène éliminé par le filtre vertical en Kg/m<sup>3</sup>.

Le temps de rétention des eaux usées dans le filtre vertical sera calculé par la formule suivante:

$$T_v = \frac{S_v \times h \times n}{Q_{max}} \quad (7)$$

$S_v$ : la surface du filtre vertical en m<sup>2</sup>.

$h$ : La profondeur du filtre en m.

$n$ : la porosité du gravier en %.

$Q_{max}$ : le débit maximal en m<sup>3</sup>/j.

Pour les filtres horizontaux, il existe différentes méthodes proposées pour le dimensionnement, parmi lesquelles on peut citer: la méthode de Kadlec et Knight (1996), la méthode de l'USEPA (1999) et celle de Reed et al. (1995).

Dans le cadre de notre étude, nous avons choisi la méthode de Reed et al. (1995), qui permet de déterminer la surface du filtre horizontal. Cette méthode est considérée comme fiable car elle prend en compte la concentration des polluants ainsi que la température de l'eau, des facteurs principaux influençant le dimensionnement de ce type de filtre. La surface est déterminée par la formule suivante :

$$A_t = \frac{Q_{moy} \times [\ln(C_{DBO5e} - \ln(C_{DBO5s}))]}{h \times n \times k_T} \quad (8)$$

$C_{DBO5e}$ : La concentration moyenne journalière en DBO5 à l'entrée en (mg/l).

$C_{DBO5s}$ : La concentration moyenne journalière en DBO5 souhaitée à la sortie (mg/l).

$h$ : La profondeur du filtre en m.

$k_T$ : Constante cinétique à la température  $T_w$  en Jours<sup>-1</sup>; est déterminée par la relation suivante :

$$k_T = k_R \times \theta_R^{T_w - T_r} \quad (9)$$

Les valeurs de  $R$   $\theta$  et de  $K_r$  sont représentées dans le tableau ci-dessous .:

**Tableau 4** : Les valeurs de  $R$   $\theta$  et de  $K_r$  [36]

GUIDE	K20	$\theta_r$
WPCF (1990)	0,806	1,06
EPA (1993)	1,104	1,06

Le temps de rétention des eaux usées dans le filtre vertical sera calculé par la formule suivante:

$$T_h = \frac{S_h \times h \times n}{Q_{max}} \quad (10)$$

$S_h$ : la surface du filtre vertical en m<sup>2</sup>.

$h$ : La profondeur du filtre en m.

$n$ : la porosité du gravier en %.

$Q_{max}$ : le débit maximal en m<sup>3</sup>/j.

La géométrie du lit est dérivée de la loi de Darcy qui devra permettre un écoulement sous surfacique à travers le gravier dans des conditions d'écoulement moyennes.

L'application de la formule repose sur deux facteurs importants:

- gradient hydraulique peut être utilisé à la place de la pente.
- la conductivité hydraulique.

L'équation est la suivante:

$$Ac = \frac{Qs}{Ks} (dH/dL) \quad (11)$$

Ac = Section transversale du lit (m<sup>2</sup>).

Qs = débit moyen (m<sup>3</sup> / s).

Ks = conductivité hydraulique du matériau saturé (m/j)

dH / dL = pente du fond du lit (m / m).

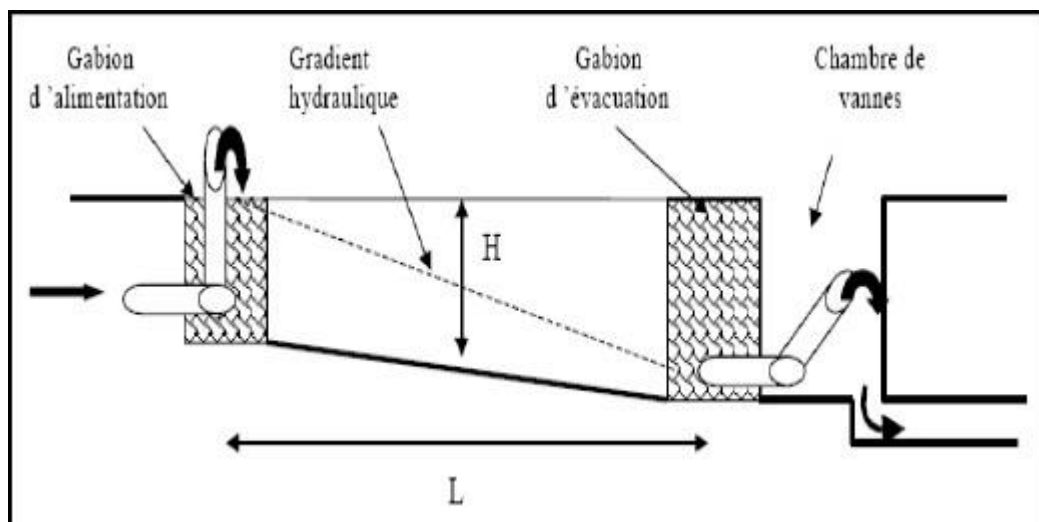
Pour un filtre à gravier (K élevé), le rapport L/l sera élevé et les filtres seront longs et étroits.

Tandis que pour un filtre à sable (K faible), les filtres seront larges et courts. Le rapport L/l doit varier en respectant l'intervalle 0,5 à 3.

La perméabilité est liée à la granulométrie du matériau utilisé et du colmatage progressif du massif, sachant que celui-ci est modéré par l'effet des rhizomes et des racines.

**Tableau 5:** La porosité et la conductivité hydraulique du substrat [36].

Type	dimension des grains (mm)	porosité (%)	Conductivité hydraulique (KS) m/j
Sable	1-2	30-32	420-480
Gravier	8-16	35-38	500-800
Pierre	32-128	40-45	1200-1500



**Figure 21:** Gradient hydraulique théorique d'un filtre horizontal [36]

#### **2.4.3.5. TECHNIQUE DE LA MISE EN ŒUVRE DE LA STATION DE PHYTO-EPURATION**

Pour garantir une bonne oxygénation du filtre et une répartition homogène des eaux usées, les filtres sont alimentés par des flux discontinus (bâchées) à débit élevé, bien supérieur au débit entrant. Ces eaux sont temporairement stockées dans un réservoir avant d'être libérées rapidement vers le filtre en service par un réseau d'alimentation.

Trois dispositifs peuvent être utilisés pour une alimentation gravitaire: siphons auto-amorçant, chasses à clapet et chasses pendulaires. Cependant, les chasses à clapet sont inadaptées pour les eaux brutes (elles peuvent convenir pour les eaux partiellement traitées).

Le système choisi est intégré à une cuve de stockage dimensionnée en fonction du débit nécessaire, prenant en compte les pertes de charge en aval. Il est essentiel que cette cuve se vide complètement à chaque cycle afin d'éviter l'accumulation de dépôts.

Quand la configuration du terrain ou une boucle de recirculation le nécessite, l'alimentation se fait par un poste de relevage équipé de deux pompes fonctionnant en alternance. En cas de défaillance d'une pompe, un système de vannes permet de maintenir l'alimentation des filtres.

Les pompes sont déclenchées par des flotteurs de niveau, et les conduites ainsi que les pompes doivent avoir un diamètre minimal de DN80. Le volume d'eau résiduelle dans les canalisations, qui retourne vers le poste après chaque cycle, doit être intégré au réglage pour garantir le bon volume à envoyer.

L'usage de clapets anti-retour est envisageable, bien que cela puisse entraîner une stagnation des eaux. Des compteurs horaires permettent de suivre le fonctionnement des pompes et d'estimer les volumes pompés.

Pour assurer une répartition efficace sur le filtre, on prévoit au moins un point d'alimentation pour 50 m<sup>2</sup> de surface, souvent en nombre pair ou multiple de 4. Chaque point est équipé d'une plaque pour éviter l'érosion du massif sous le jet.

En alimentation gravitaire, le réseau est posé en surface, inspectable et démontable, généralement en PEHD ou en inox pour résister aux UV.

Si l'alimentation est sous pression (poste de relevage), le réseau peut être enterré sauf à son extrémité exposée au soleil. Il est en PVC, souvent configuré en double H, avec des diamètres décroissants (DN100 minimum).

Le réseau est conçu pour se vider complètement après chaque bâchée afin d'éviter les stagnations, dépôts, mauvaises odeurs et colmatages.

La vitesse minimale de circulation des eaux usées doit être de 0,6 m/s pour assurer l'auto-curage.



**Figure 22:** Réseau d'alimentation aérien avec la plaque anti-affouillement (à gauche), ou enterré lors d'une bâchée (à droite) [36]

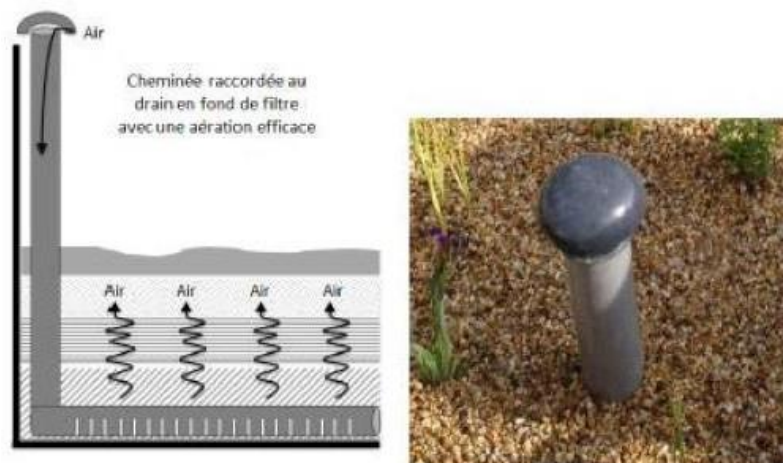
- **POUR LES FILTRES VERTICAUX :**

L'imperméabilité du filtre est assurée par une membrane souple en EPDM d'une épaisseur de 1,14 mm. Pour éviter qu'elle ne soit perforée par des éléments extérieurs comme des cailloux ou des racines, cette membrane est protégée en dessous par un géotextile anti-perforation pesant au minimum 270 g/m<sup>2</sup>.

L'étanchéité au niveau des connexions entre l'intérieur et l'extérieur du filtre est assurée grâce à un système de traversée de paroi.

Le système de drainage repose sur un tuyau de collecte perforé en PVC (DN 100 conforme à la norme NF) installé au fond du lit filtrant. Les fentes du tuyau sont orientées vers le bas, ce qui permet de capter les eaux usées et de les rediriger ensuite vers le filtre à écoulement horizontal.

Deux conduits de ventilation sont installés verticalement dans le substrat, reliant le tuyau de drainage au fond du lit jusqu'à la surface. Ces conduits assurent l'aération de la base du filtre, ce qui est essentiel pour maintenir de bonnes conditions de traitement biologique.



**Figure 23:** Schéma présentant le principe de fonctionnement de cheminées d'aérations et photo d'une cheminée d'aération sur le filtre vertical [36]

Le lit filtrant vertical est aménagé avec une pente uniforme. Il a une profondeur totale de 1 mètre, répartie en 70 cm de matériaux filtrants (substrat) et 30 cm de marge libre (revanche).

La couche filtrante de 70 cm est constituée de trois granulométries de graviers différentes :

- Une couche de 40 cm de graviers de calibre 4 à 10 mm
- Une couche de 15 cm de graviers de calibre 16 à 22 mm
- Une couche de 15 cm de graviers de calibre 20 à 31,5 mm

• **POUR LES FILTRES VERTICAUX :**

L'imperméabilité du filtre horizontal est assurée par un revêtement souple en EPDM d'une épaisseur de 1,14 mm. Ce revêtement est protégé sur sa face inférieure par un tissu géotextile anti-perforation d'un poids minimum de 270 g/m<sup>2</sup>, qui empêche les dommages causés par les pierres ou les racines provenant de l'extérieur.

Une traversée étanche est prévue pour garantir l'imperméabilité entre le système de drainage interne du filtre et la boîte de collecte.

Un tuyau de drainage perforé en PVC de 100 mm de diamètre (DN 100 NF) est installé au bas du lit filtrant, perpendiculairement au sens d'écoulement de l'eau, du côté proche de la sortie. Ce tuyau est relié à une traversée de paroi étanche, puis à un autre tuyau en PVC qui achemine les eaux collectées vers la boîte de collecte.

Le lit du filtre horizontal est réalisé avec une pente régulière. Sa profondeur est de 60 cm, dont 50 cm de matériau filtrant (substrat) et 10 cm de réserve libre (revanche).

Le substrat est composé de trois couches successives :

- Une couche de 50 cm de graviers de 16/22 mm
- Une couche de 250 cm de pouzzolane de 7/15 mm (probable erreur de mesure, peut-être s'agit-il de 25 cm)
- Une couche de 100 cm de graviers de 4/10 mm (à vérifier, cela dépasse la profondeur totale annoncée)

## **2.5. TRAITEMENT DES BOUES**

Le traitement des eaux usées urbaines génère inévitablement de grandes quantités de boues humides, facilement dégradables, qui constituent à leur tour une source importante de pollution et un risque sanitaire. Ces boues dégagent des odeurs désagréables et peuvent être vectrices de maladies d'origine microbienne. Par conséquent, un traitement efficace des eaux usées doit impérativement inclure celui des boues, faute de quoi il ne s'agirait que d'un simple déplacement de la pollution.

En l'absence de traitement spécifique, les boues issues de l'épuration se présentent comme une suspension aqueuse très diluée (1 à 2 % de matière sèche), composée de substances organiques et minérales en proportions variables. Elles peuvent aussi contenir divers micro-organismes (agents pathogènes, champignons, parasites) qui se sont développés à partir des polluants présents dans l'eau traitée [37].

### **2.5.1. EPAISSISSEMENT**

Le prétraitement des boues consiste à concentrer les boues extraites des bassins de décantation. Cette opération est généralement réalisée par un processus gravitaire de décantation ou de tassement dans des structures circulaires appelées épaisseurs. Elle permet d'obtenir une teneur en matière sèche des boues pouvant atteindre jusqu'à 10 %.

Objectifs :

- Réduire le taux d'humidité des boues (de 98 % jusqu'à 95 ou parfois 90 %).
- Assurer un bon fonctionnement des appareils de déshydratation.

- **Volume utile de l'épaississeur (V) :**

$$V = Qb \times TSH \quad (12)$$

- **Surface de décantation (S) :**

$$S = \frac{Qb}{CSH} \quad (13)$$

### 2.5.2. DESHYDRATATION

La Réduction de l'humidité des boues à des valeurs inférieures à 80 % (soit des taux minimales de 20 % de M.S).



**Figure 24:** Epaississement et déshydratation des boues [38]

- Quantité de matière sèche à traiter par jour :

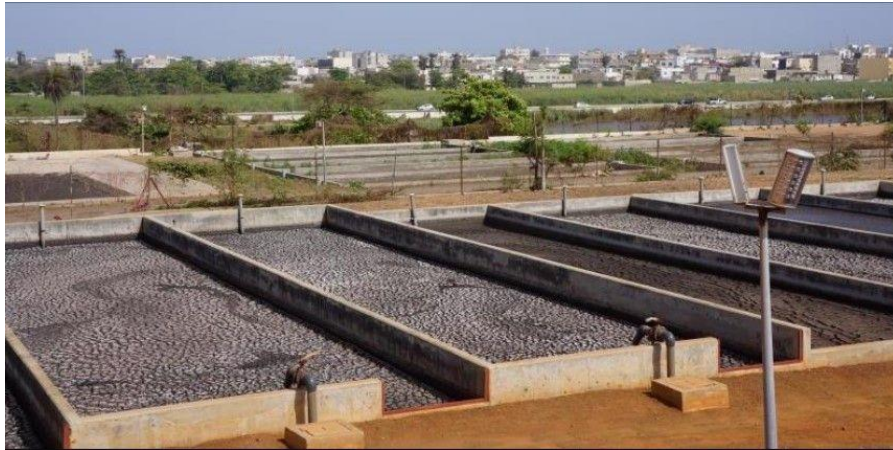
$$\text{Matière sèche (kg/j)} = Qb \times \frac{MS \text{ entré}}{100} \times 1000 \quad (14)$$

- Débit de traitement requis par heure :

$$\text{Débit horaire} = \frac{MS \text{ (kg/j)}}{T} \quad (15)$$

### 2.5.3. SECHAGE NATUREL DES BOUES

Déshydrater à l'air libre, par drainage et évaporation, d'une partie de l'eau liée aux boues.



**Figure 25:** Photo de boues en cours de séchage [39]

Composition d'un lit de séchage :

- Une couche supérieure de sable de 5 à 10 cm (calibre 0,5 à 15 mm).
- Une couche intermédiaire de 25 à 30 cm de graviers gros (calibre 10 à 40 mm) reposant sur un sol imperméabilisé et soigneusement nivelé.  
Des drains en ciment, avec une légère pente, disposés dans la couche de base du lit.
- Épaisseur de boues déposées: 20 à 30 cm par cycle
- Temps de séchage: 10 à 20 jours (selon climat, type de boues)
- Teneur finale en matière sèche: 15 à 30 % (selon conditions)
- Surface nécessaire: Environ 1 à 1,5 m<sup>2</sup> par habitant équivalent (EH) ou 0,5 à 1 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> de boues épaissies par jour

## 2.6. DESINFECTION

Est requise lorsque les eaux usées traitées sont rejetées dans des zones aquatiques destinées à la baignade (comme les plages ou les sites touristiques et nautiques), ou encore pour limiter les risques de contamination humaine (zones de captage d'eau potable, conchyliculture, etc.). Pour éliminer les agents pathogènes, on utilise généralement des méthodes classiques telles que la chloration, l'ozonation ou l'irradiation par rayons ultraviolets (UV). Cependant, les sous-produits chlorés sont nocifs pour les écosystèmes aquatiques et l'ozone présente un coût élevé, ce qui fait de la désinfection par UV la solution la plus couramment adoptée, à condition que l'eau soit suffisamment claire. Lorsque l'espace disponible le permet, le lagunage peut également être une alternative pour diminuer la présence de microorganismes pathogènes [40].

Le dimensionnement de cette étape dépend de plusieurs facteurs, dont la qualité de l'eau à traiter, le débit des eaux usées, les objectifs de qualité de l'eau après traitement, ainsi que les caractéristiques des équipements de désinfection (notamment les systèmes à rayons UV).

Les paramètres à prendre en compte pour le dimensionnement de la désinfection par UV:

- Débit de l'eau à traiter (Q): Le dimensionnement des unités de désinfection par UV doit être basé sur le débit de l'eau traitée, généralement exprimé en m<sup>3</sup>/h ou m<sup>3</sup>/jour. Un calcul précis du débit est essentiel pour déterminer la capacité des lampes UV nécessaires.

- Intensité de la lumière UV (dose UV): La dose de désinfection est un paramètre clé, généralement exprimé en mJ/cm<sup>2</sup>. Elle dépend de la nature des germes à éliminer et de la transparence de l'eau (plus l'eau est claire, plus l'efficacité des UV est grande). La dose d'UV est généralement calculée en fonction du taux de réduction des micro-organismes souhaité. La dose d'UV nécessaire pour désinfecter l'eau dépend de la concentration de germes et de la turbidité de l'eau.
- Temps de contact (T): Le temps de contact entre l'eau et la lumière UV doit être suffisant pour assurer l'inactivation des pathogènes. Ce paramètre est influencé par le débit et la conception du système UV (par exemple, la longueur du réacteur UV).
- Transparence de l'eau (ou transmission UV): L'efficacité des systèmes UV dépend directement de la transparence de l'eau. La turbidité et la concentration en matières dissoutes influencent l'absorption de l'irradiation UV. Il est donc crucial de mesurer la transmission UV (T% à 254 nm) pour adapter le système de désinfection.
- Puissance des lampes UV: Le système doit être équipé de lampes UV ayant la puissance nécessaire pour délivrer la dose requise. Le choix de la puissance dépend du débit de l'eau et de la dose d'UV souhaitée [41].

### 2.6.1. DIMENSIONNEMENT D'UN REACTEUR UV

$$\text{Dose UV (D)} = \text{Intensité UV (I)} \times \text{Temps de contact (T)} \quad (16)$$

Où :

Dose UV est exprimée en mJ/cm<sup>2</sup>.

Intensité UV en mW/cm<sup>2</sup>.

Temps de contact en secondes.

#### 2.6.1.1. DIMENSIONNEMENT DU REACTEUR UV

En fonction du débit Q et de la dose UV, il faut déterminer la capacité du réacteur UV et la disposition des lampes. Le volume du réacteur est ajusté pour garantir que l'eau reste suffisamment longtemps en contact avec la lumière UV.

#### 2.6.1.2. CALCUL DE LA PUISSANCE TOTAL DES LAMPES UV

La puissance totale nécessaire est fonction du débit d'eau et de la dose UV cible, et se détermine en tenant compte des pertes liées à la transmission de l'eau et de la configuration du réacteur [40].

## 2.7. CONCLUSION

Le traitement des eaux usées joue un rôle fondamental dans la préservation de l'environnement et la protection de la santé publique. En retirant les polluants présents dans les eaux usées, on limite les risques de contamination des ressources en eau et la transmission de maladies liées à l'eau.

Ce processus contribue également à maintenir l'équilibre fragile des écosystèmes aquatiques et assure un accès durable à une eau de qualité pour les générations futures.

Avec l'aggravation de la pénurie d'eau dans le monde, l'importance du traitement des eaux usées ne fera que croître. Le développement des infrastructures et des technologies adaptées est donc crucial pour répondre aux besoins croissants en eau potable et garantir un avenir sain et durable pour la planète et ses habitants [36].

# **CHAPITRE III**

## **MATERIEL ET METHODE**

### **3.1. INTRODUCTION**

Les hôpitaux génèrent quotidiennement des volumes importants d'eaux usées provenant des services médicaux, des salles d'opération, des laboratoires et des installations sanitaires. Ces eaux peuvent contenir des agents pathogènes, des produits chimiques et des médicaments, représentant ainsi un risque pour la santé publique et l'environnement si elles ne sont pas correctement traitées [42].

Au Centre Hospitalier Universitaire (CHU) Dr Tidjani Damerdji de Tlemcen, la gestion des eaux usées hospitalières est une priorité. L'établissement s'engage à respecter les normes sanitaires et environnementales en vigueur pour assurer la sécurité des patients, du personnel et de la communauté environnante [43].

Des initiatives telles que la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation agricole témoignent de l'engagement du CHU et des autorités locales en matière de développement durable et de gestion responsable des ressources en eau [44].

### **3.2. PRESENTATION SUR CHU DE TLEMCEN**

#### **3.2.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE**

Le Centre Hospitalier Universitaire (CHU) Dr Tidjani Damerdji de Tlemcen est situé au 5 Boulevard Mohamed 5, dans le quartier de Mansourah, au cœur de la ville de Tlemcen, en Algérie. Cet emplacement stratégique le place à proximité de l'Université des Sciences Appliquées de Tlemcen et de la porte historique de la ville, Bab El Khemis.

L'implantation du CHU dans ce secteur urbain dense facilite l'accès aux services de santé pour la population locale et les régions avoisinantes. De plus, la proximité avec des institutions académiques renforce les liens entre la formation médicale et la pratique clinique [45].

Le Centre Hospitalo-universitaire (CHU) Dr Tidjani Damerdji de Tlemcen est un établissement de santé publique majeur en Algérie, jouant un rôle crucial dans les soins médicaux, la formation universitaire et la recherche scientifique. Voici une présentation détaillée de ses caractéristiques [46]

#### **3.2.2. DEFINITION ET MISSION**

Un CHU est un établissement hospitalier lié à une université, assurant des missions de soins, d'enseignement et de recherche. Le CHU de Tlemcen est rattaché à l'Université Abou Bekr Belkaid et offre des services médicaux spécialisés tout en formant des professionnels de santé.

#### **3.2.3. 3.2.2. CAPACITE EN LITS**

Le CHU Dr Tidjani Damerdji de Tlemcen dispose d'une capacité de 646 lits pour l'ensemble de la wilaya. De plus, un établissement hospitalier spécialisé (Mère – Enfant) de 204 lits est situé à Tlemcen, et cinq établissements publics hospitaliers (EPH) totalisent 933 lits sur le territoire.

### 3.2.4. 3.2.3. SERVICES HOSPITALIERS

Il dispose de 44 services spécialisés et laboratoires. Le CHU de Tlemcen offre une gamme complète de services médicaux, notamment:

Réanimation médicale: récemment inaugurée, avec une capacité de dix lits pour les soins intensifs.

Services médicaux et chirurgicaux :

Le CHU de Tlemcen propose une variété de services pour répondre aux besoins de santé de la population. Voici une liste non exhaustive des services disponibles :

- Médecine interne
- Endocrinologie et diabétologie
- Maladies infectieuses/SIDA
- Hématologie
- Dermatologie
- Néphrologie
- Gériatrie aiguë
- Rhumatologie
- Neurologie (avec prise en charge des AVC)
- Neurochirurgie
- Orthopédie
- Traumatologie
- Chirurgie maxillo-faciale
- Chirurgie ORL (Oto-rhino-laryngologie)
- Ophtalmologie

Chirurgie des brûlés: un service dédié aux brûlés adultes a été récemment inauguré, offrant une prise en charge spécialisée incluant des soins allant des pansements aux greffes de peau.

Laboratoires et services de soutien :

- En plus des services cliniques, le CHU dispose de laboratoires spécialisés et de services de soutien, tels que:
- Anatomie pathologique
- Anesthésie-réanimation
- Biologie clinique
- Cardiologie
- Chirurgie cardiovasculaire
- Chirurgie dentaire
- Chirurgie générale
- Chirurgie pédiatrique
- Chirurgie plastique et reconstructive
- Dermatologie
- Endocrinologie
- Gastro-entérologie
- Gynécologie-obstétrique

- Hématologie
- Médecine légale
- Médecine nucléaire
- Néphrologie
- Neurologie
- Neurochirurgie
- Oncologie
- Ophtalmologie
- ORL
- Orthopédie
- Pédiatrie
- Pneumologie
- Psychiatrie
- Radiologie
- Rhumatologie
- Urologie

#### **3.2.4. SERVICES À HAUT RISQUE**

Certains services présentent des risques accrus en raison de la nature des soins prodigués:

- Réanimation médicale: prise en charge de patients en état critique, avec des risques d'exposition à des agents pathogènes et à des situations d'urgence.
- Maladies infectieuses: gestion de pathologies contagieuses, nécessitant des mesures strictes de prévention des infections.
- Bloc opératoire: interventions chirurgicales complexes, avec des risques liés à l'anesthésie et aux procédures invasives.
- Oncologie: administration de traitements tels que la chimiothérapie, impliquant la manipulation de substances potentiellement dangereuses.
- Laboratoires de microbiologie: analyse d'échantillons biologiques, avec des risques d'exposition à des agents infectieux.



Figure 26: CHU de TLEMCEN [46]



Figure 27: Localisation de CHU de TLMCEN avec Google Earth

### 3.3. DEFINITION DES EFFLUENTS HOSPITALIERS

Les effluents hospitaliers désignent les eaux usées générées par l'ensemble des activités médicales, chirurgicales, pharmaceutiques et hôtelières d'un établissement de santé. Ces eaux se distinguent nettement des eaux usées domestiques classiques par leur charge en substances potentiellement dangereuses, tant pour l'environnement que pour la santé humaine.

#### 3.3.1. ORIGINE DES EFFLUENTS AU CHU DE TLEMCEN

Au Centre Hospitalo-Universitaire (CHU) de Tlemcen, les effluents liquides proviennent de multiples sources :

- **Blocs opératoires:** rejets de fluides corporels, antiseptiques, anesthésiques et produits désinfectants.
- **Laboratoires d’analyses médicales:** rejets de réactifs chimiques, colorants, solvants, agents pathogènes.
- **Services médicaux spécialisés (réanimation, oncologie, maladies infectieuses, etc.):** rejets contenant des médicaments cytotoxiques, des agents microbiens résistants, des fluides biologiques.
- **Lingerie hospitalière:** eaux de lavage contenant du sang, des détergents puissants, des désinfectants.
- **Cuisines et services hôteliers:** graisses, huiles, déchets alimentaires, produits de nettoyage.
- **Sanitaires:** urines, excréments, produits d’hygiène.

### 3.3.2. COMPOSITION DES EFFLUENTS HOSPITALIERS

Les effluents du CHU de Tlemcen peuvent contenir :

- **Substances pharmaceutiques:** antibiotiques, cytotoxiques, hormones, analgésiques, antiseptiques.
- **Agents pathogènes:** bactéries (dont multirésistantes), virus, champignons, parasites.
- **Matières organiques:** sang, excréments, urines – avec une forte demande chimique en oxygène (DCO) et une forte charge en matières en suspension.
- **Produits chimiques toxiques:** formaldéhyde, solvants organiques, métaux lourds (mercure, cadmium).

Ces effluents sont donc hautement polluants et difficiles à traiter biologiquement, en raison notamment de leur DCO élevée et de la présence de micropolluants pharmaceutiques persistants.

### 3.3.3. PROBLEMATIQUE DU TRAITEMENT AU CHU DE TLEMCEN

Depuis 2012, la station d’épuration interne du CHU de Tlemcen est hors service, entraînant le rejet direct des effluents hospitaliers dans le réseau d’assainissement urbain sans aucun prétraitement spécifique. Ce dysfonctionnement constitue une source importante de pollution environnementale et représente un risque sanitaire majeur. En effet :

Les stations d’épuration municipales ne sont pas conçues pour éliminer les résidus pharmaceutiques persistants (antibiotiques, cytotoxiques, hormones, etc.) ni pour inactiver totalement les agents pathogènes (bactéries multirésistantes, virus, parasites).

Ces eaux contaminées peuvent polluer les nappes phréatiques, les cours d’eau ou être réutilisées à tort pour l’irrigation, favorisant ainsi la dissémination de germes résistants et de micropolluants dans l’environnement.

Ce constat alarmant a motivé notre étude, qui vise à concevoir une mini-station d’épuration adaptée spécifiquement aux caractéristiques des effluents hospitaliers. Pour ce faire, nous proposons une approche innovante fondée sur deux méthodes de traitement complémentaires.

### 3.3.3.1. ADSORPTION A BASE DE MATERIAUX VEGETAUX

L'adsorption est un procédé physico-chimique qui permet de piéger les polluants présents dans l'eau sur la surface d'un matériau solide. Ici, nous proposons l'utilisation d'adsorbants d'origine végétale, notamment à base de déchets agricoles ou de biomasses locales [47].

Ces avantages sont :

- Abondance et faible coût des matériaux végétaux disponibles localement.
- Capacité élevée d'adsorption pour les résidus médicamenteux, les métaux lourds, les colorants et certaines matières organiques.
- Écologique, car il s'agit de matériaux biodégradables et renouvelables.

### 3.3.3.2. PHOTO DEGRADATION PAR UV A 365 NM

La photo dégradation UV consiste à exposer les effluents à une lumière ultraviolette (longueur d'onde de 365 nm), ce qui permet de détruire les molécules organiques complexes et d'inactiver les micro-organismes pathogènes. Cette technologie repose sur la capacité des UV à rompre les liaisons chimiques et à altérer l'ADN des agents microbiens.

Ces applications sont :

- Dégradation de résidus pharmaceutiques persistants (hormones, anticancéreux, antibiotiques).
- Désinfection de l'eau: destruction de bactéries, virus et protozoaires.

Ces avantages sont :

- Traitement rapide, sans ajout de produits chimiques.
- Haute efficacité microbiologique (inactivation > 99 % des bactéries et virus).
- Faible encombrement des installations, idéal pour une mini-station compacte [48].





**Figure 27:** Station d'épuration de l'hôpital de Tlemcen

### 3.4. MATERIELS ET PROTOCOLES D'ANALYSES

#### 3.4.1. PROTOCOLES EXPERIMENTAUX

##### 3.4.1.1. ÉCHANTILLONNAGE

L'eau utilisée dans notre étude provient du réseau d'égouts du CHU de Tlemcen. Dans le cadre de notre étude, 6 litres d'eau usées hospitalières ont été prélevés.

Deux types de prélèvements ont été réalisés: un en amont et un en aval du réseau. Les échantillons prélevés en amont ont été additionnés de quelques gouttes d'eau javel, tout comme ceux prélevés en aval.



Figure 28: L'échantillon prélevé

#### 3.4.2. GENEVRIER (JUNIPERUS SPP)

Le genévrier (*Juniperus* spp.) est une plante médicinale et aromatique connue depuis l'Antiquité pour ses nombreuses propriétés bénéfiques, notamment dans la désinfection et la purification. Récemment, l'intérêt pour l'utilisation d'extraits naturels, comme ceux du genévrier, dans la dépollution de l'eau s'est accru [49].



**Figure 29:** Le Genévrier [50]

### 3.4.2.1. CLASSIFICATION BOTANIQUE

**Tableau 6:** Les classifications botanique [50]

Règne	Division	Classe	Ordre	Famille	Genre
Plantae (plantes)	Pinophyta (conifères)	Pinopsida	Pinales	Cupressaceae (cupressacées)	Juniperus

Le genévrier est un arbuste ou un petit arbre à feuillage persistant, aux feuilles en aiguilles ou en écailles. Ses fruits, appelés galbules, ressemblent à des baies bleuâtres.

### 3.4.2.2. PRINCIPAUX COMPOSANTS CHIMIQUES

- Huiles essentielles riches en  $\alpha$ -pinène, myrcène, limonène et sabinène.
- Flavonoïdes et terpènes aux propriétés antimicrobiennes puissantes.

### 3.4.2.3. REPARTITION GEOGRAPHIQUE

- Présent en Amérique du Nord, Europe, Afrique du Nord et Asie.
- Privilégie les régions montagneuses et semi-arides.

### 3.4.2.4. UTILISATION DU GENEVRIER DANS LA PURIFICATION

Les extraits de genévrier montrent une activité bactéricide et fongicide élevée grâce à la présence de composés volatils capables de perturber les membranes cellulaires des microorganismes [50].

Les huiles essentielles détruisent l'intégrité des membranes bactériennes. Elles inhibent la prolifération des bactéries pathogènes telles qu'*Escherichia coli* et *Staphylococcus aureus*.

Préparation d'un extrait aqueux ou alcoolique des feuilles ou des fruits du genévrier.

- Ajout de l'extrait à l'eau contaminée.
- Analyse microbiologique pour évaluer la réduction des charges bactériennes.

Selon plusieurs études, l'utilisation des extraits de genévrier peut réduire de 70 à 90 % la concentration microbienne dans les échantillons d'eau contaminée.

Ces avantages sont :

- Méthode naturelle et écologique.
- Réduction de l'utilisation de produits chimiques toxiques.
- Efficacité contre une large gamme de pathogènes.

Quant à ces limites c'est dans l'efficacité variable selon la concentration de l'extrait, et dans la nécessité de combiner avec d'autres techniques pour une purification complète.

Les feuilles du genévrier (*Juniperus*) ont été récoltées, puis séchées dans des conditions appropriées et broyées en une poudre fine, en vue de leur utilisation en tant qu'agent bioactif dans le traitement des eaux usées hospitalières, en raison de leurs propriétés antimicrobiennes et de leur capacité d'adsorption.



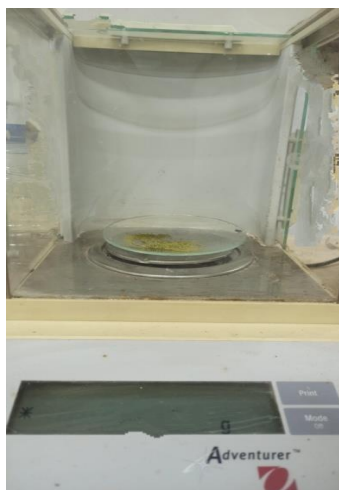
**Figure 30:** Poudre de Génévrier

### 3.4.3. PROTOCOLE OPERATOIRE

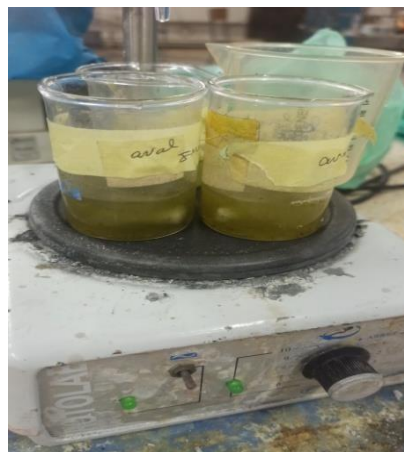
L'expérience s'est déroulée en deux étapes :

**Premier étapes:** une analyse de la DCO,  $DBO_5$ , l'oxygène dissous ( $O_2$ ), le pH, la conductivité et la température a été réalisée sur les eaux usées hospitalières prélevées, sans ajout de substance.

**Deuxième étape:** une quantité de 0.323g de poudre de genévrier a été pesée à l'aide d'une balance électronique (**figure 31**) puis ajoutée à un échantillon d'eau usée hospitalière. Ce mélange a été agité pendant 15 minutes afin d'assurer une bonne homogénéisation (**figure 32**). Par la suite, il a été filtré à l'aide d'un dispositif de filtration approprié (**figure 33**). Après cette étape de traitement, les mêmes paramètres physico-chimique analysée précédemment (DCO,  $DBO_5$ , l'oxygène dissous ( $O_2$ ), le pH, la conductivité et la température) ont été mesurés de nouveau pour évaluer l'efficacité du traitement.



**Figure 31 :** Balance électronique



**Figure 32:** Agitateur



**Figure 33:** Dispositif de filtration

### 3.4.3.1. PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUE

#### • OXYGENE DISSOUS

L'oxygène joue un rôle crucial dans le contrôle du fonctionnement du traitement biologique, étant l'un des paramètres chimiques essentiels à surveiller.

L'appareil utilisé pour mesurer l'oxygène dissous est appelé un oxymétrie. Les unités de mesure couramment utilisées sont les parties par million (ppm) ou la saturation en pourcentage (%), qui représente le pourcentage d'oxygène dissous dans un litre d'eau.

Pour utiliser correctement l'oxymétrie, les étapes suivantes sont recommandées :

- Étalonner l'appareil en utilisant des solutions tampons pour garantir des mesures précises.
- Rincer soigneusement l'électrode de l'oxygène dissous avant de l'immerger dans la solution à mesurer.
- Laisser l'appareil stabiliser le signal et lire la valeur affichée sur l'écran une fois que le signal s'est stabilisé.



**Figure 34:** Oxymétrie

#### • DEMANDE CHIMIQUE EN OXYGENE DCO

La demande chimique en oxygène (DCO) mesure la quantité d'oxygène dissous nécessaire pour oxyder les matières organiques dans l'eau, telles que le pétrole. Cela permet d'évaluer l'impact immédiat des effluents d'eaux usées sur les niveaux d'oxygène dans les cours d'eau [51].

La détermination de la DCO implique principalement une réaction d'oxydation avec le dichromate de potassium ( $K_2Cr_2O_7$ ) dans un milieu acide. Cette réaction se déroule dans une solution portée à ébullition à reflux pendant 2 heures. Les ions  $Ag^+$  sont utilisés comme catalyseurs d'oxydation, tandis que les ions  $Hg^{2+}$  sont ajoutés pour complexer les ions chlorures présents dans la solution.

Une fois la réaction terminée, l'oxygène consommé est calculé en mg/L. Cela se fait en déterminant d'abord l'excès de dichromate de potassium dans la solution par nitration. La nitration est réalisée avec du sulfate ferreux-ammoniacal (sel de Mohr).

Ce processus permet d'estimer la quantité d'oxygène nécessaire à l'oxydation des composés organiques présents dans l'échantillon d'eau, fournissant ainsi une mesure de la DCO, qui est un indicateur de la pollution organique de l'eau [51].

Pour le matériel on utilise :

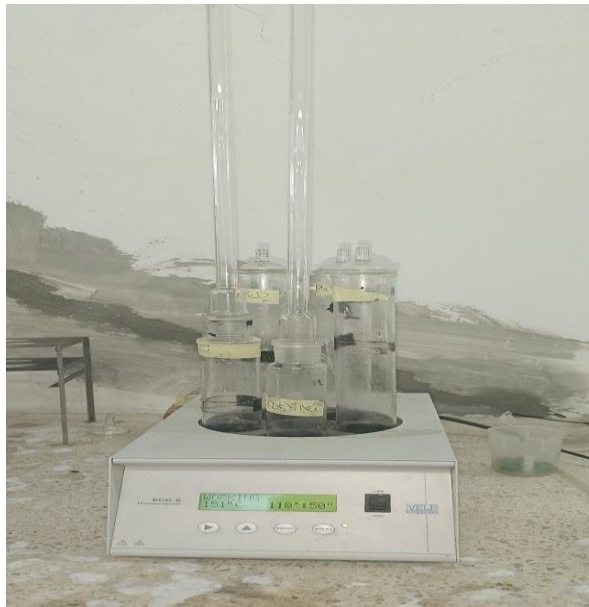
- Le dispositif de chauffage à reflux est utilisé pour maintenir la température de la solution constante pendant la réaction d'oxydation, généralement à  $150^{\circ}C$ , et cela pendant environ 2 heures.
- Les verreries de montre et les béchers sont employés pour préparer des solutions réactives et pour réaliser les différentes étapes de manipulation de l'échantillon.
- Utilisation de la burette et des pipettes graduées pour mesurer de manière précise les quantités de solutions réactives ajoutées lors des étapes de préparation et de titrage.
- L'aimant magnétique et le barreau aimanté sont utilisés pour mélanger de manière homogène les solutions réactives lors de la réaction de titrage.

Pour les réactifs on utilise :

- Dichromate de potassium ( $K_2Cr_2O_7$ )
- Solution d'acide sulfurique.
- Solution sulfate d'argent.
- Solution sulfate de fer ferreux et d'ammonium (sel de Mohr).
- Solution indicateur Féroïen.

Il faut ainsi :

- Prélever 10 ml de l'échantillon à analyser dans un tube approprié.
- Ajouter avec précaution 5 ml de solution de dichromate de potassium.
- Incorporer 15 ml d'acide sulfurique et sulfate d'argent, puis raccorder immédiatement le tube au réfrigérant.
- Répéter ces étapes pour chaque échantillon à analyser, ainsi que pour un échantillon à blanc (10 ml d'eau distillée).
- Porter le mélange réactionnel à ébullition pendant 120 minutes à 150°C.
- Rincer les réfrigérants à l'eau distillée et laisser refroidir les tubes.



**Figure 35:** DCO mètre



**Figure 36:** Réactifs pour la mesure de la DCO

Pour le titrage des échantillons on doit :

- Transvaser le contenu de chaque éprouvette dans un matras à goulot large, en le rinçant avec de l'eau distillée 3 ou 4 fois.
- Ajouter 3 gouttes de l'indicateur coloré Féroïen.
- Une fois refroidi, titrer avec une solution de sulfate de fer ferreux et ammonium jusqu'à ce que la couleur de la solution passe de vert bleu à orangé.



**Figure 37:** Agitations

La concentration en Demande Chimique en Oxygène (DCO), exprimée en mg/L, est déterminée par la formule suivante :

$$DCO = 8000 \times (V_T - V_E) \times \frac{N}{X} \quad (17)$$

Avec :

- N: Concentration de la solution de sel Mohr, qui est déterminée par étalonnage et est de 0,12 mol/l dans ce cas.
- X: Volume de la prise d'essai en millilitres (ml).

- $V_T$ : Volume en ml de la solution de sulfate de fer (II) et d'ammonium titré pour l'essai à blanc.
- $V_E$ : Volume en ml de la solution de sulfate de fer (II) et d'ammonium titré pour l'échantillon.
- **MATIERES EN SUSPENSION (MES)**

Les matières en suspension (MES) désignent des particules solides, variées par leur taille et leur origine, présentes dans les eaux usées. Leur retrait contribue à optimiser le traitement des eaux et à limiter la pollution des nappes phréatiques et des cours d'eau [52].

Pour le matériel on utilise :

- Dispositif de filtration.
- Balance.
- Capsules.
- Papier Filtres.
- Étuve.



**Figure 38:** Etuve

Il faut ainsi :

- Rincer le filtre à l'eau distillée et le sécher à l'étuve à une température d'environ 105 °C pendant 30 à 60 minutes.
- Une fois refroidi, peser le filtre sec et enregistrer sa masse comme M1.
- Homogénéiser l'échantillon à analyser.
- Utiliser une éprouvette graduée pour filtrer sous vide un volume V de l'échantillon mesuré.
- Sécher à nouveau le filtre, le laisser refroidir, puis le peser une deuxième fois. Enregistrer cette masse comme M2.

La concentration de matières en suspension (MES) dans l'échantillon, exprimée en mg/L, est déterminée en utilisant la formule suivante :

$$[\text{MES}] = \frac{M_2 - M_1}{V} \times 10^3 \quad (18)$$

Avec:

- $M_1$  :Masse du filtre sec avant filtration (en mg).
- $M_2$ : Masse du filtre sec après filtration (en mg).
- $M_2 - M_1$ : poids de la matière retenue par le filtre sec.
- V: volume d'eau utilisé (en ml), .On prend 100ml
- **pH**

Le pH mesure l'acidité ou la basicité d'une solution aqueuse, indiquant la concentration d'ions hydrogène présents.

Pour la mesure du pH, un pH-mètre (**Figure 39**) a été employé. Tout d'abord, le pH-mètre a été soigneusement rincé avec de l'eau distillée. Ensuite, il a été plongé dans l'échantillon, et la lecture a été effectuée une fois que la valeur du pH s'est stabilisée.



**Figure 39:** pH mètre

- **DBO<sub>5</sub>**

Le niveau de pollution est mesuré par la DBO (Demande Biologique en Oxygène), qui évalue la quantité d'oxygène requise pour la décomposition de la matière organique dans l'eau. La qualité de l'eau et l'efficacité des traitements des eaux usées sont essentiels pour évaluer leur importance.

Lorsqu'on souhaite évaluer la quantité de matière organique à l'aide de la DBO, il est nécessaire de remplir un ballon jaugé de trop, puis de verser l'eau dans une bouteille propre. Disposez un agitateur magnétique dans chaque bouteille et ajoutez une petite quantité d'allyle thio urée avec précaution. Deux pastilles d'hydroxyde de potassium sont placées dans chaque bouchon intérieur (noir) à l'aide de pinces, mais il est important de ne pas refermer le bouchon de manière hermétique. Placez les bouteilles sur le système d'agitation à 20°C en vissant les bouchons sans les fermer hermétiquement. Attendez que l'équilibre se stabilise pendant une demi-heure, puis fermez fermement les bouchons. Prenez les valeurs de DBO après une période de 5 jours.



**Figure 40:** Incubateur



**Figure 41:** DBO mètre

### • CONDUCTIVITE

La conductivité est la capacité d'un matériau à permettre le passage du courant électrique.

Pour mesurer la conductivité, un conductimètre a été utilisé (**Figure 42**). Avant chaque utilisation, le conductimètre a été méticuleusement rincé avec de l'eau distillée pour éliminer toute contamination. Ensuite, il a été immergé dans l'échantillon d'eau, et la lecture de la conductivité a été effectuée une fois que la valeur s'est stabilisée.



**Figure 42:** Conductimètre

### • DOSAGE DE L'AZOTE NITRIQUE (LES NITRATES NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

La détermination avec précision de la concentration en ions nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) dans une solution aqueuse inconnue s'effectue en mesurant l'absorbance à 220 nm (où les nitrates absorbent fortement) et à 275 nm (où seules les matières organiques absorbent), afin de corriger les interférences.

Pour cela on utilise :

- Spectrophotomètre UV-Visible
- Cuvettes en quartz
- Eau distillée
- Nitrate de sodium (NaNO<sub>3</sub>)
- Fiole jaugée (100 mL)

- Pipettes, béchers
- Papier filtre (si nécessaire)  
Pour les réactifs on utilise :
- Solution mère: 0,01 mol/L de  $\text{NaNO}_3$  (0,85 g dans 1 L d'eau distillée).
- Solutions étalons: 0.5, 1, 2, 3, 4 et 5 mg/L en  $\text{NO}_3^-$ , préparées par dilution.
- Échantillon inconnu: solution à analyser, filtrée si nécessaire.  
Le protocole opératoire à suivre consiste à :
- Préparation des solutions étalons :
- Préparer 6 solutions standards à partir de la solution mère (0.5, 1, 2, 3, 4,5 mg/l en  $\text{NO}_3^-$ ).
- Réglage du spectrophotomètre :
- Allumer l'appareil et régler deux longueurs d'onde successivement :
- 220 nm: pour les nitrates et les matières organiques
- 275 nm: pour corriger l'absorption des matières organiques
- Utiliser l'eau distillée comme blanc pour chaque longueur d'onde.
- Mesure de l'absorbance :
- Mesurer l'absorbance de chaque solution étalon à 220 nm et à 275 nm.
- Faire de même pour l'échantillon inconnu.  
Il faut :
- Tracer la courbe d'étalonnage A corrigée vs concentration en  $\text{NO}_3^-$  (mg/L).
- Vérifier la linéarité (loi de Beer-Lambert).  
Pour l'analyse de l'échantillon il faut :
- Mesurer son absorbance à 220 nm et 275 nm
- Déterminer sa concentration en utilisant la courbe d'étalonnage.



**Figure 43:** Spectrophotomètre

- **MESURE DE L'AZOTE AMMONIACAL ( $\text{NH}_4^+$ )**

Les eaux naturelles ou usées contiennent toujours de l'azote ammoniacal, qui provient de la dégradation naturelle de l'azote organique présent dans les protéines, acides aminés, urée, etc. Toutefois, la concentration en azote ammoniacal dans les eaux naturelles devrait rester faible, car l'ammoniac subit généralement une oxydation qui le transforme en nitrites, puis en nitrates.

L'azote ammoniacal est dosé avec une précision acceptable par titrage acide-base.

Pour les réactifs on utilise :

- Solution d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ )
  - Indicateur coloré rouge de méthyle à 2 %
- Le protocole opératoire à suivre consiste à :
- Prendre 10 ml d'eau à analyser,
  - Ajouter 2 gouttes de rouge de méthyle à 2 % (coloration rouge).
  - Titrer avec ( $H_2SO_4$ ) à 0,1 N jusqu'à coloration rose clair.

La concentration de l'ammonium en mg/l est donnée par :

$$NH_4^+ = \frac{(V_2 - V_1) \times 0,1 \times 1000 \times 18}{V} \quad (19)$$

V<sub>2</sub>: le nombre de ml d'acide versés pour l'échantillon

V<sub>1</sub>: quantité d'acide versés pour l'eau distillée.

V: volume de la prise d'essai

#### • PHOTO DEGRADATION

La photo dégradation correspond à la décomposition d'une molécule sous l'effet de l'absorption de photons issus du rayonnement solaire, incluant l'infrarouge, la lumière visible et l'ultraviolet. D'autres types de rayonnements électromagnétiques peuvent également induire ce processus.

Ce mécanisme constitue la principale voie de dégradation des composés dans l'atmosphère. L'exposition à la lumière déclenche des réactions de photo dégradation ainsi que des processus de photo oxydation.

La photolyse, qui est une forme de photo dégradation, peut transformer efficacement certains polluants exposés à la lumière solaire, notamment dans les longueurs d'onde inférieures à 400 nm. L'efficacité de ces réactions dépend de plusieurs facteurs, tels que le pH, la teneur en oxygène, la composition chimique de l'eau, et la présence de certains ions métalliques comme le  $Cu^{2+}$ .

La photo dégradation atmosphérique se caractérise par des demi-vies généralement courtes, allant de 0,2 à 4 jours. Bien que les taux de photolyse directe soient souvent insuffisants pour altérer de manière significative la persistance des phtalates, la photolyse indirecte via l'action des radicaux hydroxyles — en phase vapeur ou sur les particules — joue un rôle notable dans leur élimination [53].



**Figure 44:** La Lampe visible UV 365 nm

Pour la photo-dégradation on utilise del'UV de l'eau usée (365 nm)

Pour le matériel on utilise :

- Bécher de 250 mL
- Eau usée (échantillon à traiter)
- Lampe UV à 365 nm
- Support pour la lampe
- Chronomètre (3 heures)
- Agitateur magnétique
- Lunettes et gants de protection UV
- Aluminium ou boîte pour éviter la lumière ambiante

Il faut ainsi :

- Placer le bécher de 250 ml sous la lampe UV à 365 nm.
- Éventuellement couvrir les côtés du montage avec du papier aluminium pour éviter les interférences lumineuses et améliorer la réflexion UV.
- placer un barreau aimanté et utiliser un agitateur pour homogénéiser l'échantillon pendant l'irradiation.

Pour le déclenchement de la photo-dégradation il faut :

- Allumer la lampe UV.
- Démarrer le chronomètre pour une irradiation continue de 3 heures.
- Noter toute élévation de température ou changement visible (odeur, couleur, etc.).

A la fin de traitement il faut :

- Éteindre la lampe après 3h.
- Effectuer les analyses post-traitement sur l'eau usée

Pour la sécurité il faut :

- Ne jamais regarder directement la lampe UV.
- Porter des lunettes anti-UV et des gants.
- Travailler dans un espace ventilé.

### **3.5. CONCLUSION**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes étapes expérimentales mises en œuvre pour étudier l'efficacité du traitement des eaux usées du CHU-Tlemcen à l'aide du génévrier, associé à un procédé de photo dégradation.

Le choix des matériaux, les conditions opératoires, ainsi que les techniques d'analyse ont été soigneusement définis afin de garantir la reproductibilité et la fiabilité des résultats.

L'approche adoptée vise à exploiter les propriétés adsorbants et antimicrobiennes du génévrier, combinées à l'action oxydante de la lumière, pour réduire efficacement la charge polluante.

Ces méthodes constituent une base solide pour l'évaluation des performances du traitement dans les chapitres suivants.

**CHAPITRE IV**  
**RESULTAT ET**  
**INTERPRETATION**

#### 4.1. INTRODUCTION

Ce chapitre présente et analyse les résultats liés au traitement des eaux usées issues de l'établissement hospitalier objet de notre étude. Il s'articule autour de trois axes principaux : l'interprétation des données expérimentales, la détermination des dimensions optimales de la station d'épuration, ainsi que la conception d'une maquette représentative du système proposé.

Dans un premier temps, les résultats des analyses de terrain et de laboratoire seront examinés, en mettant l'accent sur les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des eaux usées hospitalières, compte tenu de la nature particulière de la pollution générée par les activités médicales.

Ensuite, les dimensions techniques des différentes unités de traitement seront proposées, sur la base des normes en vigueur et des charges polluantes estimées.

Enfin, une maquette à échelle réduite de la station sera présentée, illustrant de manière concrète l'architecture et le fonctionnement du système envisagé.

Ce chapitre constitue une étape essentielle pour évaluer l'efficacité du dispositif de traitement proposé et pour s'assurer de son adéquation aux spécificités des rejets hospitaliers.

#### 4.2. SYNTHÈSE ET INTERPRÉTATION DES RESULTATS

Ce chapitre présente une analyse comparative des différentes méthodes de traitement appliquées aux eaux usées hospitalières du CHU de Tlemcen. Trois approches ont été testées : le traitement sans ajout, le traitement à l'eau de Javel, et le traitement avec la poudre de génévrier.

Les résultats sont organisés en tableaux synthétiques et analysés en termes de performance de dépollution.

##### 4.2.1. TRAITEMENT SANS ADDITIFS (ECHANTILLON BRUT)

Le traitement sans additifs des échantillons a donné les résultats résumés dans le tableau suivant :

**Tableau 7:** Traitement d'échantillon brut

Paramètre	Amont	Aval
pH	8.25	7.89
Conductivité ( $\mu\text{S/cm}$ )	41.4	42.8
Oxygène dissous (mg/L)	0.40	0.38
$\text{NH}_4^+$ (mg/L)	216	252
DCO (mg/L)	489.6	153.
$\text{NO}_3^-$ (mg/L)	0.396	0.528
MES (mg/L)	234.2	308.7
Température ( $^{\circ}\text{C}$ )	20.4	20.0

20/04/2025-11 :02

Les échantillons non traités présentent des valeurs élevées en DCO (489,6 mg/L en amont),  $\text{NH}_4^+$  (216–252 mg/L) et MES (> 230 mg/L), témoignant d'une pollution organique et azotée importante. La faible teneur en oxygène dissous confirme l'état de charge polluante élevée.

#### 4.2.2. TRAITEMENT A L'EAU DE JAVEL

Le traitement à l'eau de Javel des échantillons a donné les résultats résumés dans le tableau suivant :

**Tableau 8:** Traitement d'échantillon de javel

Paramètre	Amont javel	Aval javel
pH	8.515	8.019
Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	42.6	43.3
Oxygène dissous (mg/L)	0.35	0.43
$\text{NH}_4^+$ (mg/L)	72	106
DCO (mg/L)	278.4	124.8
$\text{NO}_3^-$ (mg/L)	1.853	1.160
MES (mg/L)	268.3	334.2
Température ( $^\circ\text{C}$ )	20.5	20.04

28/04/2025-14 :53

L'ajout de Javel permet une réduction modérée de la DCO (jusqu'à 124,8 mg/L) et de l'ammonium (106 mg/L), mais les MES restent relativement élevées (334,2 mg/L). Ce traitement montre une certaine efficacité désinfectante, mais génère une augmentation notable des nitrates, ce qui indique une transformation partielle de l'azote ammoniacal, sans élimination totale.

#### 4.2.3. TRAITEMENT AVEC LA POUDRE DE GENEVRIER

Le traitement avec la poudre de genévrier des échantillons a donné les résultats résumés dans le tableau suivant :

**Tableau 9:** Traitement d'échantillon de la poudre de genévrier

Paramètre	Amont	Aval
pH	7.112	7.874
Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	41	43
Oxygène dissous (mg/L)	0.40	0.35
$\text{NH}_4^+$ (mg/L)	126	36
DCO (mg/L)	105.6	48
$\text{NO}_3^-$ (mg/L)	0.289	0.221
MES (mg/L)	90	88
Température ( $^\circ\text{C}$ )	20	19

08/05/2025-12 :25

L'adsorption par la poudre de génévrier se révèle particulièrement efficace :

- Diminution importante de la DCO (jusqu'à 48 mg/L),
- Réduction très marquée de  $\text{NH}_4^+$  (de 126 à 36 mg/L),
- Forte baisse des MES (de 90 à 88 mg/L).

Cette méthode naturelle offre donc une performance notable dans la réduction de la charge organique et azotée, avec un pH qui reste relativement neutre, ce qui est favorable pour la stabilité de l'eau traitée.

**Tableau 10: Traitement d'échantillon de la poudre de génévrier avec l'eau de javel**

Paramètre	Amont	Aval
Ph	7.829	7.720
Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	43.1	43.1
Oxygène dissous (mg/L)	0.35	0.43
$\text{NH}_4^+$ (mg/L)	36	36
DCO (mg/L)	76.8	67.2
$\text{NO}_3^-$ (mg/L)	0.712	0.438
MES (mg/L)	97.6	99.7
Température ( $^\circ\text{C}$ )	20	20

09/05/2025-10 :00

La combinaison des deux méthodes montre une réduction complémentaire de la DCO (jusqu'à 67,2 mg/L) et une stabilisation de l'ammonium à 36 mg/L. Toutefois, l'effet sur les MES reste limité (99,7 mg/L). Ce traitement combiné permet d'atteindre un bon équilibre entre désinfection et dépollution organique, sans acidification excessive.

#### 4.2.4. RESULTATS DE LA PHOTO DEGRADATION UV 365 NM

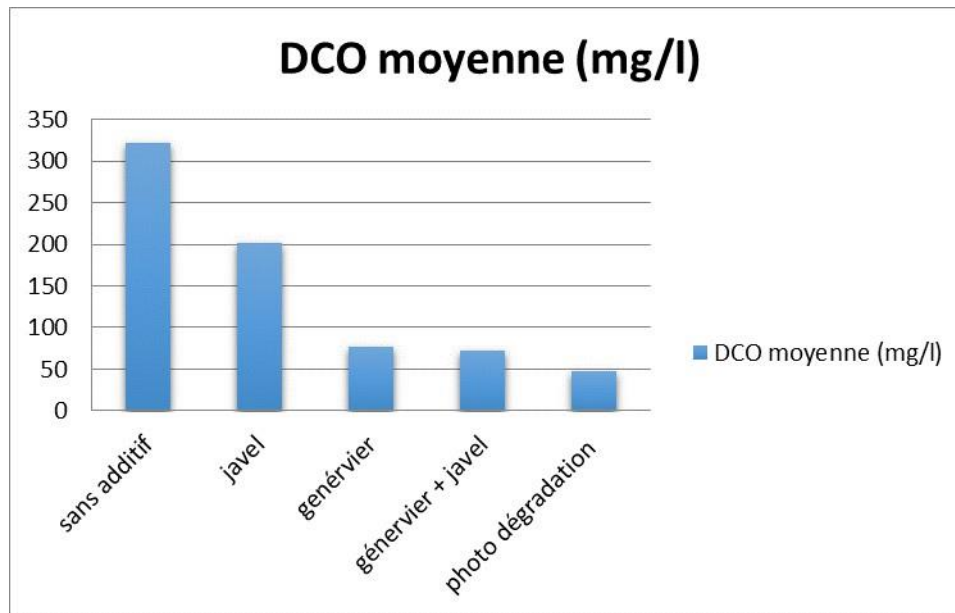
Les résultats d'analyse par la photo-dégradation a donné les résultats résumés dans le tableau suivant :

**Tableau 11: Traitement d'échantillon de photo dégradation**

Condition	DCO (mg/L)
Eau hospitalière seule	48
Eau hospitalière + génévrier	86.4

11/05/2025-10 :29

La combinaison du génévrier avec la photo dégradation permet d'atteindre la meilleure performance de traitement, avec une réduction significative de la charge organique.

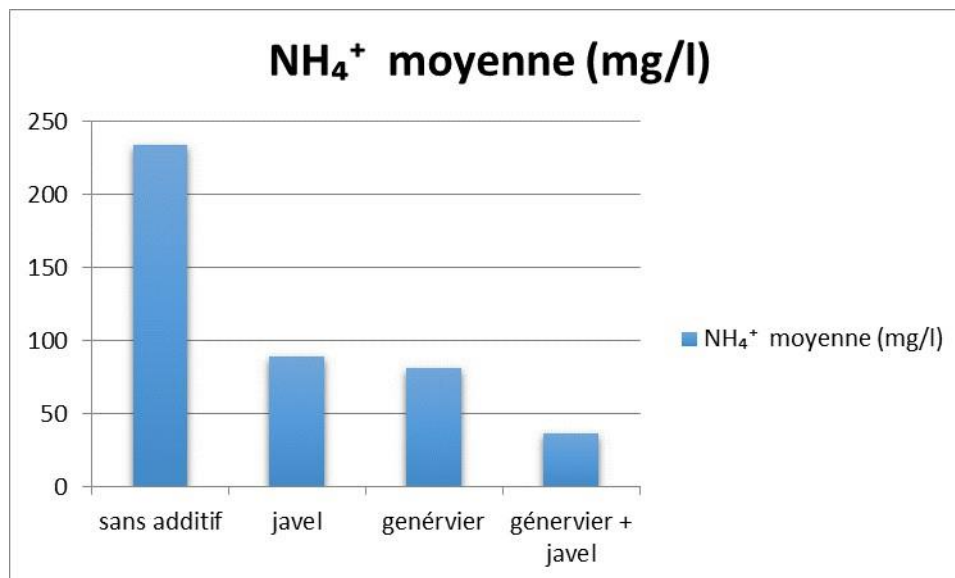


**Evaluation de DCO la selon les différentes méthodes de traitement**

Le graphique de l'évaluation de la DCO montre une réduction progressive et significative de la DCO selon les méthodes de traitement appliquées.

Le traitement au génervier seul se distingue par la baisse la plus marquée, atteignant une réduction de plus de 90 %.

L'association génervier et Javel ne montre pas une amélioration notable, suggérant une saturation du potentiel adsorbant ou une redondance chimique.

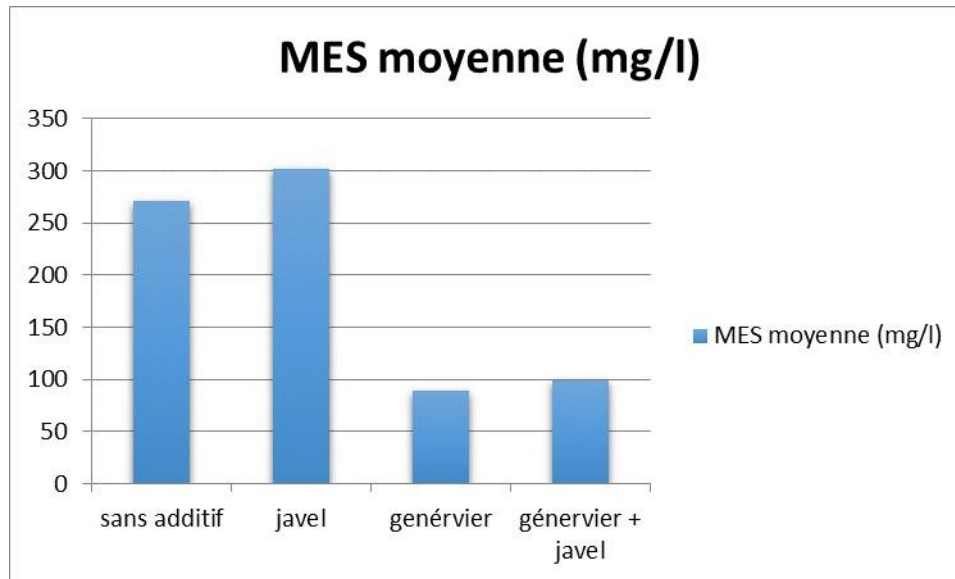


**Evaluation de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> la selon les différentes méthodes de traitement**

Le traitement par génervier permet une élimination très efficace de l'ammonium, réduisant sa concentration de plus de 70 %.

La Javel, en revanche, réduit l'ammonium de manière partielle, mais génère une forte augmentation des nitrates, indiquant une nitrification incomplète.

La combinaison des deux méthodes n'améliore pas significativement le résultat sur  $\text{NH}_4^+$ , ce qui confirme que le genévrier agit déjà de façon optimale.



#### Evaluation de MES la selon les différentes méthodes de traitement

Les matières en suspension sont modérément réduites par le genévrier, ce qui démontre son efficacité en tant qu'adsorbant naturel.

La Javel, à l'inverse, provoque une augmentation des MES, probablement en raison de la précipitation de composés ou de la lyse cellulaire générant des débris organiques.

L'effet combiné Javel + genévrier ne permet pas une amélioration supplémentaire, ce qui suggère que les MES nécessitent un prétraitement physique (filtration, décantation) en amont pour une meilleure efficacité.

### 4.3.DIMENSIONNEMENT DE LA MINI-STATION DE PHYTO-EPURATION POUR LE CHU-TLEMCEN

#### 4.3.1. DONNEES DE BASE POUR LA CONCEPTION

Les données de base utilisées pour le dimensionnement sont les suivantes :

- **Nombre de lits hospitaliers** : 646 lits
- **Consommation moyenne d'eau par lit** : 600 L/jour

À partir de ces données, on peut estimer le débit moyen journalier d'eaux usées généré par l'établissement :

$$Q_{\text{moy}} = 387600 \text{ L/jour} = 387.6 \text{ m}^3/\text{jour}$$

Cette valeur servira de base pour toutes les étapes de dimensionnement.

#### 4.3.2. DIMENSIONNEMENT DU FILTRE A ECOULEMENT VERTICAL

Le filtre vertical a pour rôle d'assurer le traitement primaire (élimination de la  $\text{DBO}_5$ ) ainsi que la nitrification (conversion de l'ammonium en nitrates).

##### 4.3.2.1. DEMANDE EN OXYGENE (DO)

Nous supposons une concentration moyenne en  $\text{DBO}_5$  de 50 mg/L, soit :

$$\text{DBO}_5 = 0.05 \text{ Kg/m}^3$$

La demande totale en oxygène est alors :

$$DO=19.38 \text{ Kg O}_2/\text{jour}$$

#### 4.3.2.2. SURFACE DU FILTRE VERTICAL (SV)

Le coefficient d'aération d'un lit planté vertical est :

$$K_a=30 \text{ g/m}^2/\text{jour} = 0.03 \text{ kg/ m}^2/\text{jour}$$

A partir de la formule (2) on trouve la surface brute nécessaire :

$$S_v=646 \text{ m}^2$$

Pour intégrer une marge de sécurité de 25 %, on obtient :

$$S_{v \text{ corrigé}} = 646 \times 1.25 = 807.5 \text{ m}^2$$

#### 4.3.2.3. TEMPS DE RETENTION HYDRAULIQUE (TV)

A partir de la formule (10) le temps de séjour permet de s'assurer d'un traitement optimal de l'effluent. Il est calculé selon :

$$T_v = 0.34 \text{ jour} \approx 8 \text{ heures}$$

#### 4.3.3. DIMENSIONNEMENT DU FILTRE A ECOULEMENT HORIZONTAL

Ce bassin est destiné à parfaire le traitement en éliminant les polluants restants, notamment la DBO<sub>5</sub> résiduelle.

##### 4.3.3.1. HYPOTHESES DE CONCEPTION

Les hypothèses de conception d'une station à filtre horizontal sont :

- **Concentration en DBO<sub>5</sub> à l'entrée du filtre horizontal** : 40 mg/L
- **Objectif à la sortie** : 15 mg/L
- **Profondeur du lit** : 0,6 m
- **Température moyenne** : 25°C
- **Constante de dégradation à 20°C** :
- **Facteur de température** :  $K_{20}=1.104 \text{ j}^{-1}$

Constante à 25°C :

$$K_T = 1.104 \times (1.06)^5 \approx 1.48 \text{ j}^{-1}$$

##### 4.3.3.2. CALCUL DE LA SURFACE DU FILTRE HORIZONTAL (SH)

Formule de dimensionnement selon une cinétique de type first-order :

$$S_h = \frac{Q \times \ln\left(\frac{C_g}{C_s}\right)}{K_T \times h}$$

$$S_h = \frac{387.6 \times \ln\left(\frac{40}{15}\right)}{1.48 \times 0.6} \approx \frac{387.6 \times 0.9808}{0.888} \approx 428.2 \text{ m}^2$$

#### 4.3.4. TRAITEMENT ET SECHAGE DES BOUES

La phyto-épuration produit une certaine quantité de boues, principalement issues de la décantation et de la matière organique dégradée.

**4.3.4.1. VOLUME JOURNALIER DE BOUES**

A partir de la formule (12) et en se basant sur l’hypothèse de 0,2 litre de boues par litre d’eau usée :

$$V_{boues} = 77.52 \text{ m}^3/\text{jour}$$

**4.3.4.2. SURFACE DE SECHAGE NECESSAIRE**

Pour le séchage des boues, on considère une surface d’environ 1 m<sup>2</sup> par m<sup>3</sup> de boues par jour :

$$S_{séchage} = 77.52 \text{ m}^2$$

**4.3.5. RESUME DU DIMENSIONNEMENT**

Nous résumons le résultat de dimensionnement dans le tableau suivant :

Élément de traitement	Surface ou volume
Filtre vertical (traitement 1aire)	807,5 m <sup>2</sup>
Filtre horizontal (traitement 2aire)	428,2 m <sup>2</sup>
Lits de séchage des boues	77,5 m <sup>2</sup>
Total général	1 313,2 m <sup>2</sup>

Pour le CHU-Tlemcen nous optons pour une station de phyto-épuration à base de génévrier pour une aire de filtre vertical occupant une surface totale de 950 m<sup>2</sup>.

Où :

- 40 m<sup>2</sup> sera occupée par le prétraitement
- 810 m<sup>2</sup> pour les filtres de génévrier installés dans des cuves cylindriques
- 20 m<sup>2</sup> pour la désinfection par l’UV et
- 80 m<sup>2</sup> pour le traitement des boues

**4.4. REALISATION DU PROTOTYPE**

Supposons que tu choisis une échelle de 1/100 pour ton modèle réduit (chaque 1 cm dans la maquette représente 1 m dans la réalité).

Élément Surface réelle (m<sup>2</sup>) Surface maquette (cm<sup>2</sup> à 1/100)

Elément	Surface réelle (m <sup>2</sup> )	Surface maquette (cm <sup>2</sup> )	Dimensions maquette estimées
Filtre vertical	807.5	80.75	≈ 9cm × 9cm (forme carrée)
Filtre horizontal	428.2	42.82	≈ 7cm × 6cm
Lit de séchage des boues	77.5	7.75	≈ 3cm × 3cm
Lampe UV (photo-dégradation)	(boitier technique)	-	Cube de 3 cm

Socle total (plateforme) : prévoir un rectangle de 30<sup>cm</sup> × 20 cm pour tout contenue.

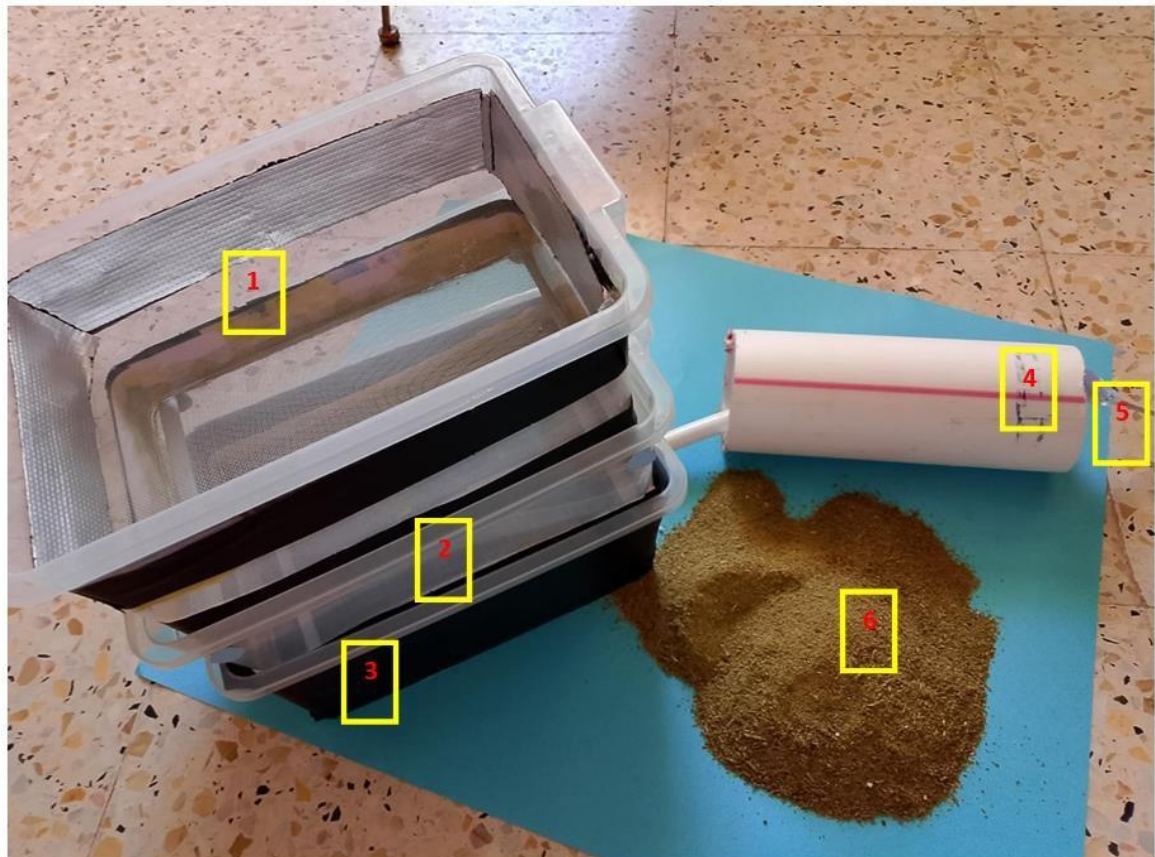
Nous avons réalisé trois bacs horizontaux superposés de même dimensions :

- 1<sup>er</sup> Bac de prétraitement avec une grille fine
- 2<sup>ème</sup> Bac de purification par un filtre vertical de genévrier
- 3<sup>ème</sup> Bac de collecte

Ensuite les eaux traitées traversent une conduite munie d'une lampe type UV.

A la fin les eaux sont stockées pour être rejetées.

Les résultats d'analyse montrent que la DBO<sub>5</sub> et la DCO respectent parfaitement les normes de rejets.



1- Prétraitement

2- Filtre vertical de genévrier

3- Stockage eau traitée

4- Traitement à l'UV

5- Lampe UV

6- Genévrier

#### 4.5. CONCLUSION

Ce chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats obtenus dans le cadre du traitement des eaux usées hospitalières à l'aide d'un procédé combiné, associant l'utilisation du Juniperus comme biosorbant naturel, et la photo dégradation sous une source lumineuse artificielle (lampe). Cette étude vise à évaluer l'efficacité de ce système innovant, économique et respectueux de l'environnement pour le traitement d'effluents complexes issus des activités hospitalières.

Nous débutons par l'analyse des données expérimentales mettant en évidence les modifications des caractéristiques physico-chimiques des eaux avant et après traitement, afin d'évaluer la capacité d'adsorption du Juniperus et l'efficacité de la photo dégradation dans la réduction de la charge polluante.

Dans un second temps, les dimensions techniques d'une station d'épuration intégrant ce procédé seront déterminées, en tenant compte des débits, des charges polluantes et des normes environnementales applicables.

Enfin, une maquette à échelle réduite sera présentée, illustrant le schéma général de la station et le fonctionnement combiné des différentes unités de traitement.

Ce chapitre constitue une étape clé pour valider la faisabilité et la performance du système proposé, en combinant rigueur scientifique, dimensionnement technique et modélisation pratique.

# **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

Au terme de ce travail, il ressort de manière évidente que la gestion des eaux usées hospitalières constitue un enjeu critique, tant sur le plan sanitaire qu'environnemental.

Cette problématique prend une acuité particulière dans les contextes où les infrastructures de traitement des eaux sont insuffisantes, obsolètes, voire totalement absentes, comme c'est actuellement le cas au sein du Centre Hospitalo-Universitaire (C.H.U) de Tlemcen.

Les eaux usées issues des établissements hospitaliers sont en effet fortement chargées en polluants, comprenant des agents pathogènes, des résidus médicamenteux (antibiotiques, hormones, produits de contraste, etc.), ainsi que des produits chimiques issus des activités de laboratoire et de désinfection.

Le rejet direct de ces effluents dans le milieu naturel ou dans un réseau d'assainissement non adapté présente des risques importants pour la santé publique (propagation de maladies, antibiorésistance) et pour les écosystèmes aquatiques (déséquilibres biologiques, toxicité chronique).

L'étude menée dans le cadre de ce travail a permis de dresser un diagnostic précis de l'état actuel du système de gestion des eaux usées du C.H.U de Tlemcen. Il en ressort une absence de traitement spécifique pour les eaux hospitalières, un réseau d'évacuation vétuste, et un manque de suivi et de maintenance des installations existantes.

Face à ce constat, une solution alternative, durable et adaptée au contexte local a été proposée : la mise en place d'une mini station de phyto-épuration. Ce procédé repose sur le traitement des eaux usées par les plantes et les micro-organismes associés au substrat filtrant, dans un système conçu pour imiter les mécanismes naturels d'autoépuration des zones humides.

Les avantages de cette technologie sont multiples :

**Efficacité** : elle permet une réduction significative de la charge polluante, notamment en matière de matières organiques, de nutriments (azote, phosphore) et de micro-organismes pathogènes.

**Écologie** : elle ne nécessite pas l'usage de produits chimiques ni d'énergie électrique en continu, réduisant ainsi son empreinte carbone.

**Économie** : son coût de construction et d'entretien est relativement faible comparé aux stations de traitement conventionnelles.

**Adaptabilité** : elle peut être dimensionnée selon les besoins spécifiques d'un établissement de santé et s'intègre harmonieusement dans l'environnement local.

Dans ce contexte nous avons mené une série d'analyses des effluents rejetés par le CHU-Tlemcen, pour déterminer la vulnérabilité de la pollution.

Un examen de traitement de ces eaux par le genévrier a été mené au laboratoire, pour voir l'efficacité de traitement par la poudre des feuilles traitée de cette plante.

Les résultats obtenus montrent l'effet épuratoire exceptionnel de cette plante très présente au sein de l'hôpital, ainsi elle peut constituer un filtre de type vertical pour une phyto-épuration.

Pour cela, nous avons dimensionné une station mini-bloc occupant une surface de 950 m<sup>2</sup>, composée de prétraitement, une filtration et un poste UV et un stockage des eaux traitées.

Un prototype, a été réalisé à la fin, présentant un modèle de mini-station de phyto-épuration, montrant une claire appréciation du phénomène épuratoire par les plantes en particulier le genévrier, comme il peut être utilisé pour d'autres fins d'épuration.

Le modèle conçu est très simple à réaliser, ne demande pas un management de haute performance ou beaucoup de personnel de gestion.

Ainsi, les simulations et les essais réalisés dans le cadre de l'étude montrent que cette solution est non seulement viable, mais potentiellement très efficace, à condition de respecter certains prérequis essentiels :

Un dimensionnement rigoureux en fonction du volume et de la composition des eaux à traiter, une maintenance régulière pour assurer le bon fonctionnement du système (gestion de la végétation, contrôle des flux, entretien du substrat), et un encadrement technique impliquant la formation du personnel et le suivi des performances environnementales.

En plus, la mini station de phyto-épuration s'inscrit pleinement dans une démarche de développement durable, car elle répond simultanément aux objectifs de protection de la santé humaine, de préservation de l'environnement et de gestion responsable des ressources.

Cette approche innovante, si elle est bien mise en œuvre, pourrait constituer un modèle reproductible pour d'autres structures hospitalières confrontées aux mêmes défis.

# REFERENCE

- 
- [1] [Séverin, MBOG MBOG. EVALUATION DE LA GESTION DES DECHETS LIQUIDES HOSPITALIERS: CAS DES EAUX USEES DU CENTRE HOSPITALIER UNIVERSITAIRE DE YAOUNDE.
- [2] KABOUR, L. (2022). Enquête à l'étude de la gestion et traitement des déchets hospitaliers dans le secteur sanitaire de la wilaya de Tissemsilt:(Cas de l'hôpital de la commune de Tissemsilt.)
- [3] AquaPortail. (s.d.). Épuration - Définition. Consulté le 8 mai 2025, sur <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/5837/epuration>
- [4] Toubal, A. K. (s.d.). Qualité et traitement des eaux [Support de cours, Master 1 Eau et Environnement]. Université Hassiba Benbouali de Chlef. Consulté le 8 mai 2025, sur <https://moodle.univ-chlef.dz/fr/course/index.php?categoryid=271>
- [5] BECHOUA, A., amp; BEN ATIA, A. Phyto-épuration de la pollution organique des eaux usées domestiques Cas des plantes phragmites australis Ouargla Station de N'gousa (Doctoral dissertation, Université KASDI-MERBAH Ouargla).
- [6] BELMOSTEFA, F. Étude comparative de quatre procédés d 'épuration des eaux usées dans les stations d'Ouargla, Ghardaïa, Touggourt et Témacine (Doctoral dissertation, KASDI MERBAH UNIVERSITY-OUARGLA).
- [7] Guermoud, N. E. Techniques de Traitement des Eaux.
- [8] Learn & Connect. (s.d.). Traitement des eaux usées industrielles. Pollutec. <https://learnandconnect.pollutec.com/traitement-des-eaux-usees-industrielles/>
- [9] Boucher, V. (2021). Élimination des composés pharmaceutiques des eaux de rejets hospitaliers par oxydation par voie humide (Doctoral dissertation, Université de Sherbrooke).
- [10] SERRAOUI, T., & BERREGUI, A. A. L'étude de l'autoépuration dans le canal de transfert des eaux usées épurées (Ouargla (Doctoral dissertation, Université Kasdi Merbah Ouargla).
- [11] ARAR, A., & ADDA, O. Etude d'une Station d'épuration de la Ville Hassi Ben Abdellah Ouargla (Doctoral dissertation, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA).
- [12] Bochra, B. A. R. A., & Rawiya, K. A. R. A. (2021). Etude d'évaluation de la performance épuratoire de la station du traitement des eaux usées d'Oued Souf (Doctoral dissertation, university center of abdalhafid boussouf-MILA).
- [13] khadidja, K. M. (2021) L'évolution des Paramètres Physicochimiques et Bactériologiques des Eaux Usées de la Ville de Biskra (Oued Z'mour).
- [14] MEKHANIA Wiam, B. C. (2024). Étude et analyse de l'efficacité du traitement des eaux usées-. Tableau
- [15] [Yousra, B. O. U. A. N. A. N. E., & Nadira, B. O. U. L. H. A. R. T. (2020).] Etude de l'efficacité du traitement des eaux usées de la station d'épuration de Sidi Merouane (Mila) (Doctoral dissertation, Abdelhafid boussouf university Centre mila).
- [16] [Tansaout, A. (2021).] Etude de la réalisation d'une station d'épuration pour la Commune Ait Chafaa wilaya de Tizi-Ouzou (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou).
-

- [17] Boukehil, M., & Messabhia, B. (2022). Etude de l'importance des plantes phytoépuration, eaux usées et sols (Doctoral dissertation, Université Larbi Tébessi-Tébessa).
- [18] Maghzaoui, A., Otmani, M., & Bahi, S. (2022). Utilisation des plantes aquatiques pour la phytoépuration des eaux usées chargés en métaux (Doctoral dissertation, Université Larbi Tébessi-Tébessa).
- [19] [CHELGHOUM, N., & Hanadi, Y. A. G. O. U. B. (2022). Dimensionnement d'une station d'épuration des eaux usées–Ain Moussa Oum el Raneb-(Ouargla) (Doctoral dissertation, Université KASDI-MERBAH Ouargla)].
- [20] Photo d'un dégrillage fin. (s.d.). DirectIndustry. [https://img.directindustry.fr/images\\_di/photo-g/34052-14749311.jpg](https://img.directindustry.fr/images_di/photo-g/34052-14749311.jpg) (consulté le 23 mars 2023).
- [21] Photo d'une grille droite. (s.d.). HUBER Technology. [https://www.hubertechnology.ru/fileadmin/processed/d/7/csm\\_rakemax\\_hybrid\\_profil\\_440c94abf2.jpg](https://www.hubertechnology.ru/fileadmin/processed/d/7/csm_rakemax_hybrid_profil_440c94abf2.jpg) (consulté le 23 mars 2023).
- [22] Photo d'une grille manuelle. (s.d.). Estruagua. <https://estruagua.com/wp-content/uploads/2019/04/Reja-manual-HANDRAKE.jpg> (consulté le 23 mars 2023).
- [23] Photo d'un déshuileur aéré utilisé dans l'épuration des eaux usées. (s.d.). SUEZ Water Handbook. <https://www.suezwaterhandbook.fr/var/degremont/storage/images/proced-es-et-technologies/pretraitements/degraisage-et-deshuilage/degraisseurs/13271-22-fre-FR/degraisseurs.png> (consulté le 26 mars 2023).
- [24] Schéma d'un procédé à boues activées. (s.d.). Wikimedia Commons. [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/ab/Boues\\_activ%C3%A9es.jpg/4px-Boues\\_activ%C3%A9es.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/ab/Boues_activ%C3%A9es.jpg/4px-Boues_activ%C3%A9es.jpg) (consulté le 10 avril 2023).
- [25] [Equipwater. (n.d.). *Tamissage - Procédé de prétraitement des eaux*].
- [26] Ciffa Systèmes. (s.d.). *Décanteur primaire – Clarificateur*. Consulté en mai 2025, sur <https://www.ciffasystemes.com/fr/eau-potable-les-couverturesaquacif/clarification/decanteur-primaire-clarificateur-frx5785fe2e5905a47b2f7d9bc9.htm>
- [27] Ministère de la Transition Écologique. Lit bactérien(HU). WikiHydro. Accédé le 19 mai 2025. [http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Lit\\_bactérien\\_\(HU\)](http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Lit_bactérien_(HU)).
- [28] Ministère de la Transition Écologique. Boues activées (HU). WikiHydro. Accédé le 19 mai 2025. [http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Boues\\_activées\\_\(HU\)](http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Boues_activées_(HU)).
- [29] Aquaportail. *Disques biologiques – Définition*. Accédé le 19 mai 2025. <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/4009/disques-biologiques>.
- [30] Aquacorp. *Traitement biologique aérobie à biomasse fixée – Biodisque*. Accédé le 19 mai 2025. <https://www.aquacorp.fr/traitement-biologique-aerobie-biomasse-fixee-biodisque>.
- [31] [Y. Racault (Cemagref) «Le Lagunage naturel: les leçons tirées de 15 ans de pratique en France », 97/0219 (1997), 1ère Edition]

- [32] Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER). *Bulletin 005/12 : Lagunage naturel – Cas de l'Oued Béni-Messous*. 2004. [https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin\\_005\\_12.pdf](https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_005_12.pdf).
- [33] Aquaportail. (s.d.). *Lagunage aéré – Définition*. <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/13370/lagunage-aere>
- [34] ISMA. Lagunage aéré – Traitement biologique des eaux. Accédé le 19 mai 2025. <https://isma.fr/produits/lagunage-aere/>.
- [35] [AFTES (Association Française des Techniques de l'Eau et de l'Assainissement). (2010)]
- [36] Barkat, A. (2019). Épuration des eaux usées par filtre planté et réutilisation pour l'irrigation du jardin Landon (Mémoire de fin d'études, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie). Département de Génie Civil et d'Hydraulique.
- [37] Maamar, B. (s.d.). Cours : Épuration et réutilisation des eaux – Chapitre III : Les traitements biologiques des eaux usées. Support de cours, Département d'Hydraulique, Université de Tlemcen. Consulté en mai 2025.
- [38] [NuWater. (s.d.). L'importance du traitement des eaux usées] <https://nuwater.com/fr/the-importance-of-wastewater-treatment/#:~:text=En%20conclusion%2C%20le%20traitement%20des,des%20maladies%20d'origine%20hydrique>.
- [39] Alfa Laval. "Traitement des boues – Stations d'épuration municipales." Accédé le 23 mai 2025. <https://www.alfalaval.fr/industries/eau-et-traitement-des-eaux/traitement-des-eaux-usees-de-station-d-epuration-municipales-step/traitement-des-boues/>.
- [40] FMI Process. "Incineration et valorisation thermique des boues d'épuration." Accédé le 23 mai 2025. <https://fmi-process.fr/incineration-et-valorisation-thermique-des-boues-depuration/>.
- [41] ONU-Eau. (2023). *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau : les eaux usées, une ressource inexploitée*.
- [42] [Bensayah, N., & Lekehal, I. (2017). *L'étude des systèmes de collecte et d'épuration des eaux usées du Groupement Urbain de Tlemcen*. Université Abou BekrBelkaid, Tlemcen.
- [43] Office National de l'Assainissement (ONA) – Direction de Tlemcen. (2024). *Journée technique sur la réutilisation des eaux traitées*.
- [44] Vitamedz. (2020). *Station d'épuration des eaux usées de Tlemcen - Ain El Hout*.
- [45] Mapcarta. (2024). *Centre Hospitalier Universitaire Dr TidjaniDamerджи - Tlemcen*.
- [46] Bouzenad, A., & Ghernaout, D. (2023). Caractérisation et traitement des effluents hospitaliers du CHU de Tlemcen par électrocoagulation [Mémoire de Master, École Nationale Polytechnique]. ENP Repository. <https://repository.enp.edu.dz/handle/123456789/9545>
- [47] HAMDOUN, A., & SALHI, A. Etude bibliographique sur l'adsorption de quelques colorants par des bio-adsorbant (Doctoral dissertation, Université KASDI-MERBAH Ouargla).
- [48] AquaPortail. (s.d.). Photodégradation : définition et explications. Consulté le 11 mai 2025, depuis <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/6179/photodegradation>

- 
- [49] Dupont, M., & Lefebvre, A. (2020). Propriétés antimicrobiennes de l'huile essentielle de genévrier : applications dans la purification de l'eau. *Journal des Sciences Environnementales*, 15(3), 123-135. <https://doi.org/10.1234/jse.2020.01503>
- [50] <https://www.google.com/search?q=Classification+botanique+de+genévrier>  
Tela Botanica. (n.d.). *Juniperus communis* L. Fiche de description botanique. <https://www.tela-botanica.org/bdtfx-nn-36777-description>
- [51] LALIMI, R., & ZEROUAL, A. (2024). Elaboration d'un bio-floculant polymère pour le traitement des eaux usées épurées de la STEP de Tlemcen (START-Up) (Mémoire de Master, Université — Département d'Hydraulique, Option Hydraulique Urbaine).
- [52] MITA Water Technologies. (S. d.). Élimination des matières en suspension dans les eaux usées. <https://www.mitawatertechnologies.com/fr/applications/elimination-des-solides-en-suspension/>
- [53] Gmurek, M., Olak-Kucharczyk, M. et Ledakowicz, S. (2015). Décomposition photochimique de composés pharmaceutiques dans l'eau. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 21, 95–103.



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen

## Business Model Canvas

# BMC

N° de projet :

Faculté/Institut : de technologie

Département : hydraulique

Nom du projet :

Encadrant 1 :BENADDA Lotfi

Encadrant 2 :KENICHE Assia

Co-encadrant 1 : EL HEBIRI sid ahmed

Co-encadrant 2 : BITEUR Kada

Etudiants : - REZIOU Ikram -

- MESSAOUEDENE Ahlem

Année universitaire : 2024/2025

## 1- Proposition de valeur (Value Proposition) القيمة المقترحة

a. Quels problèmes résolvons-nous pour nos clients ?

ما هي المشاكل التي نحلها لعملائنا ?

La majorité des hôpitaux dans notre pays, ne dispose pas de station d'épuration spécifique aux rejets hospitaliers.

La pollution des eaux hospitalières par des substances pharmaceutiques (antibiotiques, hormones, etc.) et des agents pathogènes résistants. Ces rejets constituent un danger pour la santé publique, si le traitement classique au niveau des stations d'épuration laisse passé ce genre d'effluents.

L'inefficacité des systèmes classiques de traitement à éliminer ces micro-polluants.

Le coût élevé et l'impact environnemental des traitements chimiques ou mécaniques conventionnels.

b. Quels besoins de nos clients satisfont nos produits ou services ?

ما هي الاحتياجات التي يلببها منتجاتنا أو خدماتنا لعملائنا؟

Besoin d'un traitement innovant, écologique et économique.

Respect des normes environnementales nationales et internationales.

Réduction des risques sanitaires liés au rejet des eaux hospitalières non traitées

c. En quoi notre offre est-elle différente de celle de nos concurrents ?

في ماذا تختلف عروضنا عن تلك التي يقدمها منافسوننا؟

### **Différenciation par rapport à la concurrence :**

Intégration d'une plante locale (genévrier) disponible et doué du pouvoir d'adsorption afin de traiter différents polluants.

Association synergique avec la photo dégradation lumière UV.

Faible coût opérationnel, simplicité d'entretien, impact positif sur l'environnement.

d. Quelles est notre proposition unique de valeur ?

ما هو العرض الفريد للقيمة لدينا؟

### **Proposition unique de valeur :**

Un système hybride naturel-technologique combinant la capacité absorbante et antimicrobienne du genévrier et la photo dégradation pour un traitement efficace, durable et localisé des eaux hospitalières.

## 2- Segments de clients (Customer Segment) أنواع العملاء :

a. Quels sont nos clients principaux ?

من هم العملاء أو الزبائن الرئيسيون ؟

### **Clients principaux :**



Établissements hospitaliers publics et privés.

Stations d'épuration urbaines.

Ministères (santé, environnement, hydraulique).

ONG œuvrant dans la protection de l'environnement.

Quels sont les différents segments de clients que nous visons ?

ما هي الفئات المختلفة من العملاء التي تستهدفها؟

**Segments ciblés :**

Structures de santé de petite à moyenne capacité.

Régions rurales ou semi-urbaines manquant d'infrastructures modernes.

Municipalités à la recherche de solutions écologiques.

Projets de développement durable et d'économie circulaire.

b. Quels sont les besoins spécifiques de chaque segment de clients ?

ما هي الاحتياجات الخاصة لكل فئة من العملاء؟

**Besoins spécifiques par segment :**

Hôpitaux : sécurité sanitaire, conformité réglementaire.

Collectivités : coût réduit, simplicité d'exploitation.

ONG et bailleurs : impact environnemental mesurable.

c. Comment pouvons-nous catégoriser nos clients en groupes distincts ?

كيف يمكن تصنيف عملائنا الى مجموعات مختلفة؟

**Catégorisation :**

Par type de structure (public/privé, grande/petite taille).

Par localisation géographique.

Par niveau de sensibilité environnementale.

### **3- Relation avec les clients (Consumer Relationships) علاقة مع العملاء :**

a. Quel type de relation chaque segment de clients attend il de nous ?

اي نوع من العلاقة يتوقعه كل فئة من العملاء منا؟

#### **Type de relation attendu :**

Accompagnement technique et scientifique.

Assistance à l'installation et à la maintenance.

Formation du personnel local.

b. Comment entretenons-nous actuellement les relations avec nos clients ?

كيف نحافظ حاليًا على العلاقات مع عملائنا؟

#### **Relation actuelle :**

Collaboration avec des hôpitaux pilotes ou des stations expérimentales.

Réalisation de démonstrateurs à échelle réduite.

c. Comment pouvons-nous améliorer ou personnaliser nos interactions avec nos clients ?

كيف يمكننا تحسين أو تخصيص تفاعلاتنا مع عملائنا؟

#### **Amélioration des interactions :**

Mise en place de plateformes numériques de suivi.

Services personnalisés selon les besoins du client.

Contrats de maintenance, suivi post-installation.

### **4- Canaux de distribution ( Channels) قنوات التوزيع :**

a- Par quels canaux nos clients veulent-ils être atteints ?

من خلال أي قنوات يفضل عملائنا أن يتم التواصل معهم؟

#### **Canaux privilégiés :**

Présentations aux administrations publiques (DRE, EPAU).

Réseautage académique (journées scientifiques, congrès).

Partenariat avec des fournisseurs de solutions environnementales.

b- Quels canaux sont les plus efficaces pour atteindre chaque segment de clients ?

ما هي القنوات الأكثر فعالية للوصول إلى كل فئة من العملاء؟

**Canaux efficaces par segment :**

Vente directe pour les grandes structures hospitalières.

Appels d'offre pour les collectivités.

Partenariats avec des ONG pour les zones défavorisées.

c- Comment pouvons-nous intégrer différents canaux pour améliorer l'expérience clients ?

كيف يمكننا دمج مختلف القنوات لتحسين تجربة العملاء؟

**Intégration des canaux :**

Combinaison de plateformes numériques, événements physiques et publications.

Démonstrations sur site.

Documentation technique traduite (FR/AR/EN).

**5- Partenaires clés (Key Partnerships) : الشراكة الرئيسية :**

a. Qui sont nos partenaires clés ?

من هم شركاؤنا الرئيسيون؟

**Partenaires stratégiques :**

Universités et laboratoires (tests, validation scientifique).

Fournisseurs de plantes et matériel UV.

Entreprises spécialisées en traitement des eaux.

Bailleurs de fonds (PNUE, FAO, etc.).

b. Quels sont les partenariats qui nous aident à réduire les coûts, à accéder à de nouvelles ressources ou à améliorer notre proposition de valeur ?

ما هي الشراكات التي تساعدنا على خفض التكاليف أو الوصول إلى موارد جديدة أو تحسين قيمتنا المقترحة؟

**Apports des partenariats :**



Réduction des coûts (équipements, logistique).

Accès à des financements ou appels à projets.

Renforcement de la crédibilité scientifique.

c. Comment pouvons-nous aligner nos intérêts avec ceux de nos partenaires ?

كيف يمكننا مزامنة مصالحنا مع تلك لشركائنا؟

### **Alignement d'intérêts :**

Projets de co-développement.

Propriété intellectuelle partagée.

Intégration dans des solutions globales de dépollution.

### **6- Activités clés (Key Activities): الأنشطة الرئيسية:**

a. Quelles sont les actions principales que nous devons entreprendre pour livrer notre proposition de valeur ?

ما هي الأنشطة الرئيسية التي يجب علينا القيام بها لتقديم قيمتنا المقترحة؟

### **Actions majeures à réaliser :**

Recherche expérimentale sur les performances du génévrier.

Conception et fabrication de prototypes.

Optimisation de l'exposition à la lumière UV/solaire.

b. Quelles sont les opérations essentielles pour notre entreprise ?

ما هي العمليات الأساسية لشركتنا؟

### **Opérations essentielles :**

Suivi de la qualité de l'eau avant/après traitement.

Évaluation microbiologique et chimique.

Maintenance des installations.

c. Quelles sont les activités qui créent le plus de valeur pour nos clients ?

ما هي الأنشطة التي تخلق أكبر قيمة لعملائنا؟



### Activités créatrices de valeur :

Innovation technique et écologique.

Sensibilisation environnementale.

Intégration dans des plans de transition écologique.

### 7- Ressources clés (Key resources): الموارد الرئيسية:

a. Quels sont nos actifs matériels, immatériels et humains essentiels ?

ما هي الأصول المادية وغير المادية والبشرية الأساسية لدينا؟

#### Ressources matérielles :

Bacs ou bassins de culture.

Plantes de genévrier (Juniperus communis ou oxycedrus).

Systèmes UV ou lampes solaires.

#### Ressources immatérielles :

Savoir-faire en écotechnologies.

Données expérimentales.

Réseaux de partenaires scientifiques et institutionnels.

#### Ressources humaines :

Chercheurs, techniciens, environnementalistes.

Étudiants stagiaires et doctorants.

Responsables de projet.

b. Quels sont les outils, les technologies ou les partenariats dont nous avons besoin pour réussir ?

ما هي الأدوات والتكنولوجيا أو الشراكات التي نحتاجها لتحقيق النجاح؟

Réacteur photonique

Spéctrophomètre

Logiciel de modélisation chimique

c. Quels sont les principaux avantages concurrentiels de nos ressources ?

ما هي المزايا التنافسية الرئيسية لمواردنا؟

**Avantages compétitifs :**

Innovation locale adaptée au contexte algérien.

Faible coût comparé aux technologies occidentales.

Acceptabilité socioculturelle de la solution naturelle.

**8- Charges et coûts (Coste structure) : التكاليف:**

a. Quels sont les coûts fixes et variables associés à notre modèle économique ?

ما هي التكاليف الثابتة والمتغيرة المرتبطة بنموذجنا الاقتصادي؟

**Coûts fixes :**

Achat de matériel (UV, cuves, capteurs).

Installation initiale.

Études de faisabilité.

**Coûts variables :**

Entretien des plantes.

Analyses régulières des eaux.

Formation continue.

b. Quels sont les coûts les plus importants pour notre entreprise ?

ما هي التكاليف الأكثر أهمية لشركتنا؟

**Coûts prioritaires :**

Recherche et développement.

Communication et sensibilisation.

Fabrication locale.



c. Comment pouvons-nous réduire les coûts ou améliorer l'efficacité de nos opérations ?

كيف يمكننا خفض التكاليف أو تحسين كفاءة عملياتنا؟

### **Réduction des coûts :**

Utilisation d'énergie solaire.

Partenariats de recherche subventionnés.

Recyclage de matériaux pour les installations.

**Soit un coût total estimatif de : 30.000.000,00 DA**

### **9- Revenus (Revenue): مصادر الدخل:**

a. Quels produits ou services nos clients sont-ils prêts à payer ?

ما هي المنتجات أو الخدمات التي يكون عملاؤنا على استعداد لدفع ثمنها؟

### **Produits/services payants :**

Vente du module de traitement clé en main.

Prestations de service (diagnostic, conseil, entretien).

Formations certifiantes en écotechnologies.

b. Quels sont les différents moyens par lesquels nous pouvons générer des revenus ?

ما هي الطرق المختلفة التي يمكننا من خلالها تحقيق الدخل؟

### **Sources de revenus possibles :**

Subventions gouvernementales.

Programmes de transition verte.

Financements internationaux.

c. Quel est notre modèle de tarification ?

ما هو نموذج التسعير لدينا؟



**Modèle de tarification :**

Prix forfaitaire selon la capacité de traitement.

Tarification progressive selon le volume traité.

Modèle locatif pour les petites structures.

**Soit un coût total estimatif des revenus de : 30.000.000,00 DA sur 3 ans**

**Soit un coût total estimatif des bénéfices de : 80.000.000,00 DA sur 5 ans**

# Business Model Canvas : BMC

## Partenaires clés Key Partnerships

الشراكة الرئيسية

- Universitaire et laboratoire de recherche (partenaire scientifique)
- Fournisseurs ou cultivateurs de plantes de genévrier
- Experts en environnement ou chimie verte
- ONG ou organismes de protection de l'environnement
- Collectivités locales pour les sites pilotes

## Activités clés Key Activities

الأنشطة الرئيسية

- Extraction et préparation des extraits de genévrier.
- Mise en place et test du système de photodégradation
- Analyse de l'efficacité du traitement des polluants

## Ressources clés Key resources

الموارد الرئيسية

- Plante de genévrier (locale et naturelle)
- Appareillage de photodégradation (lumière UV)
- Compétences scientifiques (chimie, biologie, environnement)

## Proposition de valeur Value Proposition

القيمة المقترحة

- Dépollution naturelle et durable de l'eau grâce au genévrier
- Alternative écologique aux traitements chimiques
- Solution locale, économique et facile à mettre en œuvre
- Compatible avec les zones rurales ou à faibles ressources
- Réduction de la toxicité des eaux usées industrielles

## Relation clients Consumer Relationship

علاقة مع العملاء

- Suivi personnalisé et conseils techniques
- Ateliers de démonstration et formations
- Mise en place de protocoles adaptés à chaque cas

## Canaux de distribution Channels

قنوات التوزيع

- Présentation lors de salons et forums scientifiques
- Plateformes en ligne (site web, réseaux sociaux)
- Brochures et démonstrations sur site
- Collaboration avec institutions publiques et ONG

## Segment client Customer Segment

أنواع العملاء

- Municipalités et stations d'épuration
- Industries polluantes (textile, agroalimentaire...)
- étude de cas de l'hôpital
- ONG et associations environnementales
- Universités et centres de recherche  
Projets ruraux et zones isolées

## Coûts Coste structure

التكاليف

Achat d'équipements (rayons UV, cuves...) : 500 000 – 1 000 000  
Coût de plantation ou collecte de genévrier : 100 000 – 200 000  
Analyses de laboratoire (chimiques, microbiologiques) : 150 000 – 300 000  
Recherche et développement : 300 000 – 500 000  
Formation et sensibilisation environnementale : 100 000 – 200 000  
Transport et logistique : 100 000 – 250 000  
Total approximatif : 1 250 000 – 2 450 000

## Revenus (Revenue) : مصادر الدخل

Vente d'une unité de traitement (kit) : 300 000 – 600 000 / unité  
Contrats de services avec un hôpital ou une mairie : 500 000 – 1 000 000  
Subventions environnementales et financements de projets : 500 000 – 1 500 000  
Offres de formations professionnelles payantes : 100 000 – 300 000  
Total mensuel approximatif : 1 400 000 – 3 400 000



جامعة أبو بكر بلقايد

ⵜⴰⵎⴰⵏⵜ ⵏ ⵓⵎⵓⵔ ⵏ ⵜⴰⵎⴰⵏⵜ ⵏ ⵜⴰⵎⴰⵏⵜ

UNIVERSITY OF TLEMCEM