

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département : Génie D'environnement

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie Des Procédés

Spécialité : Gestion Des Changements Environnementaux En Méditerranée

Par

➤ **Belaidi Randa**

➤ **Bouadi Yassmina**

➤ *Intitulé*

Proposition et conception d'une station de phytoépuration pour le traitement des eaux usées dans l'agglomération de Guemour, commune d'El Anasser : étude technique, environnementale et économique

Soutenu le : 29/06/2025

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. Karce Housem Eddine</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Rokbane Abdelmadjid</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Zorai ameur</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Herizi Toufik</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2024/2025

Dédicace

Avant toute chose, je rends grâce à Dieu, Le Tout-Puissant,
Pour Sa guidance, Sa miséricorde et la force qu'Il m'a accordée tout au long de ce parcours.
الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات.

À la mémoire de mon père, Belaidi Ramdane,
Que Dieu lui fasse miséricorde et lui accorde une place dans Son vaste paradis. Ton absence me pèse chaque jour, mais ton amour, tes valeurs et tes conseils continuent de me guider. Ce travail te rend hommage.
À ma mère, Oulefki Leila,
Mon repère, mon refuge, mon amour inconditionnel. Tes prières et ton amour silencieux ont illuminé mon chemin. Que Dieu te garde toujours à mes côtés.

À mes sœurs : Aïda, Yousra, Yasmine, Kaouther, Rania et Lamine,
Vous êtes les battements de mon cœur.
Un merci particulier à Aïda, ma grande sœur, mon roc, ma confidente, celle dont la force et la sagesse m'inspirent chaque jour.
À mon petit cœur : Lamine,

À mon neveu Mohamed Salah et ma nièce adorés Farah Riande. Vos rires innocents et vos regards pleins de vie sont une source de bonheur et de motivation. Vous donnez un sens doux à mes journées.

À mes amies : Malek, Kawther, Aya et Hayet,
Merci d'avoir été là, dans les moments de doute comme dans les instants de joie. Votre présence est un trésor que je chéris profondément.

À ma binôme, Bouadi Yassmina,
Ta patience, ton sérieux et ton soutien ont fait de ce parcours une aventure humaine inoubliable. Merci d'avoir marché à mes côtés avec cœur et bienveillance.

Dédicace

Avant toute chose, je rends grâce à Dieu Tout-Puissant, source de sagesse et de force, qui m'a accordé la santé, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Du fond du cœur, je dédie ce mémoire à toutes les personnes qui me sont chères :

À celui qui n'a jamais su exprimer ses émotions avec des mots, mais dont les gestes et les sacrifices parlaient pour lui. Celui qui est toujours présent lorsque j'ai besoin de lui.

Pardonne-moi pour toute la fatigue que je t'ai causée. Mon héros, mon père : Bouadi Abdelmalek.

À celle au cœur tendre et au sourire apaisant, celle qui m'a appris la patience et le pardon, celle qui a veillé sur nous avec amour et discrétion. Aucun mot ne saurait traduire toute ma reconnaissance. J'aimerais un jour pouvoir te rendre ne serait-ce qu'une partie de ce que tu m'as donné. Ma mère, mon amour : Abdi Safia.

À mon pilier de tous les jours, celle qui donne à ma vie ses plus belles couleurs : ma sœur Aya, et à la source de ma joie quotidienne : ma nièce Lulu.

À mes deux piliers, mes soutiens solides dans chaque étape de ma vie : mes frères Amine et yahya

À celle qui a été bien plus qu'une simple amie, une véritable sœur de cœur, qui a illuminé mes journées par sa présence, son rire et son soutien. Grâce à elle, j'ai compris le véritable sens de l'amitié sincère.

Ma sœur d'âme : Salik Sondes.

À mes amies fidèles et présentes en toutes circonstances : Aya et Hayet.

Et enfin, à ma précieuse binôme, avec qui j'ai partagé les efforts, les doutes, mais aussi les réussites : belaidi randa

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Allah, qui m'a donné l'ambition, la santé, le courage, la patience et la force nécessaire pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, le Dr. Rokbane Abdelmadjid, pour sa confiance, son encadrement rigoureux et ses précieux conseils scientifiques tout au long de ce travail. Son accompagnement a été déterminant dans l'aboutissement de cette recherche.

Je remercie également mon co-directeur de thèse, le Dr. Zorai Ameer, pour son soutien constant, sa disponibilité et ses orientations pertinentes tout au long de ce parcours.

Je remercie Dr Karce Housem Eddine d'avoir accepté de présider le jury, ainsi que Dr Herizi Toufik pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je tiens également à remercier la directrice du Laboratoire de Physique-Chimie de l'Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi (BBA) pour son accueil et les moyens mis à disposition.

Enfin, j'exprime toute ma reconnaissance à ma famille pour leur amour et leur soutien indéfectible, ainsi qu'à toutes les personnes qui m'ont accompagnée de près ou de loin dans cette aventure scientifique.

Un remerciement particulier à mes amies Malak, Kawther, Aya, Hayet et Sondes, pour leur amitié sincère, leur aide précieuse et leur soutien dans les moments les plus exigeants.

Résumé

Cette étude propose la mise en place d'une station de traitement des eaux usées par phytoépuration dans la région de Guemmour, en Algérie. La phytoépuration repose sur l'action synergique de la végétation, des substrats filtrants et des communautés microbiennes pour assurer l'épuration des eaux. La conception du système a été élaborée en fonction des caractéristiques physico-chimiques des effluents et de la configuration urbaine locale. Le rapport moyen DCO/DBO₅ obtenu ($1,67 < 3$) indique une bonne biodégradabilité des eaux usées, majoritairement d'origine domestique. Les temps de séjour hydrauliques calculés varient entre 2,5 et 4,5 jours selon les bassins. L'analyse des performances a démontré que le système à écoulement hybride présente la meilleure efficacité de traitement.

Mots-clés : Phytoépuration, Traitement des eaux usées, Station d'épuration.

الملخص

تقترح هذه الدراسة إنشاء محطة لمعالجة المياه العادمة باستخدام تقنية المعالجة النباتية في منطقة قemor، الجزائر. تعتمد المعالجة النباتية على التفاعل التكاملي بين النباتات، والركائز المرشحة، والمجتمعات الميكروبية من أجل تنقية المياه المستعملة. تم تصميم النظام وفقاً للخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه العادمة والمخطط العمراني المحلي. يشير متوسط نسبة ($1.67 < 3$) DCO/DBO₅ إلى قابلية جيدة للتحلل البيولوجي، مما يؤكد أن مصدر المياه العادمة هو في الغالب منزلي. تتراوح أزمدة الاحتجاز الهيدروليكي المحسوب ما بين 2.5 و4.5 أيام حسب الأحواض. أظهرت نتائج الأداء أن نظام التدفق الهجين هو الأكثر فعالية في المعالجة.

الكلمات المفتاحية : المعالجة النباتية، معالجة المياه المستعملة، محطة معالجة.

Abstract

This study proposes the implementation of a wastewater treatment plant using phytoremediation in the Guemmour region, Algeria. Phytoremediation is based on the synergistic action of vegetation, filtering substrates, and microbial communities to purify wastewater. The system was designed according to the physicochemical characteristics of the effluents and the local urban layout. The average COD/BOD₅ ratio obtained ($1.67 < 3$) indicates good biodegradability, confirming the predominantly domestic origin of the wastewater. The calculated hydraulic retention times vary between 2.5 and 4.5 days depending on the filtration basins. Performance analysis showed that the hybrid flow system provides the most effective treatment.

Keywords: constructed wetlands, Wastewater treatment, and Natural treatment plant.

Tables des matières

Dédicace	1
<i>Dédicace</i>	2
<i>Dédicace</i>	3
<i>Remerciements</i>	4
<i>Résumé</i>	5
Chapitre I : Procédés d'épurations des eaux usées	3
I.1.Introduction	4
I.2. Origine et pollution des eaux usées	4
I.2.4. Réutilisation des eaux usées traitées	10
I.2.5. Risques liés à la réutilisation des eaux usées	11
I.3. Différents systèmes d'épuration	12
I.3.1. Épuration physique	12
I.3.2. Épuration biologique.....	13
I.4. Conclusion	17
Chapitre II : Phytoépuration des eaux usées (Constructed Wetlands)	18
II.1. Introduction	19
II.2. Généralités sur la phytoépuration.....	20
II.3. Principales caractéristiques des zones humides artificielles	21
II.4. Performances de Traitement	30
II.5. Conclusion.....	32
Chapitre III : Matériel et méthodes	34
III.1. Situation géographique de la zone d'étude	35
Chapitre IV Résultats et interprétations	38
IV.1. Etude climatologique	39
IV.2. Synthèses climatiques	42
IV.2.1. Indices climatiques.....	42
IV.3.Conclusion	44
IV.4. Estimation de débit	45

IV.4.1. Nombre de population future(NF)	45
IV.4.2. Débit moyen journalier(Qm).....	45
IV.4.3. Débit d'équipement des eaux usées	45
IV.4.4. Débit total.....	46
III.2.5. Débit de pointe	46
III.3.2. Analyse physico chimique des eaux usée	47
III.3.3 Conclusion.....	49
III. 4. Dimensions de la zone humide artificielle	49
III.4.1 Introduction	49
III.4.3 Devis estimatif et quantitatif de la station de phytorépuration de configuration FH– FV–FH.....	59
Conclusion générale	61
Références Bibliographiques	63

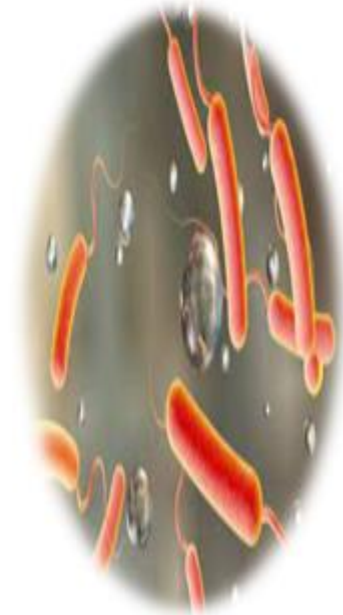
Liste des figures

Figure 1: Bassin à boues active (STEP BBA).....	14
Figure 2: Schéma simplifié d'une station de lagunage naturel (Degremont, 2005).....	15
Figure 3: Sélection et fourniture d'appareils d'éclairage primaire et de secours pour stations d'épuration de nouvelle génération. Lits bactériens (Donat Czapski, 2021).....	16
Figure 4: Unités de traitement par disques biologiques ; crédit photo : Patrick Savary (bernard CHOCAT, 2024).....	16
Figure 5; Zone humide artificielle à surface d'eau libre (FWS CW) pour le ruissellement des eaux pluviales dans le domaine de Woodcroft près de Sydney, NWS, Australie (Vymazal, 2010).....	22
Figure 6: Un système d'épuration des eaux usées pour le traitement des eaux de drainage minières alcalines à Monastère Run, Pennsylvanie, États-Unis (Vymazal, 2010).....	23
Figure 7: Un système de traitement tertiaire des eaux usées municipales à McGrath Hill, Hawkesbury, près de Sydney, Nouvelle-Galles du Sud, Australie (Vymazal, 2010).....	23
Figure 8 : Filtre planté à écoulement horizontal (Rokbane, 2023).....	26
Figure 9: HF CWs à Staverton, Royaume-Uni. Traitement tertiaire pour 603 EH (Vymazal, 2010).....	26
Figure 10: Filtre planté à écoulement Vertical (Rokbane, 2023).....	27
Figure 11: Distribution des eaux usées dans les stations d'épuration à flux vertical (VF) à Bexhill, Nouvelle-Galles du Sud, Australie.....	28
Figure 12: Configuration de système hybride FV-FH.....	29
Figure 13: Configuration de système hybride FH-FV.....	30
Figure 14 : Localisation du point de prélèvement d'eau à Guemmour.....	35
Figure 15: Échantillons d'eau brute prélevés pour analyse en laboratoire.....	36
Figure 16: Appareillages utilisés pour l'analyse physico-chimique des eaux usées.....	37
Figure 17 : Instruments de mesure météorologique au niveau de station de boumerged.....	39
Figure 18: Graphe de température moyenne, minimale et maximale.....	41
Figure 19 : Diagramme bioclimatique d'Emberger.....	43
Figure 20: Diagramme ombrothermique de Bagnous et Gaussen de Guemmour.....	44
Figure 21 : (a) Variation de la température, et (b) Variation du pH.....	47
Figure 22: Variation de la conductivité électrique.....	48
Figure 23: Variation de la DCO (a), et Variation de la DBO5 (a), pour différentes analyses comparées aux normes de rejet.....	49
Figure 24: Regard de répartition.....	52
Figure 25: Photos représentant le filtre de finition, composé d'un porte filtre et une éponge, avant et après utilisation (Rokbane, 2023).....	52
Figure 26: PROPOSITION D'UN SYSTEME DE PHYTOEUPURATION HORIZONTAL.....	54
Figure 27: PROPOSITION D'UN SYSTEME DE PHYTOEUPURATION verticale.....	55
Figure 28: PROPOSITION D'UN SYSTEME DE PHYTOEUPURATION FV-FH.....	56
Figure 29: PROPOSITION D'UN SYSTEME DE PHYTOEUPURATION FH-FV.....	57
Figure 30: PROPOSITION D'UN SYSTEME DE PHYTOEUPURATION FH-FV-FH.....	58

Liste des tableaux

Tableau 1. Rapport entre la conductivité et la minéralisation (Diallo, 1996).	8
Tableau 2: Méthodes d'analyses physico-chimiques.	37
Tableau 3. Pluviométries moyennes mensuelles (Source ONM).....	40
Tableau 4. Températures extrêmes et moyennes mensuelles (Source ONM).....	40
Tableau 5. Vitesses maximales mensuelles des vents (10ans) (Source ONM).....	41
Tableau 6: Humidités relatives moyennes mensuelles (10ans) (Source ONM).....	42
Tableau 7. Les limites de climat d'après l'indice de Martonne.	43
Tableau 8. Analyse physico chimiques des eaux usées de la ville Guemmour.....	47
Tableau 9: Valeurs des paramètres K20 et θ , selon REFERENCES.	53
Tableau 10: Devis estimatif et quantitatif de la station de phytorépuration de configuration FH– FV–FH.....	59

Introduction générale



Introduction Générale

Introduction générale

La gestion durable de l'eau représente un défi important, notamment dans les régions arides et semi-arides comme la localité de Guemmour, où les ressources hydriques sont naturellement limitées. Face à la pression croissante exercée sur ces ressources, le traitement et la réutilisation des eaux usées apparaissent comme des solutions stratégiques pour répondre aux besoins en eau tout en préservant les écosystèmes naturels.

Dans ce contexte, ce mémoire s'intéresse à une méthode de traitement écologique, économique et durable : la phytoépuration. Il vise à démontrer la faisabilité de cette technique dans un cadre réel, à travers l'étude de cas de la localité de Guemmour, où nous avons effectué les analyses et sur laquelle porte la proposition de station de traitement.

Le premier chapitre présente les principaux procédés d'épuration des eaux usées, en abordant leurs origines, les sources de pollution, les risques liés à leur mauvaise gestion, ainsi que les différentes techniques de traitement, tant physiques que biologiques. Ce chapitre permet de situer la phytoépuration dans le contexte global des systèmes de traitement existants.

Le deuxième chapitre est dédié à la phytoépuration, également appelée "zones humides artificielles" (Constructed Wetlands). Nous y décrivons les principes de fonctionnement de cette technique, les différents types de configurations (horizontal, vertical, hybride), ainsi que les performances de traitement observées dans la littérature. La phytoépuration repose sur l'action conjointe des plantes, du substrat et des micro-organismes pour épurer naturellement les eaux usées.

Le troisième chapitre est une application concrète à la localité de Guemmour. Il commence par une étude climatologique de la région, indispensable pour adapter le système aux conditions environnementales locales. Nous y avons réalisé une analyse de la qualité des eaux usées à partir d'échantillons prélevés directement à Guemmour, afin d'évaluer les charges polluantes à traiter. Ensuite, nous avons estimé les débits d'eaux usées à partir des données démographiques et des habitudes de consommation. Sur cette base, nous avons proposé le dimensionnement d'une station de phytoépuration, selon une configuration hybride FH-FV-FH (filtration horizontale – filtration verticale – filtration horizontale), accompagnée d'un devis estimatif et quantitatif.

Introduction Générale

L'objectif principal de ce mémoire est de démontrer la pertinence de la phytoépuration comme solution de traitement des eaux usées dans des zones rurales comme Guemmour, où la densité de population est modérée et les moyens techniques sont souvent limités. Il vise également à fournir une démarche applicable à d'autres localités similaires, en tenant compte des spécificités locales.

Chapitre I : Procédés d'épurations des eaux usées



I.1.Introduction

L'accès durable aux ressources en eau est aujourd'hui une problématique majeure dans le monde entier, en particulier dans les zones arides et semi-arides où l'eau est devenue un enjeu incontournable. La préservation de la qualité de l'eau est un impératif pour toute la société. L'Algérie, classée parmi les pays pauvres en ressources hydriques, est confrontée à une pression croissante sur ses ressources, alimentée par des facteurs tels que les changements climatiques, la demande croissante de la population, l'absence d'infrastructures pour la gestion des ressources et la pollution des eaux souterraines et superficielles. Cette pollution est causée par les rejets d'eaux usées domestiques et industrielles ainsi que l'utilisation excessive d'engrais et de pesticides en agriculture.

Les traitements des eaux usées visent à réduire la quantité de polluants présents dans les eaux afin de respecter les normes de rejet dans l'environnement ou permettre la réutilisation de ces eaux. Bien que des techniques coûteuses existent pour l'épuration des eaux non conventionnelles, il existe aujourd'hui un besoin urgent de solutions économiques qui préservent les écosystèmes. La phytoépuration, une méthode simple et naturelle, se distingue comme une solution efficace.

I.2. Origine et pollution des eaux usées

I.2.1. Définition

D'après Ramade [1], les eaux usées désignent les eaux qui ont été utilisées à des fins domestiques, industrielles ou agricoles, et qui deviennent des effluents pollués une fois rejetées dans un réseau d'égouts.

Les eaux usées comprennent les eaux domestiques (divisées en eaux vannes et eaux ménagères), les eaux de ruissellement ou pluviales, ainsi que les effluents provenant des industries.

I.2.2. Origine des eaux usées

Selon Rodier et al. [2], les eaux usées d'origine urbaine se composent principalement des eaux ménagères (utilisées pour le lavage corporel, du linge, des locaux et en cuisine) ainsi que des eaux de vannes contenant des fèces et des urines. Ces effluents sont souvent dilués par les eaux de lavage des voiries et les eaux pluviales, et, selon les circonstances, peuvent être complétés par des eaux provenant d'activités industrielles et agricoles. L'auteur précise que l'eau ainsi collectée dans un réseau d'égouts se présente généralement sous la forme d'un liquide trouble, souvent grisâtre,

qui contient des matières en suspension d'origine minérale et organique, à des concentrations très variables. En plus des eaux pluviales, les eaux résiduaires urbaines proviennent principalement de sources domestiques, mais peuvent également inclure des effluents industriels très diversifiés. Ainsi, les eaux résiduaires urbaines (ERU) se composent de :

- Eaux résiduaires ou eaux usées d'origine domestique, industrielle et/ou agricole
- Eaux pluviales ou de ruissellement urbain.

Il en découle que les eaux usées peuvent être réparties en quatre grandes catégories :

I.2.2.1. Eaux usées industrielles

Les caractéristiques des eaux usées industrielles varient en fonction de l'industrie d'origine. En plus des matières organiques azotées ou phosphorées, elles peuvent contenir des produits toxiques, des solvants, des métaux lourds, des micropolluants organiques, ainsi que des hydrocarbures. Selon Metahri [3], les eaux usées peuvent contenir, selon leur origine industrielle : Des graisses (provenant des industries agroalimentaires, de l'équarrissage) ;

- Des hydrocarbures (provenant des raffineries) ;
- Des métaux (provenant des traitements de surface, de la métallurgie) ;
- Des acides, des bases et divers produits chimiques (provenant des industries chimiques, des tanneries) ;
- De l'eau chaude (provenant des circuits de refroidissement des centrales thermiques) ;
- Des matières radioactives (provenant des centrales nucléaires et du traitement des déchets radioactifs).

I.2.2.2. Eaux usées domestiques

Les eaux usées domestiques sont principalement chargées de pollution organique et se divisent en deux catégories :

- **Eaux ménagères ou grises** : Elles proviennent des salles de bains et des cuisines et contiennent généralement des détergents, des graisses, des solvants et des débris organiques.
- **Eaux vannes** : Elles sont issues des toilettes et sont caractérisées par une forte concentration de matières organiques azotées, de germes fécaux et pathogènes.

Selon Duncan [4], les eaux usées domestiques sont principalement composées de matières en suspension (MES). Les MES sont des matières non dissoutes présentes dans l'eau, allant des grosses particules aux particules les plus fines, insolubles et de nature organique ou minérale. Le rejet direct de ces matières dans le milieu aquatique peut entraîner le développement de conditions anaérobies ou de dépôts boueux, ce qui réduit la concentration d'oxygène dissous et provoque des modifications dans la composition des peuplements benthiques.

Matière Organique Biodégradable (MOB): Elle est composée principalement de protéines, de Carbohydrates et de graisses, qui peuvent mener également à une diminution de l'oxygène dissous et au développement de populations bactériennes au sein de l'écosystème receveur.

- Nutriments (N, P, C) : sous forme organique ou minérale, ils peuvent être utilisés par les organismes vivants pour se développer et croître, en trop grande quantité, ils stimulent la prolifération algale et peuvent conduire à des phénomènes d'eutrophisation du milieu.
- Organismes pathogènes : Bactéries et virus peuvent conduire à des maladies transmissibles par simple contact avec les eaux usées.
- Matière réfractaire : il s'agit des surfactants, des phénols et des pesticides. Ils résistent aux méthodes conventionnelles d'assainissement des eaux.
- Matière inorganique dissoute : les éléments tels que le calcium, le sodium et les sulfates sont souvent présents dans les eaux usées.

I.2.2.3. Les eaux pluviales

Les eaux pluviales proviennent du ruissellement généré par les toitures, les terrasses, les parkings et les voies de circulation, et sont destinées à être rejetées dans le milieu naturel.

I.2.2.4. Les effluents agricoles

L'agriculture constitue une source importante de pollution des eaux, car elle contribue à l'apport d'engrais et de pesticides, et est responsable des pollutions diffuses. Les eaux agricoles, provenant des terres cultivées, sont souvent chargées d'engrais nitrates et phosphates, sous forme ionique ou en quantités suffisamment élevées pour que ces éléments ne soient pas totalement retenus par le sol, et se retrouvent ainsi dans les nappes phréatiques superficielles ainsi que dans les eaux des cours d'eau ou des réservoirs.

I.2.3. Les caractéristiques des eaux usées

La composition des eaux usées varie considérablement selon leur origine (industrielle, domestique, etc.). Elles peuvent contenir une multitude de substances, qu'elles soient sous forme solide ou dissoute, chimiques, biologiques ou encore des micro-organismes. Cette composition dépend des caractéristiques physiques et biologiques des eaux, ainsi que du risque sanitaire qu'elles peuvent représenter.

I.2.3.1. Paramètres physico-chimiques

a) Température

La température joue un rôle crucial dans la solubilité des sels, particulièrement des gaz, ainsi que dans la dissociation des sels dissous, ce qui influence la conductivité électrique et le pH. Elle permet également d'identifier l'origine de l'eau.

Une élévation de la température favorise l'autoépuration des eaux et accélère la vitesse de sédimentation, ce qui peut être bénéfique dans le cadre des stations d'épuration [5].

b) Potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH mesure le caractère acide ($1 < \text{pH} < 7$) ou basique ($7 < \text{pH} < 14$) des eaux usées. L'activité biologique optimale se situe entre 6,5 et 8,5 unités de PH. Le pH joue un rôle clé dans l'épuration des effluents et le développement des bactéries. Par exemple, la nitrification se fait de manière optimale uniquement lorsque le pH est compris entre 7,5 et 9.

c) Conductivité électrique (CE)

La conductivité désigne la capacité d'une eau à permettre le passage d'un courant électrique, et elle fournit une indication sur la teneur en sels dissous (salinité de l'eau). Elle est exprimée en microsiemens par centimètre. La mesure de la conductivité permet d'évaluer la minéralisation globale de l'eau. Le tableau (01) montre la relation entre le degré de minéralisation et la conductivité, conformément à la réglementation française.

Tableau 1. Rapport entre la conductivité et la minéralisation (Diallo, 1996).

Conductivité	Minéralisation
0-100 $\mu\text{S/cm}$	Minéralisation très faible
100-200 $\mu\text{S/cm}$	Minéralisation faible
200-333 $\mu\text{S/cm}$	Minéralisation moyenne accentuée
333-666 $\mu\text{S/cm}$	Minéralisation accentuée
666-1000 $\mu\text{S/cm}$	Minéralisation élevée

d) Matières en suspension (MES)

Les matières en suspension (MES) correspondent à la quantité de pollution organique et minérale non dissoute dans l'eau. Elles sont responsables de l'ensablement des milieux aquatiques et réduisent la pénétration de la lumière dans l'eau, ce qui entraîne une baisse de l'activité photosynthétique et une diminution de la productivité du phytoplancton. Les MES peuvent être exprimées par la relation suivante : $MES = 30 \% MMS + 70 \% MVS$ [6].

- **Matières minérales (MMS)** : Elles résultent de l'évaporation totale de l'eau, c'est-à-dire de son extrait sec. Elles sont composées à la fois de matières en suspension et de substances solubles telles que les chlorures, les phosphates, etc.
- **Matières volatiles en suspension (MVS)** : Elles représentent environ 70 % des MES. Constituées principalement de la fraction organique des MES, elles sont mesurées par calcination.

e) Demande biochimique en oxygène (DBO₅)

Selon Rejsek [7] , la demande biochimique en oxygène après 5 jours (DBO₅) d'un échantillon est la quantité d'oxygène consommée par les microorganismes aérobies présents dans cet échantillon pour l'oxydation biochimique des composés organiques et/ou inorganiques.

En pratique, la DBO₅ permet d'évaluer la charge en substances putrescibles du milieu, son pouvoir auto-épurateur et d'en déduire la charge maximale acceptable, en particulier lors des traitements primaires dans les stations d'épuration.

f) Demande chimique en oxygène (DCO)

La DCO représente la quantité d'oxygène nécessaire pour l'oxydation des matières organiques, qu'elles soient biodégradables ou non. Elle est mesurée par la quantité d'oxygène fournie par le bichromate de potassium, nécessaire à l'oxydation des substances organiques telles que les protéines, les glucides et les lipides présents dans les eaux résiduaires. En d'autres termes, la DCO est l'indicateur de la demande chimique en oxygène, mesurée en g/l, qui représente la quantité totale d'oxygène nécessaire pour oxyder, en présence de permanganate, les substances contenues dans l'eau, y compris les éléments chimiques. Elle est exprimée en mg O₂/l.

Le rapport DCO/DBO permet d'évaluer le coefficient de biodégradabilité d'un effluent et peut également être utilisé pour en définir l'origine.

g) Azote

Selon Chellé et al [8]. L'azote se trouve dans les eaux usées sous forme organique ou ammoniacale dissoute. Il est fréquemment oxydé pour éviter la consommation excessive d'oxygène (O₂) dans l'environnement et pour prévenir le risque de toxicité lié à l'ammoniaque gazeuse dissoute (NH₃), qui est en équilibre avec l'ion ammonium (NH₄⁺). La nitrification est le processus chimique de transformation de l'azote organique, effectué par des bactéries, et se déroule en plusieurs étapes :

- **N organique à NH₄⁺ :** Ammonification
- **NH₄⁺ à NO₂⁻ :** Nitratation par les bactéries **Nitrosomonas**
- **NO₂⁻ à NO₃⁻ :** Nitratation par les bactéries **Nitrobacter**.

h) Phosphore

Le phosphore dans les eaux usées peut se présenter sous forme de sels minéraux tels que les ortho phosphates et polyphosphates, mais également sous forme de composés organiques. Ces différents composés peuvent être soit solubilisés, soit adsorbés sur les matières en suspension. L'hydrolyse acide permet de libérer le phosphore hydrolysable, distinguant ainsi le phosphore

organique. En fonction des cas, la teneur en phosphore peut être exprimée en mg/l de PO_4 ou de P_2O_5 , avec les équivalences suivantes : 1 mg/l de $\text{PO}_4 = 0,747$ mg/l de $\text{P}_2\text{O}_5 = 0,326$ mg/l de P.

i) Biodégradabilité

La biodégradabilité désigne 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 généralement exprimée par le rapport DCO/DBO₅. Ce rapport se situe habituellement entre 1,5 et 2,5. Dans le cas des effluents industriels, qui peuvent contenir une proportion significative de composés non biodégradables, l'aptitude à la biodégradation peut être évaluée à l'aide du rapport DCO/DBO₅. En fonction de ce rapport, les effluents sont classés comme suit :

- **DCO/ DBO₅** < 3 : effluent facilement biodégradable
- **3 < DCO/ DBO₅** < 5 : effluent moyennement biodégradable
- **DCO/ DBO₅** > 5 : effluent difficilement biodégradable, voire non biodégradable

Cet indice de biodégradabilité est également précieux pour suivre l'efficacité des traitements biologiques. Plus le rapport DCO/DBO₅ est élevé, moins l'effluent est biodégradable, ce qui indique que le traitement biologique devra être plus approfondi pour être efficace.

I.2.4. Réutilisation des eaux usées traitées

La réutilisation des eaux usées traitées dans l'agriculture, l'industrie et les usages domestiques représente respectivement 70%, 20% et 10% de la demande en eau dans le monde. Cette technique d'irrigation est principalement adoptée dans les pays à forte activité agricole mais aux ressources en eau limitées, tels que le bassin méditerranéen et le Sud des États-Unis.

Au cours des dernières années, la réutilisation des eaux usées a connu une expansion rapide, avec une augmentation des volumes réutilisés allant de 10 à 29 % par an en Europe, aux États-Unis et en Chine, et jusqu'à 41 % en Australie. Le volume quotidien des eaux réutilisées atteint désormais des chiffres impressionnants, variant entre 1,5 et 1,7 millions de m³ par jour dans plusieurs pays, tels que la Californie, la Floride, le Mexique et la Chine [9] .

En Algérie, un pays semi-aride ayant fait face à des sécheresses récurrentes, la réutilisation des eaux usées a pris une importance croissante. La stratégie nationale de développement durable du pays se concrétise notamment à travers un plan stratégique intégrant des dimensions sociales, économiques et environnementales. L'Algérie dispose actuellement de 134 stations d'épuration (STEP et lagunes) en activité, avec une capacité installée estimée à 12 millions d'équivalents habitants (EQH), soit environ 800 hm³ par an. Dans ce contexte, la réutilisation des eaux usées traitées, en particulier à des fins agricoles, est devenue un axe central de la stratégie nationale en matière de gestion des ressources en eau.

I.2.5. Risques liés à la réutilisation des eaux usées

Les risques associés à la réutilisation des eaux usées en agriculture sont variés, couvrant des aspects microbiologiques, chimiques et environnementaux. La principale préoccupation est la transmission potentielle de maladies infectieuses, en particulier celles causées par des pathogènes entériques. Ces derniers peuvent être présents dans les eaux usées brutes, même après traitement.

Selon Devaux [10], plusieurs études ont abordé les risques liés à la consommation de végétaux irrigués avec des eaux usées brutes. Des infections parasitaires dues à des vers tels que les ascaris et les trichocéphales, ainsi que des infections bactériennes, ont été observées chez les consommateurs de produits contaminés. Le risque de contamination est considérablement plus élevé avec l'utilisation d'eaux usées brutes comparé à l'utilisation d'eaux usées traitées.

Cauchi [11] a identifié les différentes populations humaines exposées à des risques de maladies associées à l'utilisation des effluents bruts ou traités en agriculture. Le risque pour les consommateurs de légumes crus est plus élevé en ce qui concerne les helminthes et moins important pour les bactéries. Plusieurs études ont examiné le risque sanitaire pour le personnel, concluant que ce risque n'est pas plus élevé que pour le personnel travaillant dans les stations d'épuration.

Cependant, pour les travailleurs agricoles, le risque est plus élevé en ce qui concerne les helminthes. Bien que des études en laboratoire aient montré que l'exposition aux entérovirus était plus importante, aucune augmentation significative de cas cliniques n'a été observée sur le terrain. Devaux [10] mentionne six études qui indiquent que les travailleurs agricoles sont légèrement plus exposés que la population générale ou que les employés des stations d'épuration et les égoutiers.

De plus, il semble que les nouveaux travailleurs soient plus vulnérables que les anciens, ce qui suggère une adaptation immunitaire aux bactéries et aux virus au fil du temps.

I.3. Différents systèmes d'épuration

L'épuration des eaux usées est un processus essentiel pour protéger l'environnement et la santé publique. Ce processus peut être divisé en plusieurs étapes et méthodes, dont l'épuration physique est une composante fondamentale.

I.3.1. Épuration physique

L'épuration physique se réfère à l'élimination des matières en suspension dans les eaux usées. Cela inclut des techniques comme la filtration et la décantation, qui permettent de récupérer les particules solides et les fines de caillé présentes dans l'eau.

I.3.1.1. Dégrillage

Le dégrillage consiste à retenir les déchets solides présents dans l'effluent avant son traitement, en le faisant passer à travers des grilles dont les espaces sont ajustés à quelques centimètres. Cette étape permet de protéger les équipements en aval des stations d'épuration. Selon Stoddard et al [12], l'efficacité de cette opération dépend de l'écartement des barreaux des grilles. Ils distinguent plusieurs types de dégrillage :

- **Dégrillage fin** : avec un écartement de 3 à 10 mm
- **Dégrillage moyen** : avec un écartement de 10 à 25 mm
- **Pré-dégrillage** : avec un écartement de 30 à 100 mm

I.3.1.2. Dessablage

Le dessablage vise à éliminer les particules minérales dont le diamètre dépasse 0,2 mm et dont la masse spécifique est d'environ 2,65 g/cm³. Il est essentiel de les séparer en amont de la station d'épuration afin de

- Prévenir les dépôts dans les canaux et conduites
- Protéger les pompes et autres équipements contre l'usure et la corrosion.

I.3.1.3. Dégraissage et déshuilage

Le dégraissage et le déshuilage sont des opérations visant à éliminer les graisses, huiles et autres substances moins denses que l'eau présentes dans les eaux résiduaires, en provenance de stations-service, abattoirs, industries alimentaires, etc. Le déshuilage est un procédé de séparation liquide-liquide, tandis que le dégraissage est une opération de séparation solide-liquide, à condition que la température de l'eau soit suffisamment basse pour permettre la solidification des graisses. Ces deux procédés sont essentiels pour éliminer les corps gras des eaux usées, car leur présence pourrait nuire à l'efficacité du traitement biologique qui suit.

I.3.1.4. Décantation

Les procédés de traitement primaire sont principalement physiques, comme la décantation, parfois complétée par des méthodes physico-chimiques, et génèrent des boues primaires. La décantation primaire permet d'éliminer entre 40 à 60% des matières en suspension (MES) pour une vitesse ascensionnelle de 1,2 m/h. Ce procédé permet également de réduire de 10 à 30% des virus, de 50 à 90% des helminthes et de moins de 50% des kystes de protozoaires. Selon la FAO [13], la décantation primaire permet d'éliminer environ 25 à 50% de la demande biologique en oxygène (**DBO₅**), 50 à 70% des solides en suspension (SS) et 65% des graisses et huiles.

I.3.2. Épuration biologique

L'épuration biologique repose sur les mêmes mécanismes que ceux observés dans l'autoépuration naturelle des cours d'eau (rivières, lacs, réservoirs, mer), où les micro-organismes aquatiques jouent un rôle clé. Ce type de traitement est principalement utilisé pour le traitement secondaire des eaux usées urbaines et industrielles, visant à éliminer les composés carbonés solubles tels que les glucides, lipides et protéines.

Les micro-organismes présents dans l'effluent assimilent la matière organique comme substrat pour leur croissance, formant ainsi la boue biologique. Bien que le traitement biologique soit économique et avantageux, il reste inefficace face aux fractions non biodégradables, aux phosphates et aux éléments toxiques, tout en ayant un impact limité sur les matières en suspension (MES). Par conséquent, il est parfois nécessaire de compléter ce traitement par un procédé physico-chimique ou d'ajouter un traitement tertiaire.

Il existe plusieurs procédés de traitement biologique, tels que les procédés à culture en suspension (boues activées, lagunage) et les procédés à culture fixée (disques biologiques rotatifs, lits bactériens, etc.)

I.3.2.1. Procédés de traitement biologique à cultures libres

a) Procédé des boues activées

Le procédé des boues activées consiste à mélanger et agiter des eaux usées brutes avec des boues activées liquides, qui sont bactériologiquement très actives. La dégradation aérobie de la pollution se fait par un mélange intime des micro-organismes épurateurs et de l'effluent à traiter. Une fois ce processus terminé, les phases d' « eaux épurées » et de « boues épuratrices » sont ensuite séparées.



FIGURE 1: BASSIN A BOUES ACTIVE (STEP BBA)

b) Lagunage

➤ Lagunage naturel

Le lagunage naturel est un procédé d'épuration qui porte plusieurs appellations, telles que "oxydation pond", "sewage oxydation pond", "sewage Lagoons", "Waste Stabilization ponds", "étang de maturation" ou "étang de stabilisation" [14].

Ce système, également appelé lagunage aéré, consiste en une série de bassins peu profonds (souvent trois) dans lesquels les eaux usées, qu'elles aient été décantées ou non au préalable, s'écoulent lentement et en ressortent « épurées ». Le procédé repose sur la dégradation de la matière

organique par les organismes naturellement présents dans les eaux usées, tels que les bactéries aérobies et anaérobies, ainsi que par les algues microscopiques.

Le premier bassin est généralement une lagune où se déroule la dégradation de la pollution organique par les bactéries présentes. L'oxygénation naturelle de l'eau est assurée par les échanges gazeux entre l'eau et l'atmosphère ainsi que par la photosynthèse des algues. Le deuxième bassin permet la décantation des boues biologiques, tandis que l'eau est envoyée vers le troisième bassin pour affiner sa qualité. Dans ce dernier, des macrophytes contribuent à la réduction des concentrations en azote et en phosphore.

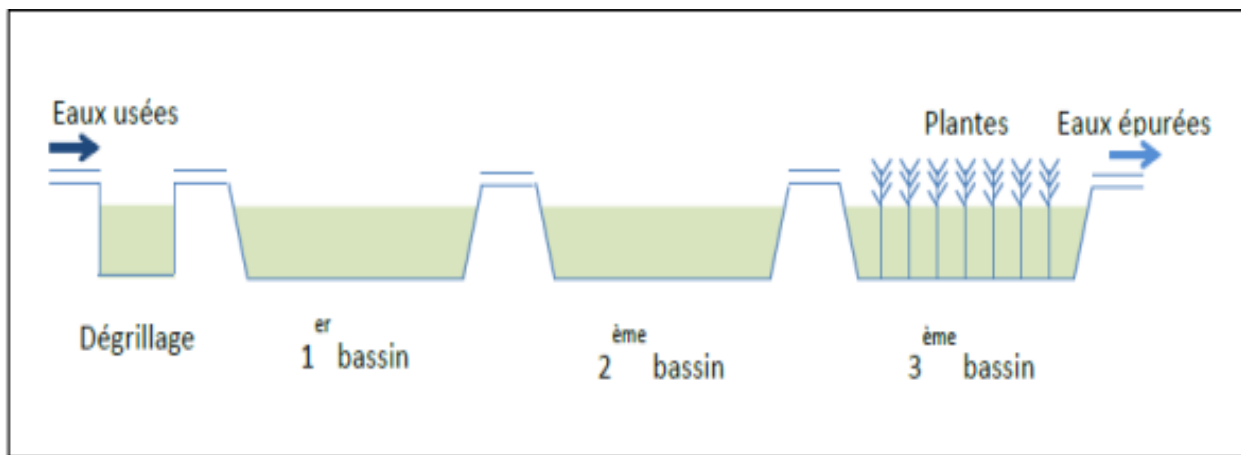


FIGURE 2: SCHEMA SIMPLIFIE D'UNE STATION DE LAGUNAGE NATUREL (DEGREMONT, 2005).

I.3.2.2. Procédés de traitement biologique à cultures fixées

a) Lits bactériens

L'épuration sur *lit bactérien* est l'un des procédés biologiques les plus anciens. Dans ce système, des bactéries se développent sur un substrat neutre tel que de la pierre concassée, de la pouzzolane (sable volcanique), du mâche fer ou du plastique. L'effluent est passé sur ce substrat, et la principale difficulté réside dans le contrôle de la vitesse du flux d'eau, qui ne doit pas être trop rapide (pour permettre la dégradation bactérienne) ni trop lente (afin d'assurer une bonne évacuation des matières en suspension excédentaires).



FIGURE 3: SELECTION ET FOURNITURE D'APPAREILS D'ECLAIRAGE PRIMAIRE ET DE SECOURS POUR STATIONS D'EPURATION DE NOUVELLE GENERATION. LITS BACTERIENS (DONAT CZAPSKI ,2021).

b) Disques biologiques

Le procédé des bio-disques est un traitement biologique à cultures fixées. Le réacteur est constitué de plusieurs disques fins en polypropylène ou PVC, montés sur un axe horizontal entraîné à faible vitesse (1 à 2 tours par minute) par un moteur électrique. Ces disques, espacés de 2 à 3 cm, sont colonisés par les micro-organismes responsables de la dégradation de la pollution, formant un biofilm qui peut atteindre une épaisseur de 5 mm. Ce procédé est particulièrement efficace pour éliminer la pollution carbonée et les matières en suspension (MES).



FIGURE 4: UNITES DE TRAITEMENT PAR DISQUES BIOLOGIQUES ; CREDIT PHOTO : PATRICK SAVARY (BERNARD CHOCAT, 2024).

1.4. Conclusion

Le traitement des eaux usées est un processus essentiel pour la protection de l'environnement et de la santé publique. Il permet d'éliminer les polluants présents dans les eaux usées, réduisant ainsi le risque de contamination des eaux et de propagation de maladies. De plus, il contribue à la gestion durable de l'eau et à la préservation des écosystèmes.

Plus précisément, le traitement des eaux usées permet :

- **D'éviter la pollution des cours d'eau :**

En éliminant les polluants, les eaux usées traitées ne contaminent pas les rivières, les lacs et les mers.

- **De réduire la propagation des maladies :**

Le traitement élimine les bactéries, les virus et les parasites présents dans les eaux usées, réduisant ainsi le risque de contamination et de maladies d'origine hydrique.

- **De préserver les écosystèmes aquatiques :**

Les eaux usées traitées sont moins polluantes et ont moins d'impact sur les organismes vivants présents dans les cours d'eau, contribuant ainsi à la préservation de la biodiversité.

- **De favoriser une gestion durable de l'eau :**

Les eaux usées traitées peuvent être réutilisées dans certains cas, comme l'irrigation agricole ou le ravitaillement des lacs, ce qui permet de limiter l'utilisation de l'eau douce.

Le traitement des eaux usées est un processus complexe qui se déroule généralement en plusieurs étapes, notamment le dégrillage, le dessablage, le traitement biologique, la clarification et la filtration. Chaque étape est conçue pour éliminer un type spécifique de polluant, assurant ainsi une purification efficace des eaux usées.

En résumé, le traitement des eaux usées est un enjeu majeur pour la santé publique et l'environnement, et il est essentiel de continuer à investir dans les technologies et les infrastructures nécessaires pour assurer un traitement efficace et durable des eaux usées.

Chapitre II : Phytoépuration des eaux usées (Constructed Wetlands)



Chapitre II : Phytoépuration des eaux usées (Constructed Wetlands)

II.1. Introduction

Les zones humides artificielles (CWs) sont des systèmes conçus et créés pour exploiter les processus naturels impliquant la végétation des zones humides, les sols et les communautés microbiens associés, dans le but de traiter les eaux usées. Ces systèmes sont élaborés pour reproduire de manière contrôlée les mécanismes qui se produisent dans les zones humides naturelles. Les CWs utilisées pour le traitement des eaux usées peuvent être classées en fonction du type de macrophyte dominant, telles que les zones humides à macrophytes flottants, à feuilles flottantes, à racines émergentes ou submergées. Une classification supplémentaire peut être envisagée selon l'hydrologie des zones humides (systèmes de surface d'eau libre et souterrains), avec des CWs pouvant être différenciées par la direction de l'écoulement (horizontale ou verticale).

Les premières expériences concernant le traitement des eaux usées à l'aide de zones humides artificielles ont été réalisées par Käthe Seidel en Allemagne au début des années 1950, à l'Institut Max Planck de Plön [15]. Seidel a mené de nombreuses recherches sur l'utilisation des zones humides artificielles pour traiter différents types d'eaux usées, telles que les eaux usées phénoliques, les eaux usées laitières, et les eaux usées issues de l'élevage. La majorité de ses études ont été menées dans des zones humides artificielles utilisant des systèmes à écoulement souterrain horizontal (HFCW) ou vertical (VFCW). Toutefois, la première zone humide entièrement construite, avec une surface d'eau libre (FWS), a été établie aux Pays-Bas en 1967. Cependant, les systèmes FWS n'ont pas connu une large diffusion en Europe, où les zones humides artificielles à écoulement souterrain dominaient dans les années 1980 et 1990.

En Amérique du Nord, le traitement des eaux usées par écoulement souterrain a commencé avec l'ingénierie écologique des zones humides naturelles à la fin des années 1960 et au début des années 1970. Cette technologie de traitement a été adoptée en Amérique du Nord non seulement pour les eaux usées municipales, mais également pour tous les types d'eaux usées. La technologie d'écoulement souterrain s'est répandue plus lentement en Amérique du Nord, mais aujourd'hui, des milliers de systèmes de ce type sont en fonctionnement.

Afin d'améliorer l'efficacité du traitement, en particulier pour l'élimination de l'azote, il est possible de combiner différents types de zones humides artificielles. Les systèmes hybrides regroupent le plus souvent des systèmes VF et HF disposés en séquence. En général, tous les types

Chapitre II : Phytoépuration des eaux usées (Constructed Wetlands)

de zones humides artificielles peuvent être combinés pour offrir un traitement plus complexe et plus efficace.

II.2. Généralités sur la phytoépuration

Il existe plusieurs techniques coûteuses pour l'épuration des eaux non conventionnelles. Toutefois, il existe également des méthodes simples, économiquement compétitives et qui préservent les caractéristiques des écosystèmes, comme la phytoépuration pour le traitement des eaux usées.

La phytoépuration est un procédé qui vise à purifier l'eau en éliminant les polluants grâce à des processus naturels, qu'ils soient biotiques ou abiotiques, orchestrés par les plantes, les microorganismes de la rhizosphère et le substrat dans lequel ils évoluent. Une grande variété de plantes aquatiques – flottantes, émergentes ou submergées – appelées macrophytes, peuvent être utilisées dans ce processus, en jouant à la fois des rôles directs et indirects.

Les plans d'eau peuvent être colonisés par des végétaux appartenant à deux grandes catégories : les plantes amphibies et les plantes aquatiques, qui se répartissent en ceintures concentriques, du rivage vers la pleine eau :

- **Plantes amphibies (hélophytes)** : Ce groupe comprend des plantes qui émergent de l'eau et qui supportent des alternances d'immersion et d'émersion annuelles, telles que le Phragmite, les massettes, et les laïches. Elles constituent généralement les ceintures externes des systèmes aquatiques.
- **Plantes aquatiques (hydrophytes)** : Elles se divisent en plusieurs types biologiques, répartis en ceintures internes et superposées en strates dans l'eau :
 - Des espèces flottantes, librement à la surface (ex. : Lentille d'eau, Petit nénuphar) ou sous la surface (ex. : Utriculaire, algues filamenteuses) ;
 - Des espèces enracinées et se développant à la surface (ex. : Nénuphar blanc ou Potamot) ;
 - Des espèces fixées au fond et restant immergées (ex. : Élodée du Canada, Naïade, algues characées).

Les macrophytes puisent des nutriments (principalement de l'azote et du phosphore) du milieu aquatique, contribuant ainsi à l'élimination des nutriments disponibles et favorisant l'autoépuration des milieux aquatiques. Avec le développement de la population humaine, les

Chapitre II : Phytoépuration des eaux usées (Constructed Wetlands)

milieux aquatiques ont été de plus en plus utilisés comme réservoirs pour les effluents domestiques, entraînant des conséquences de plus en plus visibles. Cela a conduit, au cours du dernier siècle, à la création de systèmes d'épuration largement utilisés aujourd'hui.

Les capacités naturelles des milieux aquatiques à purifier les eaux usées ont été mieux comprises, notamment les interfaces terre-eau, reconnues pour leur rôle dans l'épuration des effluents. Cette prise de conscience a mené à la conception de systèmes de traitement inspirés des processus naturels, tels que les "marais artificiels". Les algues planctoniques (lagunes à « microphytes ») jouent un rôle clé dans ce processus en fournissant de l'oxygène, nécessaire à la dégradation de la pollution par les bactéries.

Les microorganismes contribuent également de manière indirecte à l'épuration des contaminants. Leur activité microbienne peut entraîner des phénomènes comme l'acidification ou l'alcalinisation du milieu environnant (cycle de l'azote). Par ailleurs, les champignons mycorhiziens, notamment les champignons mycorhiziens à arbuscule (CMA), peuvent établir des associations symbiotiques avec les plantes, améliorant leur nutrition, leur tolérance aux contaminants, et modifiant leur absorption des polluants.

Dans le cadre de cette étude, les macrophytes étudiés et utilisés pour la phytoépuration sont le roseau (*Phragmites australis*) et la massette (*Typha latifolia*)

II.3. Principales caractéristiques des zones humides artificielles

Les zones humides artificielles varient selon leurs principales caractéristiques de conception et les processus impliqués dans l'élimination de la pollution. Dans le cadre de cet article, nous nous concentrerons uniquement sur les zones humides artificielles (CWs) dotées de macrophytes émergents.

II.3.1. Zones humides artificielles à surface d'eau libre

Une zone humide artificielle typique avec macrophytes émergents est composée d'un bassin ou d'une série de bassins peu profonds, scellés, dans lesquels l'eau ne dépasse généralement pas 20 à 40 cm de profondeur. Le sol d'enracinement, d'une épaisseur de 20 à 30 cm, permet aux plantes de se développer. Une végétation émergente dense recouvre généralement plus de 50 % de la surface de l'eau (Figure 5). En plus des macrophytes cultivés, des espèces végétales naturelles peuvent également être présentes [16].

Chapitre II : Phytoépuration des eaux usées (Constructed Wetlands)

Les plantes sont généralement laissées en place sans récolte, et la litière végétale qui en résulte fournit le carbone organique nécessaire pour la dénitrification, un processus qui se déroule dans des poches anaérobies au sein de cette couche de litière.



FIGURE 5; ZONE HUMIDE ARTIFICIELLE A SURFACE D'EAU LIBRE (FWS CW) POUR LE RUISSELLEMENT DES EAUX PLUVIALES DANS LE DOMAINE DE WOODCROFT PRES DE SYDNEY, NWS, AUSTRALIE (VYMAZAL, 2010).

Les zones humides artificielles sont particulièrement efficaces pour le traitement des eaux usées urbaines en raison de leur capacité à éliminer les matières organiques grâce à la dégradation microbienne et à la sédimentation des particules colloïdales. Les matières en suspension sont principalement éliminées par sédimentation et filtration à travers la végétation dense. L'azote est éliminé principalement par nitrification dans la colonne d'eau, suivi de la dénitrification dans la couche de litière, ainsi que par la volatilisation de l'ammoniac, qui se produit sous des valeurs de pH plus élevées, induites par la photosynthèse des algues. En revanche, la rétention du phosphore est généralement faible, car l'eau entre en contact limité avec les particules du sol qui adsorbent et/ou précipitent ce phosphore. L'absorption de phosphore par les plantes est également temporaire, puisque les nutriments sont relâchés dans l'eau après la décomposition des plantes.

Les zones humides artificielles utilisant des eaux usées urbaines sont couramment utilisées en Amérique du Nord (voir Figure 6) et en Australie (voir Figure 7). En Europe, cette technologie a récemment suscité un intérêt croissant, notamment en Suède et au Danemark, où ces systèmes sont utilisés pour éliminer l'azote provenant de la pollution diffuse. En plus des eaux usées municipales, des zones humides artificielles avec végétation émergente ont également été utilisées pour traiter différents types d'eaux usées.

Chapitre II : Phytoépuration des eaux usées (Constructed Wetlands)



FIGURE 6: UN SYSTEME D'EPURATION DES EAUX USEES POUR LE TRAITEMENT DES EAUX DE DRAINAGE MINIERES ALCALINES A MONASTERE RUN, PENNSYLVANIE, ÉTATS-UNIS (VYMAZAL, 2010).



FIGURE 7: UN SYSTEME DE TRAITEMENT TERTIAIRE DES EAUX USEES MUNICIPALES A MCGRATH HILL, HAWKESBURY, PRES DE SYDNEY, NOUVELLE-GALLES DU SUD, AUSTRALIE (VYMAZAL, 2010).

Le dimensionnement des zones humides artificielles à surface d'eau libre (CW FWS) repose généralement sur deux approches : le volume ou la surface. Les méthodes basées sur le volume utilisent un temps de rétention hydraulique pour évaluer l'efficacité de l'élimination des polluants, tandis que les méthodes basées sur la surface considèrent la réduction des polluants en fonction de la surface totale de la zone humide.

Chapitre II : Phytoépuration des eaux usées (Constructed Wetlands)

Les CW FWS sont généralement peu efficaces pour l'élimination du phosphore. Ils ont noté que pour obtenir de faibles concentrations de phosphore dans les effluents, il est nécessaire d'avoir une charge entrante inférieure à $0,1 \text{ g P/m}^2\cdot\text{j}$ [17] .

II.3.2. Zones humides artificielles à écoulement souterrain horizontal

Les zones humides artificielles à écoulement souterrain horizontal (CW HF) sont composées de lits de gravier ou de roche scellés par une couche imperméable et plantés de végétation de zone humide. Les eaux usées sont alimentées par l'entrée, puis s'écoulent à travers le milieu poreux sous la surface du lit dans un chemin horizontal jusqu'à atteindre la zone de sortie, où elles sont collectées et évacuées. Dans ces lits de filtration, les processus de dégradation microbienne et les réactions chimiques et physiques contribuent à l'élimination de la pollution. L'écoulement se divise en différentes zones aérobies, anoxiques et anaérobies, les zones aérobies étant principalement situées autour des racines où l'oxygène est diffusé du substrat.

Cette technologie a été développée dans les années 1950 par Käthe Seidel en Allemagne, qui utilisa des matériaux grossiers comme milieu d'enracinement pour ces zones humides. Dans les années 1960, Reinhold Kickuth proposa d'utiliser des sols à forte teneur en argile, nommant cette méthode "méthode de la zone racinaire". Dans les années 1980, les systèmes de filtration par écoulement souterrain horizontal ont été introduits au Danemark, où près de 100 systèmes basés sur des lits de sol ont été mis en service dès 1987. Malgré quelques problèmes liés à l'écoulement de surface, ces systèmes ont montré une haute efficacité dans le traitement des matières organiques et des solides en suspension, en utilisant une surface de roseaux de 3 à 5 m² par équivalent habitant (PE).

À la fin des années 1980, la technologie de filtration à haute fréquence a été étendue à d'autres pays européens, tels que l'Autriche et le Royaume-Uni, et dans les années 1990, elle s'est répandue dans la plupart des pays européens ainsi qu'en Amérique du Nord, en Australie, en Asie et en Afrique. Actuellement, les matériaux grossiers, comme le gravier ou la roche d'une granulométrie d'environ 10 à 20 mm, sont utilisés comme substrat dans ces systèmes.

Les composés organiques sont efficacement dégradés, principalement par dégradation microbienne dans des conditions anoxiques et anaérobies, en raison de la faible concentration

Chapitre II : Phytoépuration des eaux usées (Constructed Wetlands)

d'oxygène dissous dans les lits de filtration. Les solides en suspension sont principalement éliminés par filtration et sédimentation, ce qui rend l'efficacité d'élimination généralement très élevée. En ce qui concerne l'azote, sa dénitrification est le principal mécanisme d'élimination dans ces systèmes. Toutefois, l'élimination de l'ammoniac est limitée par le manque d'oxygène dans le substrat dû aux conditions d'engorgement permanentes.

Le phosphore est éliminé principalement par des réactions d'échange de ligands, où le phosphate déplace l'eau ou les hydroxydes de la surface des oxydes hydratés de fer et d'aluminium. Cependant, à moins que des matériaux spécifiques ne soient utilisés, l'élimination du phosphore reste généralement faible dans les systèmes à écoulement souterrain horizontal. Les plantes jouent un rôle clé dans les CW HF en fournissant un substrat pour la croissance des bactéries attachées via leurs racines et rhizomes. Elles facilitent également la diffusion d'oxygène des racines vers la rhizosphère, contribuent à l'absorption des nutriments et isolent le substrat du froid dans les régions tempérées. Pendant longtemps, les systèmes de CW HF ont été dimensionnés à l'aide d'une "règle empirique" de 5 m² par équivalent habitant (EH-1), ou à partir de modèles à écoulement piston du premier ordre [18] [19]. Plus récemment, des modèles dynamiques plus complexes ont été développés, bien que de nombreux paramètres demeurent difficiles à mesurer et nécessitent des hypothèses.

Quel que soit le modèle utilisé, pour les eaux usées municipales, la surface nécessaire pour un système de CW HF est généralement d'environ 5 m² par équivalent habitant. L'Agence de Protection de l'Environnement (EPA) des États-Unis recommande des charges d'entrée respectives de 6 g/m²·j pour la DBO₅ et de 20 g/m²·j pour les TSS, afin d'atteindre une concentration de sortie de 30 mg/L pour ces paramètres.

Les systèmes à haute efficacité de filtration par écoulement souterrain horizontal sont couramment utilisés dans le monde entier pour traiter non seulement les eaux usées domestiques et municipales, mais aussi d'autres types d'eaux usées, tels que les eaux industrielles, agricoles, les lixiviats de décharges et les eaux de ruissellement.

Chapitre II : Phytoépuration des eaux usées (Constructed Wetlands)

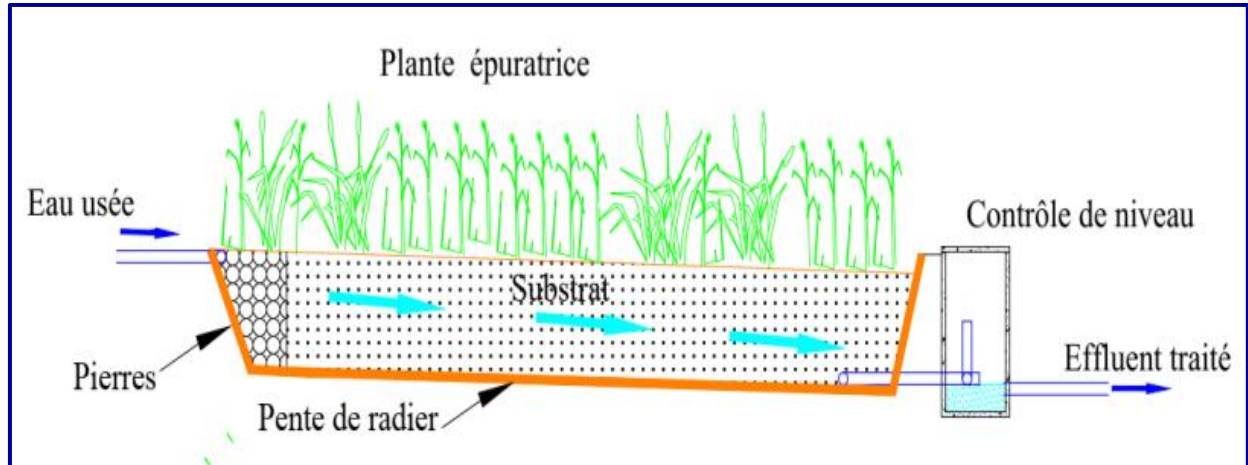


FIGURE 8 : FILTRE PLANTE A ECOULEMENT HORIZONTAL (ROKBANE, 2023)



FIGURE 9: HF CWs A STAVERTON, ROYAUME-UNI. TRAITEMENT TERTIAIRE POUR 603 EH (VYMAZAL, 2010).

II.3.3. Zones humides artificielles à écoulement vertical souterrain

Les zones humides artificielles à écoulement vertical (VF CW) (Figure 10) ont été initialement introduites par Seidel pour oxygéner les effluents anaérobies provenant des fosses septiques. Cependant, ces systèmes ne se sont pas répandus aussi rapidement que les zones humides à écoulement horizontal (HF CW), probablement en raison des exigences de maintenance plus élevées liées à la nécessité de pomper les eaux usées de manière intermittente à la surface de la zone humide. Dans ce système, l'eau est alimentée en grande quantité et s'infiltre à travers un milieu sableux. Un nouveau lot d'eau n'est introduit que lorsque l'ensemble de l'eau précédente a percolé et que le lit est complètement vidé d'eau. Cela permet une diffusion d'oxygène de l'air dans le lit. En conséquence, les zones humides à écoulement vertical sont beaucoup plus aérobies que les

Chapitre II : Phytoépuration des eaux usées (Constructed Wetlands)

zones humides à écoulement horizontal, offrant ainsi des conditions favorables à la nitrification. Cependant, ces systèmes ne favorisent pas la dénitrification.

Les zones humides à écoulement vertical souterrain sont très efficaces pour l'élimination des matières organiques et des solides en suspension. Toutefois, l'élimination du phosphore reste faible, à moins que des milieux à forte capacité de sorption ne soient utilisés. Comparées aux zones humides à écoulement horizontal, les zones humides à écoulement vertical nécessitent généralement moins de terrain, environ 1 à 3 m² par équivalent habitant (PE). Les premiers systèmes de zones humides à écoulement vertical étaient constitués de plusieurs étages, où les lits du premier étage étaient alimentés en rotation. Actuellement, les systèmes de zones humides verticales sont généralement construits avec un seul lit, et ces configurations sont appelées "zones humides verticales compactes" [20].

Les zones humides artificielles à écoulement vertical sont couramment utilisées pour traiter les eaux usées domestiques et municipales, particulièrement lorsque des limites strictes de rejet sont imposées pour l'azote ammoniacal. De nombreux rapports dans la littérature décrivent également l'utilisation de ces systèmes pour divers types d'effluents, tels que les effluents de raffinerie, les lixiviats issus du compostage. Les eaux de ruissellement des aéroports, ainsi que les effluents provenant des laiteries ou de la production de fromage.

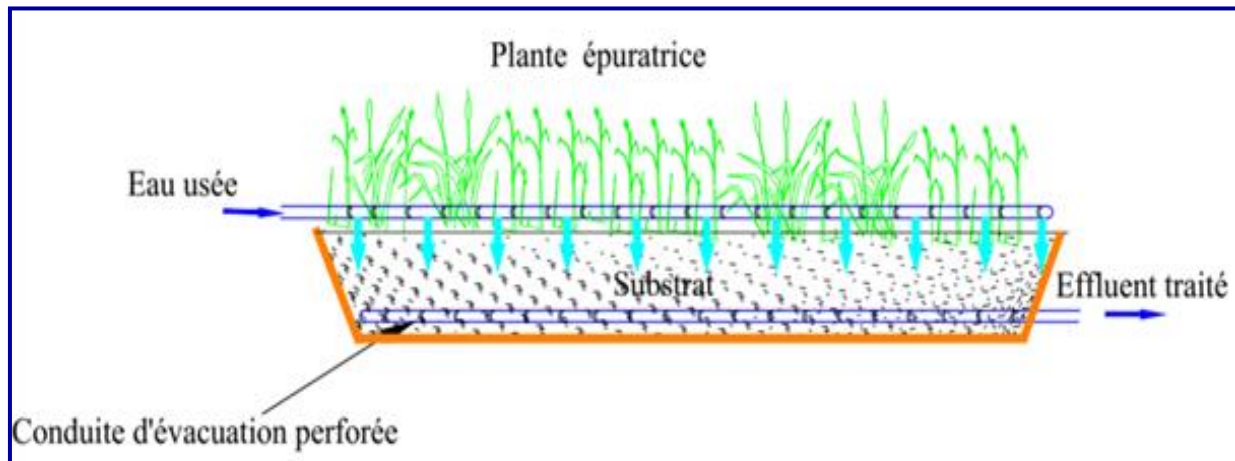


FIGURE 10: FILTRE PLANTE A ECOULEMENT VERTICAL (ROKBANE, 2023).

Dans les systèmes de filtration verticale à flux ascendant, les eaux usées sont introduites au fond de la zone humide. L'eau s'infiltré alors vers le haut à travers le substrat, puis est collectée soit

Chapitre II : Phytoépuration des eaux usées (Constructed Wetlands)

près de la surface, soit directement à la surface du lit de la zone humide. Ces systèmes sont utilisés couramment dans des pays comme le Brésil.

Plus récemment, des systèmes de filtration dits « remplissage et drainage » ou « marée » ont été développés. Dans les systèmes à flux de marée, les eaux usées s'infiltrent vers le haut jusqu'à ce que la surface du lit soit complètement inondée. Lorsque cette condition est atteinte, l'alimentation en eau est arrêtée. Les eaux usées sont alors retenues dans le lit de filtration. Après un certain temps, défini à l'avance, l'eau est évacuée vers le bas. Une fois que l'eau a quitté le lit de filtration, le cycle de traitement est terminé, et l'air peut pénétrer dans les vides du matériau de filtration, permettant ainsi la diffusion d'oxygène et facilitant les processus biologiques aérobiques. Ce système permet d'alterner entre des périodes d'inondation et de dessèchement, ce qui favorise des processus de traitement variés et efficaces.



FIGURE 11: DISTRIBUTION DES EAUX USEES DANS LES STATIONS D'EPURATION A FLUX VERTICAL (VF) A BEXHILL, NOUVELLE-GALLES DU SUD, AUSTRALIE.

II.3.4. Zones humides artificielles hybrides

Les zones humides artificielles hybrides combinent différentes techniques pour améliorer l'efficacité du traitement en tirant parti des avantages propres à chaque système. La plupart de ces systèmes hybrides associent des zones humides à écoulement vertical (VF) et horizontal (HF) [21]. Ce type de système a été conçu initialement par Seidel à la fin des années 1950 et au début des années 1960, bien que l'usage de systèmes hybrides ait été limité à l'époque. Cependant, dans les années 1980, des zones humides artificielles hybrides VF-HF ont été construites en France et au Royaume-Uni.

Chapitre II : Phytoépuration des eaux usées (Constructed Wetlands)

Aujourd'hui, ces zones humides hybrides sont largement utilisées à travers le monde, notamment dans les cas où l'élimination efficace de l'azote ammoniacal et de l'azote total est requise. En plus de traiter les eaux usées municipales, ces systèmes hybrides ont été appliqués à divers autres types de rejets, tels que les lixiviats de décharges, les lixiviats de compost, les effluents d'abattoirs, l'aquaculture de crevettes et de poissons ou encore les effluents de vineries.

II.3.4.1. Système VF–HF

Plusieurs systèmes hybrides ont été développés par Seidel au sein du Max Planck Institut à Krefeld, en Allemagne. Ce procédé, connu sous le nom de système Seidel [22], repose sur une conception intégrant deux étages de lits filtrants verticaux (VF) disposés en parallèle, suivis de deux ou trois lits horizontaux (HF) en série. Le système VF-HF, basé sur le concept original de Seidel (Figure 12), offre une performance élevée en matière de traitement des effluents. Ce type de configuration permet une élimination efficace de l'azote total grâce à une nitrification intense dans le filtre vertical (VF), suivie d'une dénitrification efficace dans le filtre horizontal (HF), où les nitrates produits en amont sont réduits avec succès.

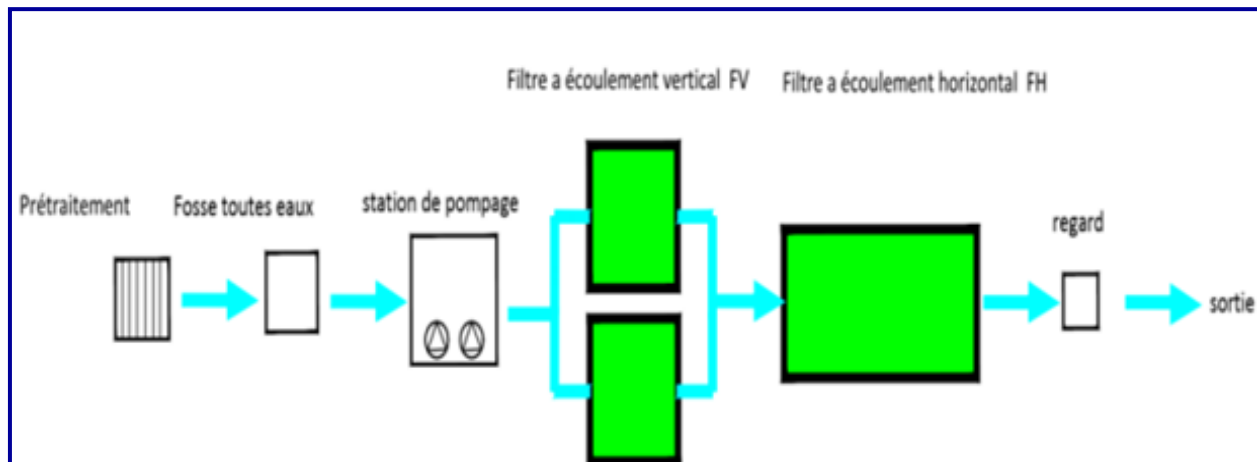


FIGURE 12: CONFIGURATION DE SYSTEME HYBRIDE FV-FH.

II.3.4.2. Système HF – VF

Au milieu des années 1990, Johansen et al. [23] ont introduit un système hybride combinant un filtre horizontal (HF) suivi d'un filtre vertical (VF). Le grand lit HF est placé en premier afin d'éliminer les matières organiques et les solides en suspension tout en favorisant la dénitrification. Le filtre VF, quant à lui, complète l'élimination des matières organiques et des particules en suspension, tout en assurant la nitrification de l'ammoniac en nitrate [23]

Chapitre II : Phytoépuration des eaux usées (Constructed Wetlands)

Cependant, pour assurer une élimination efficace de l'azote total, l'effluent nitrifié du filtre VF doit être recyclé vers la fosse toutes eaux, puis réintroduit dans le premier stade du filtre horizontal. Les performances obtenues sur un système comprenant un filtre horizontal (456 m²) et un filtre vertical (30 m²) atteignent 96 % pour la DBO₅, 78 % pour la DCO et 97 % pour l'ammonium (NH₄⁺-N).

L'importance du recyclage a été mise en évidence par à travers un système hybride HF-VF avec recyclage. Les résultats montrent une excellente élimination des polluants, atteignant 98 % pour la DBO₅, 96 % pour la DCO, 99 % pour les solides en suspension, ainsi que 99 % pour les bactéries et l'ammoniac.

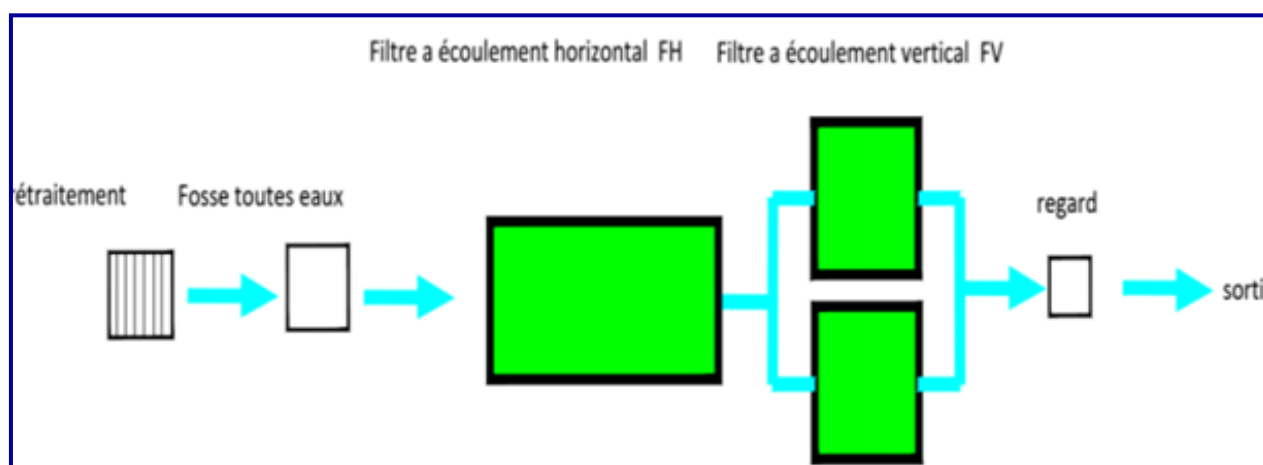


FIGURE 13: CONFIGURATION DE SYSTEME HYBRIDE FH-FV.

II.4. Performances de Traitement

II.4.1. Matières Organiques et Solides en Suspension

L'élimination des matières organiques est élevée dans tous les types de zones humides artificielles. Dans les systèmes FWS et VF, la dégradation microbienne repose principalement sur des processus aérobies, tandis que dans les systèmes HF, les mécanismes anoxiques et anaérobies prédominent.

L'efficacité du traitement est similaire entre les zones humides artificielles et les systèmes à circuit fermé HF. En revanche, pour les systèmes VF en circuit fermé, l'efficacité est plus élevée en raison de concentrations d'entrée supérieures.

Chapitre II : Phytoépuration des eaux usées (Constructed Wetlands)

Les zones humides artificielles VF sont généralement utilisées pour le traitement primaire ou secondaire, tandis que les systèmes de traitement tertiaire intègrent souvent des zones humides artificielles. Par ailleurs, les systèmes HF en circuit fermé sont privilégiés pour traiter des eaux usées diluées par le ruissellement des eaux pluviales. Malgré ces différences, les concentrations de sortie des systèmes de traitement secondaire restent comparables pour tous les types de zones humides artificielles.

Enfin, l'élimination des matières solides en suspension est particulièrement efficace dans l'ensemble des systèmes étudiés. Les résultats indiquent également que le temps de rétention hydraulique est généralement plus court dans les systèmes FWS que dans ceux à écoulement souterrain.

L'élimination des nutriments dans différents types de zones humides artificielles. La rétention du phosphore y est généralement faible, car ces systèmes ne sont que rarement conçus pour cibler spécifiquement ce paramètre. Les études sur le cycle du phosphore dans les zones humides indiquent que l'accumulation dans le sol ou la tourbe constitue le principal puits de phosphore à long terme [24]

Parmi les différents types de zones humides artificielles, l'accrétion du sol n'a lieu que dans les systèmes FWS, où la végétation n'est pas récoltée et où les eaux usées interagissent avec la couche supérieure du sol. Toutefois, la quantité de phosphore retenue reste très faible par rapport aux charges généralement présentes dans les eaux usées.

Dans les systèmes à écoulement souterrain, l'adsorption et la précipitation constituent les principaux mécanismes d'élimination du phosphore. Cependant, les substrats couramment utilisés, tels que le gravier lavé ou la roche concassée, présentent une capacité de sorption et de précipitation limitée usées.

Des recherches récentes ont exploré l'utilisation de matériaux filtrants fabriqués, comme les agrégats d'argile légère (LECA), ainsi que de sous-produits industriels tels que les scories d'acier de four, pour améliorer la rétention du phosphore dans les zones humides artificielles. Si ces substrats permettent une élimination très efficace du phosphore, il est essentiel de noter que la sorption et la précipitation sont des processus limités dans le temps, leur efficacité diminuant progressivement à mesure que la capacité de sorption se sature.

Chapitre II : Phytoépuration des eaux usées (Constructed Wetlands)

L'élimination de l'azote total reste généralement limitée, en raison d'une nitrification réduite dans les milieux saturés en eau. Dans les zones humides artificielles à écoulement horizontal (HF), la nitrification est faible, tandis que dans les systèmes à écoulement vertical (VF) et à surface libre (FWS), la dénitrification est quasiment inexistante usées.

Dans les CW FWS, l'azote est éliminé via un processus de nitrification dans la colonne d'eau aérobie, suivi d'une dénitrification dans la couche de litière anoxique située à la surface du lit. Par ailleurs, la volatilisation peut être un mécanisme important d'élimination de l'azote dans les systèmes FWS, où les assemblages d'algues favorisent des valeurs de pH élevées pendant la journée en raison de leur activité photosynthétique [25]

Dans les systèmes VF, une nitrification très efficace se produit grâce aux conditions aérobies du lit filtrant, mais l'absence de conditions anoxiques empêche toute dénitrification. Pour améliorer l'élimination globale de l'azote total, une combinaison de lits VF et HF peut être envisagée : les lits VF assurent la nitrification, tandis que les lits HF, bien que peu performants pour cette réaction, offrent des conditions favorables à la réduction des nitrates formés en VF.

L'absorption de l'azote par les plantes dans les différents types de zones humides artificielles n'est significative que si la biomasse est récoltée. Toutefois, la quantité d'azote piégée dans la biomasse aérienne reste généralement inférieure à 10 % de la charge entrante en nutriments [26].

Des informations plus détaillées sur les performances des zones humides artificielles pour divers types d'eaux usées sont disponibles dans d'autres études.

II.5. Conclusion

Au cours des cinq dernières décennies, les zones humides artificielles ont évolué pour devenir une technologie de traitement fiable, adaptée à une large gamme d'eaux usées, y compris domestiques, industrielles, agricoles, ainsi qu'aux lixiviats de décharge et aux eaux de ruissellement pluvial. Ces systèmes reproduisent les processus naturels d'épuration des marais, mais dans des conditions mieux contrôlées.

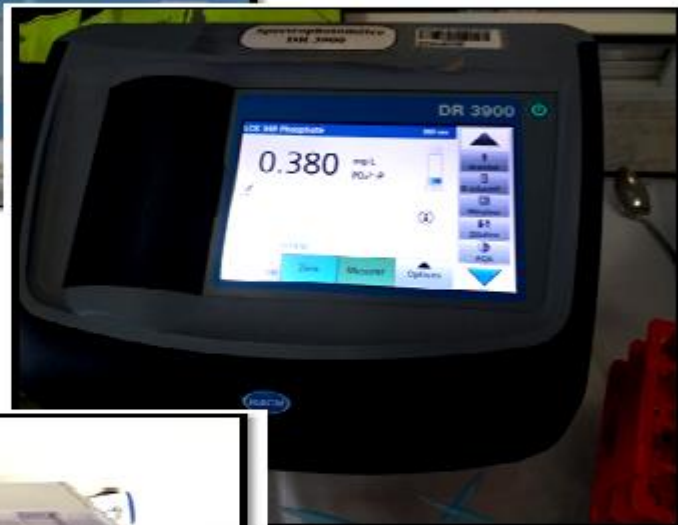
Tous les types de zones humides artificielles se révèlent très efficaces pour l'élimination des matières organiques et des solides en suspension. En revanche, l'élimination de l'azote

Chapitre II : Phytoépuration des eaux usées (Constructed Wetlands)

demeure plus limitée, bien qu'elle puisse être optimisée en combinant différents types de systèmes. Quant à l'élimination du phosphore, elle reste généralement faible, sauf en présence de substrats spécifiques à haute capacité de sorption.

Un atout majeur des zones humides artificielles réside dans leur faible consommation énergétique, voire leur autonomie énergétique, ce qui se traduit par des coûts d'exploitation et de maintenance nettement inférieurs à ceux des systèmes conventionnels. Par ailleurs, au-delà du traitement des eaux, ces systèmes sont souvent conçus comme des écosystèmes multifonctionnels, offrant des services écosystémiques supplémentaires tels que la régulation des inondations, la séquestration du carbone et la préservation de la biodiversité.

Chapitre III : Matériel et méthodes



III.1. Situation géographique de la zone d'étude

Le village de Guemmour est situé dans la commune d'El Anasseur, relevant de la wilaya de Bordj Bou Arreridj, au nord-est de l'Algérie. Il se distingue par son emplacement géographique au sein d'une région de collines et de plaines, avec un climat méditerranéen à tendance semi-continentale, caractérisé par des étés chauds et secs ainsi que des hivers froids et pluvieux.

- **Latitude** : environ 36.2° N
- **Longitude** : environ 4.9° E

Limites géographiques

- ✚ **Au nord** : La commune de Sidi Embarek
- ✚ **Au sud** : La commune de Belimour
- ✚ **À l'est** : La commune de Ain Tassera.
- ✚ **À l'ouest** : Centre-ville de la commune d'El-Anasser.

D'après le recensement général de la population et de l'habitat, la population du village de Guemmour était estimée à 2 620 habitants.



FIGURE 14 : LOCALISATION DU POINT DE PRELEVEMENT D'EAU A GUEMMOUR

III.2. Techniques d'échantillonnage

Le prélèvement d'eau est une étape importante pour obtenir des résultats d'analyse fiables. Dans ce travail, les échantillons d'eaux usées ont été prélevés uniquement dans la région de

Guemmour. Deux échantillons ont été collectés à des moments différents pour observer les changements possibles dans la qualité de l'eau.

La méthode utilisée est simple : un pot attaché à une barre en bois permet d'atteindre facilement le point de prélèvement de Guemmour. Avant chaque prélèvement, les bouteilles sont rincées trois fois avec l'eau à analyser, puis remplies complètement.

III.3.1.2 Transport et conservation des échantillons

Les échantillons d'eaux usées ont été recueillis dans des bouteilles de 1,5 L, puis conservés dans une glacière à une température de 4 °C, conformément aux recommandations du guide général pour la conservation et la manipulation des échantillons [27]. Le jour même, les échantillons ont été acheminés vers le laboratoire de l'université de B.B.A pour analyse



FIGURE 15: ÉCHANTILLONS D'EAU BRUTE PRELEVES POUR ANALYSE EN LABORATOIRE.

III.3.1.3 Méthode d'analyse physico-chimique

Les eaux usées contiennent une grande variété de composés polluants. Il est difficile, voire impossible, d'identifier tous les composés chimiques présents. C'est pourquoi on se base généralement sur des paramètres globaux de pollution pour évaluer la qualité de l'eau [7]. Dans notre étude, la qualité des eaux usées a été analysée à travers deux prélèvements effectués à des périodes différentes. L'évaluation repose sur l'analyse de plusieurs indicateurs physico-chimiques de pollution, présentés dans le tableau suivant.



FIGURE 16: APPAREILLAGES UTILISES POUR L'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX USEES

Tableau 2: Méthodes d'analyses physico-chimiques.

Paramètre physico chimique	Méthode	Référence
pH	pH mètre de type Benchtop, HANNA, HI 221	Norme NFT 90-017
Température	Thermomètre sonde électronique	Méthode standard
Conductivité	Conductimètre	Franck R., 2002
Turbidité	Absorption	FWPCA Methods for chemical analysis of water and wastes, 275 (1969)
Couleur	Au Platine- Cobalte	Norme NF EN ISO 7789
DCO	Détermination de l'indice permanganate	Norme EN ISO 8467: 1993
DBO5	Méthode pour les échantillons non dilués	Norme NF EN 1899- 2

Chapitre IV | Résultats et interprétations

IV.1. Etude climatologique

Le climat joue un rôle essentiel dans divers aspects de la vie, en particulier à la surface de la Terre. C'est pourquoi la plupart des pays accordent une grande importance à son étude, notamment pour améliorer les performances dans des secteurs clés comme l'agriculture et l'industrie.

Il est important de souligner la relation étroite entre le climat et la végétation naturelle. En effet, la répartition de la couverture végétale à la surface du globe dépend directement des conditions climatiques, notamment de la température et des précipitations. De plus, le climat influence directement la nature et la qualité des sols.

Dans cette optique, ce chapitre se propose d'analyser le climat de la région de Guemmour, située dans la wilaya de Bordj Bou Arreridj, en s'appuyant sur des données climatologiques telles que la température, les vents et les précipitations.

IV.1.1. Climatologie de la région de Guemmour

Le climat de la région de Guemmour est caractérisé par plusieurs paramètres météorologiques essentiels, notamment les précipitations, la température, l'évaporation et l'humidité relative.



FIGURE 17 : INSTRUMENTS DE MESURE METEOROLOGIQUE AU NIVEAU DE STATION DE BOUMERGED

IV.1.1.1. Pluviométrie

Les pluviométries moyennes mensuelles sur une période d'observation de 10 ans (1996 à 2005) sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau 3. Pluviométries moyennes mensuelles (Source ONM).

Mois	Jan.	Fév.	Mars.	Avr.	Mai.	Juin.	Jui.	Aout.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
P (mm)	43.73	23.11	16.24	39.67	39.69	23.12	3.66	20.07	46.59	23.63	50.71	45.47	375.69

Le tableau ci-dessous indique que la région à une faible pluviométrie et la valeur maximale enregistrée est 50.71 mm durant le mois Novembre.

IV.1.1.2. Température

Les températures extrêmes et moyennes sur une période d'observation de 10 ans (1996 à 2005) sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau 4. Températures extrêmes et moyennes mensuelles (Source ONM).

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai.	Juin.	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc	Moy
Tmin (°C)	2.56	2.67	5.86	8.05	12.5	17.7	20.1	20.5	15.9	12.1	6.49	3.4	10.6
Tmax (°C)	10.5	11.9	16.42	18.9	24.4	30.1	33.8	31.7	26.2	21.3	16.2	12.	21.2
Tmoy (°C)	6.29	7.11	11.02	13.4	18.5	24.2	27.7	26.9	21.4	16.9	10.4	6.9	15.9

La température maximale correspond au mois d'juillet avec 33,8°C, c'est le mois le plus chaud. La température minimale correspond au mois de Janvier avec 2,56°C, c'est le mois le plus froid. A partir du (tableau 3), on trace les graphes de température (figure 3).

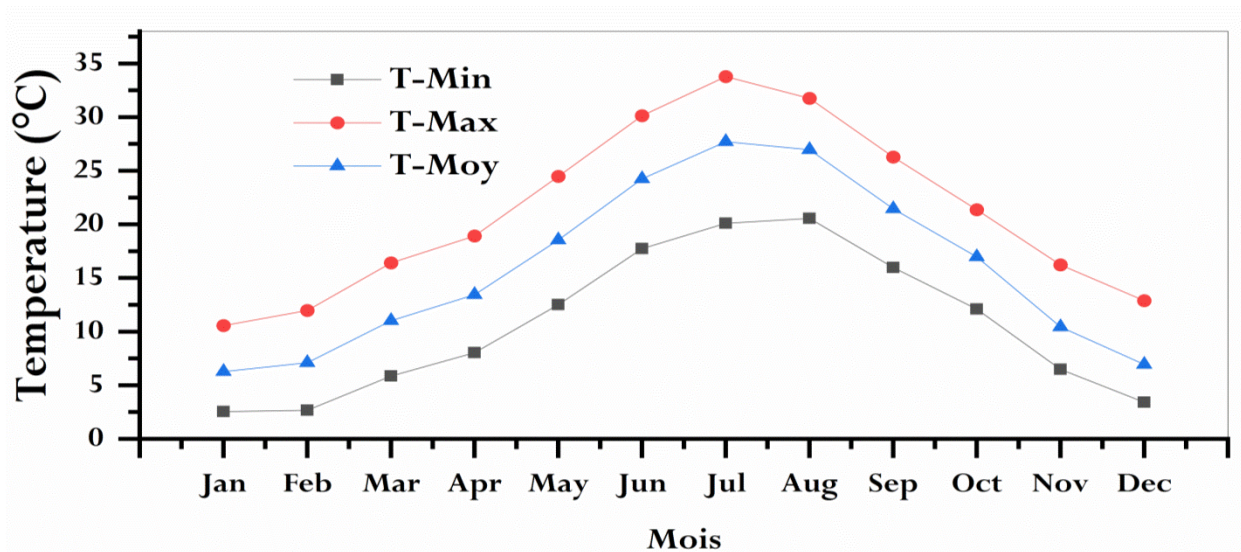


FIGURE 18: GRAPHE DE TEMPERATURE MOYENNE, MINIMALE ET MAXIMALE.

IV.1.1.3. Vent

Le vent est un facteur écologique majeur jouant plusieurs rôles essentiels. Il agit comme un agent de transport, un élément climatique et un facteur mécanique. Son influence s'exerce aussi bien sur le sol, en favorisant l'évaporation et l'érosion, que sur les plantes, en contribuant à leur dispersion. Ainsi, l'étude de la direction et de la vitesse des vents est essentielle pour mieux comprendre ses effets sur l'environnement.

Tableau 5. Vitesses maximales mensuelles des vents (10ans) (Source ONM).

Mois	Jan.	Fév.	Mars.	Avr.	Mai.	Juin.	Jui.	Aout.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
V moy (m/s)	25.8	25.8	26.4	20.7	23.6	25.8	22.6	23.8	21.6	23.2	25.4	28.2

- La vitesse maximale est de 28,2 m/s, elle est observée au mois de décembre ;
- La vitesse minimale est de 20,7 m/s, elle est observée au mois Avril.

IV.1.1.4. Humidité relative de l'air

L'humidité relative de l'air joue un rôle clé dans le cycle hydrologique, influençant directement l'évaporation du sol ainsi que le développement du couvert végétal. La répartition mensuelle moyenne de l'humidité relative est présentée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 6: Humidités relatives moyennes mensuelles (10ans) (Source ONM).

Mois	Jan.	Fév.	Mars.	Avr.	Mai.	Juin.	Jui.	Aout.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
H (mm)	72.3	66.7	58.9	54.1	54.1	54.4	39.7	44.3	55.8	59.5	68.6	72.2	58.8

- Le mois le plus humide est le mois Janvier avec 72,3% ;
- Le mois le moins humide est le mois d'juillet avec 39 ,7%.

IV.2. Synthèses climatiques

Pour étudier le climat d'une région, diverses méthodes de classification peuvent être employées, notamment dans les domaines de l'agriculture et de l'écologie. Cette classification repose sur trois paramètres clés : les précipitations (P) ainsi que les températures maximales (M) et minimales (m) . Elle permet notamment d'analyser le comportement des organismes vivants, qu'ils soient végétaux ou animaux.

IV.2.1. Indices climatiques

IV.2.1.1. Quotient pluviométrique et climagramme d'Emberger

Il permet de déterminer l'étage bioclimatique et la valeur du coefficient pluviométrique en utilisant la formule et le diagramme bioclimatique d'Emberger.

$$Q_2 = \frac{2000P}{M^2 - m^2} \quad (1)$$

Q₂ : quotient pluviométrique modifié d'Emberger

P : Précipitation moyenne annuelle (mm).

M : Température moyenne maximale du mois le plus chaud en Kelvin.

m : Température moyenne minimale du mois le plus froid en Kelvin.

$$M = 33,8 + 273 = 306,8$$

$$m = 2,56 + 273 = 275,56$$

$$Q_2 = 41,3$$

Le quotient pluviométrique obtenu est de 41,3. D'après le diagramme bioclimatique d'Emberger (figure I.2) la valeur obtenue de Q₂ correspondent à un climat semi-aride à hiver frais.

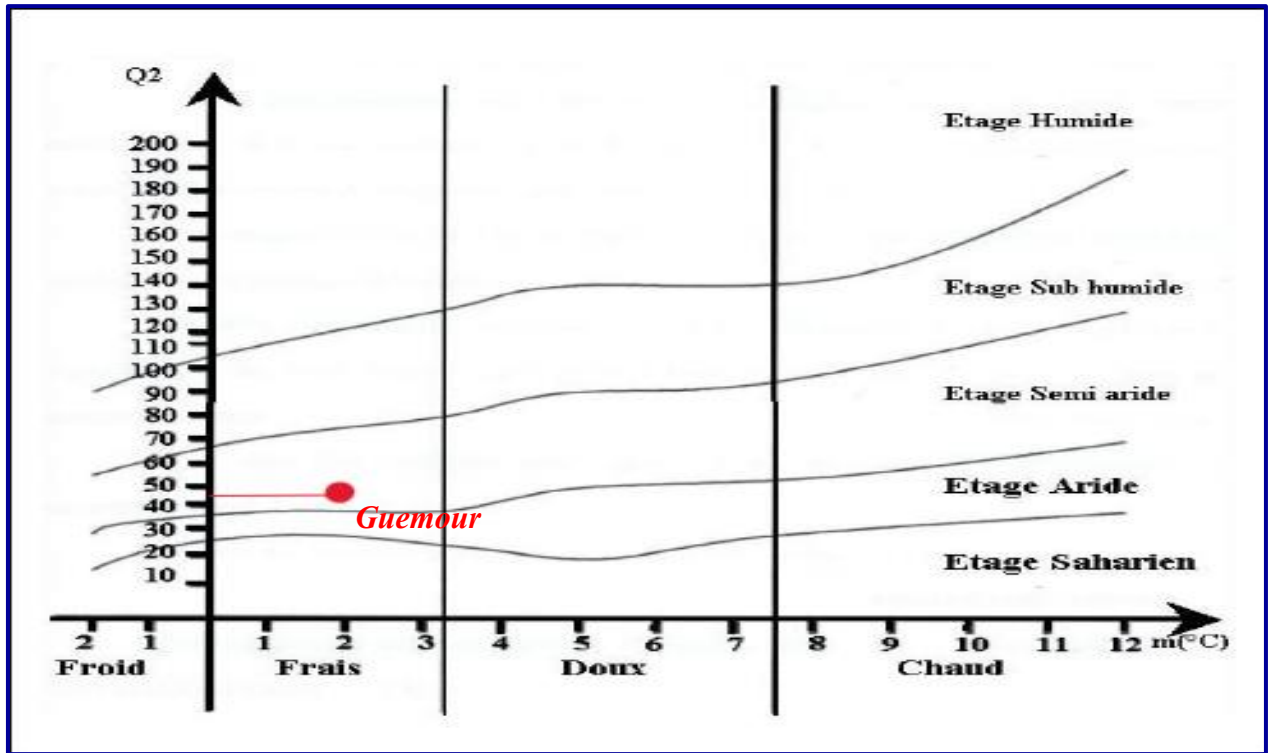


FIGURE 19 :DIAGRAMME BIOCLIMATIQUE D'EMBERGER.

IV.2.1.2. Indice d'aridité de Martonne

C'est le degré de sécheresse du climat de la région. Il est calculé par la formule suivante

$$IA = \frac{P}{T+10} \tag{2}$$

Avec :

IA : Indice climatique de Martonne.

P : Précipitation moyenne annuelle (mm).

T : Température moyenne annuelle (°C).

$$IA = 14,5$$

Tableau 7. Les limites de climat d'après l'indice de Martonne.

IA	Type de climat	Irrigation
IA ≤ 5	Désertique	Indispensable
5 < IA ≤ 10	Très sec	Indispensable
10 < IA ≤ 20	Sec	Souvent indispensable
20 < IA ≤ 30	Relativement humide	Parfois utile
IA > 30	Humide	Inutile

IA = 14,5 mm donc 10 < IA ≤ 20 ce qui correspond d'après les valeurs du tableau au climat Sec d'où l'irrigation est souvent indispensable dans notre région.

IV.2.1.3. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен

Sur la base des travaux de Bagnouls et Gausсен, le diagramme ombrothermique permet de distinguer deux périodes climatiques : une période humide et une période sèche. Ce diagramme illustre l'évolution des précipitations et des températures au cours de l'année, en utilisant deux axes verticaux (ordonnées) l'un à gauche pour les précipitations et l'autre à droite pour les températures en fonction des mois représentés sur l'axe horizontal (abscisses). Lors de sa réalisation, on applique l'échelle $P = 2T$ (Figure I.3), ce qui signifie que l'on double les valeurs de température pour les comparer aux précipitations.

Une période est considérée comme humide lorsque les barres de précipitations dépassent la courbe de température ($P > 2T$), et sèche lorsque les précipitations sont inférieures à cette courbe. D'après le diagramme ombrothermique de notre région (Figure 16), on observe que la sécheresse se manifeste durant les mois de mars, juin, juillet, août et octobre.

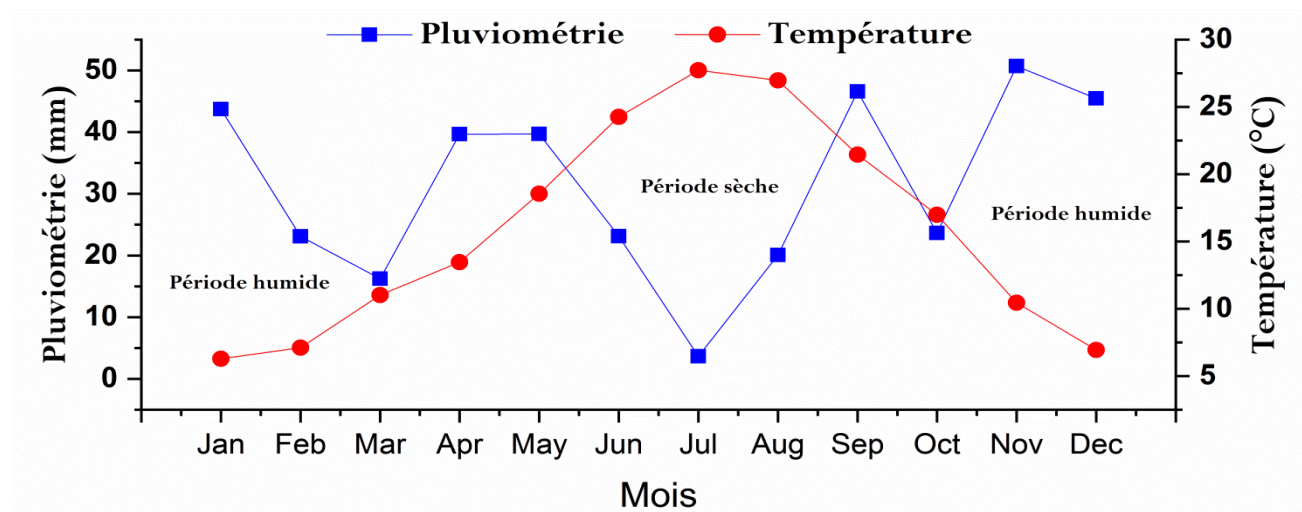


FIGURE 20: DIAGRAMME OMBROTHERMIQUE DE BAGNOULS ET GAUSSEN DE GUEMMOUR.

IV.3. Conclusion

D'après l'étude climatologique vue dans ce chapitre, et en se basant sur les données climatiques ainsi que la méthode de classification d'Emberger, on peut conclure que le climat de la région est sec. L'irrigation est donc nécessaire pendant les mois de mars, juin, juillet, août et octobre. On remarque aussi une période peu pluvieuse durant les mois d'avril, mai et septembre, alors que les mois les plus secs sont juin, juillet et août. Ces résultats vont nous servir dans les prochains chapitres, surtout pour estimer les besoins en eau des espaces verts dans la ville de Guemmour.

IV.4. Estimation de débit

IV.4.1. Nombre de population future(N_F)

Est une estimation de la population prévue à une date donnée, utile pour le dimensionnement des infrastructures d'assainissement. Il peut être calculé à l'aide de la formule de croissance démographique suivante :

$$N_F = N_{actuel} \times (1 + \tau)^n \tag{3}$$

- N_F : Population future (2050)
- N_{actuel} : Population actuelle (2025)
- τ : Taux de croissance annuel (exprimé en fraction, par exemple 1% = 0.01)
- n : Nombre d'années dans le futur (25)

$$N_{2050} = N_{2025} \times (1 + \tau)^{25}$$

Nombre de population future = **3360 hab**

IV.4.2. Débit moyen journalier(Q_m)

Le débit moyen des eaux usées peut être calculé à partir de la consommation d'eau potable et du coefficient de rejet :

$$Q_m = C_r \times N_F \times d \tag{4}$$

- N_F : Population future : **(3360 hab)**
- d : Dotation (L/hab/j) : **(155 L/hab/j)**
- C_r : Coefficient de rejet des eaux usées : **(0.8)**

Débit moyen journalier $Q_m = 403.20 \text{ m}^3/\text{j}$

IV.4.3. Débit d'équipement des eaux usées

Le débit d'équipement correspond à la quantité d'eau usée générée par une installation spécifique (ex. : logement, école, hôpital, usine) et est essentiel pour le dimensionnement des réseaux d'assainissement. Il est généralement exprimé en litres par seconde (L/s) ou mètres cubes par jour (m^3/j).

$$Q_{\text{equip}} = Q_{\text{ecole}} + Q_{\text{CEM}} + Q_{\text{mosque}} + Q_{\text{centre de santé}} + Q_{\text{siège APC}} + Q_{\text{siège poste}} + Q_{\text{centre de loisir}} \quad (5)$$

$$Q_i = N \times d \quad (6)$$

Q_i : Débit d'un équipement

N: nombre d'habitants à l'équipement

d : dotation (L/hab/j)

	Ecole	CEM	Mosquée	Centre de santé	Siège APC	Siège poste	Centre de loisir
N (hab)	472	375	1200	5	5	10	100
d (L/hab/j)	10	10	30	20	10	10	10
Q (l/j)	4720	3750	3600	100	50	100	1000
Q équip	$\sum Q_i = 13320 \text{ (L/j)} = 13.32 \text{ m}^3/\text{j}$ $Q_{\text{equip}} = 13.32 \times 0.8 = 10.65 \text{ m}^3/\text{j}$						

IV.4.4. Débit total

$$Q_T = Q_{\text{equip}} + Q_{\text{hab}} \quad (7)$$

Q équip (m ³ /j)	Q hab (m ³ /j)	Q _T (m ³ /j)
10.656	403.20	413.856

III.2.5. Débit de pointe

$$Q_{\text{pte}} = k_p \times Q_T \quad (8)$$

Kp: le coefficient de pointe est calculé par la formule suivante

$$k_p = 1,5 + \frac{2,5}{\sqrt{Q_T}} \quad (9)$$

Si $Q_T \leq 2.8 \text{ l/s} \rightarrow Kp=3$

Si $Q_T \geq 2.8 \text{ l/s} \rightarrow Kp$ calculé par la formule

$$Q_T = 4.79 \text{ l/s} \geq 2.8 \text{ l/s} \rightarrow k_p = 2,64$$

Kp	Q _T (m ³ /j)	Q pte (m ³ /j)
2.64	413.856	1092.096

III.3.2. Analyse physico chimique des eaux usée

Tableau 8. Analyse physico chimique des eaux usées de la ville Guemmour.

Paramètres	Analyse 1	Analyse 2
T (° c)	18	21,3
PH	7,12	8,3
CE (µs/cm)	2,84	2,6
Turbidité (NTU)	52,6	197
DCO (mg/l)	286	436
DBO ₅ (mg/l)	170	260
DCO/DBO ₅	1,68	1,67

III.3.2.1. Température

L'analyse de la figure met en évidence une baisse notable des températures enregistrées lors des deux analysés par rapport à la température de référence fixée à 30°C. En effet, les valeurs relevées sont de 18°C pour analyse 1 et de 21,3°C pour analyse 2. Cette différence significative suggère que les conditions expérimentales ont eu un impact direct sur la réduction de la température, traduisant ainsi une efficacité potentielle du dispositif ou du procédé testé dans le cadre de cette étude comparative.

III.3.2.2. Potentiel Hydrogène (pH)

D'après la figure, on remarque que les valeurs du pH mesurées dans les deux analyses sont plus élevées que la norme de rejet fixée à 6,5. Le pH est de 7,12 pour analyse 1 et de 8,3 pour analyse 2. Cela montre que l'eau devient plus basique dans les deux cas, surtout dans l'essai 2. Cette différence peut être due aux conditions des analyses ou aux substances présentes dans l'eau

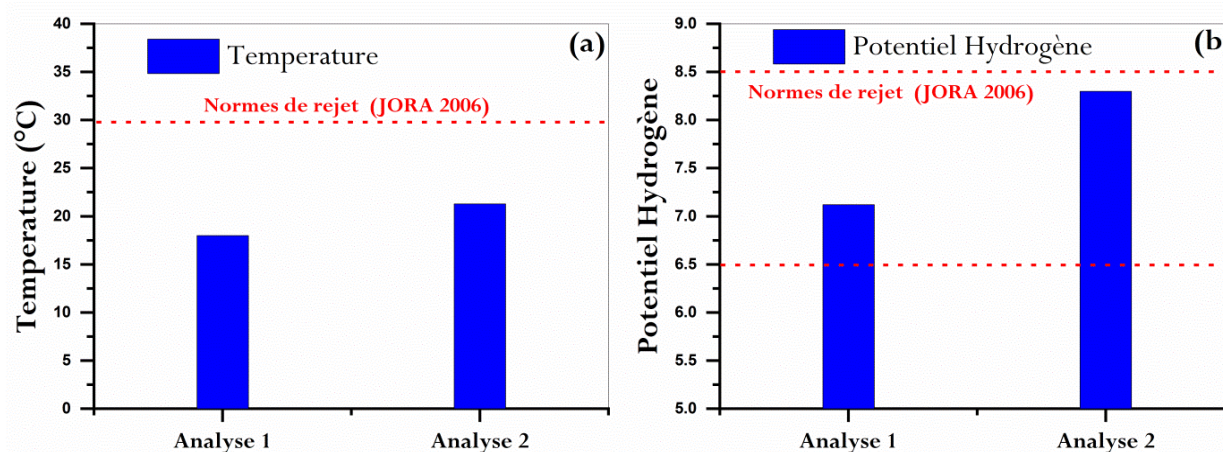


FIGURE 21 : (A) VARIATION DE LA TEMPERATURE, ET (B) VARIATION DU PH

III.3.2.3. Conductivité électrique

Les résultats de la conductivité électrique (CE) pour les deux analyses sont très bas : 2,84 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour l'analyse 1 et 2,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour l'analyse 2. Ces valeurs sont beaucoup plus faibles que la limite fixée par les normes algériennes, qui est de 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cela veut dire que l'eau analysée est très peu minéralisée.

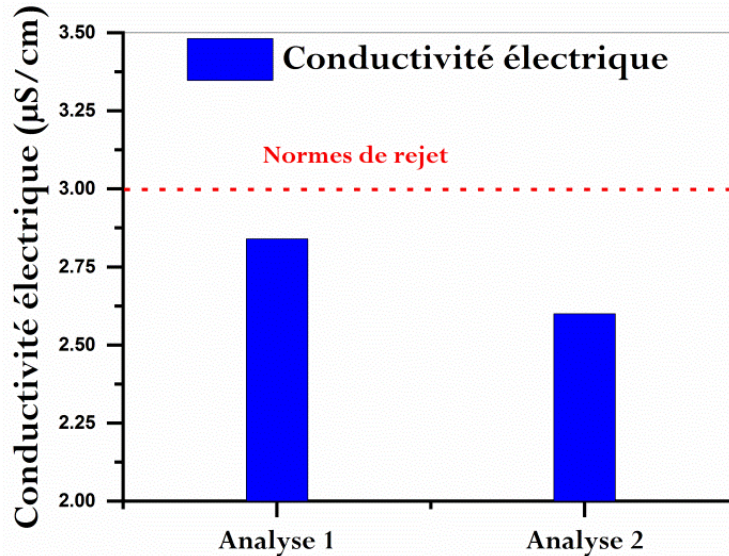


FIGURE 22: VARIATION DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE

III.3.2.4 Demande chimique en oxygène DCO

Le graphique et le tableau montrent clairement que la DCO mesurée dans les deux analyses (analyse 1 : 286 mg/L, analyse 2 : 436 mg/L) dépasse largement la norme de rejet fixée à 120 mg/L. Ces valeurs élevées révèlent une forte pollution organique dans les échantillons analysés. L'essai 2 affiche une DCO encore plus importante que l'essai 1, ce qui pourrait indiquer une dégradation accrue de la qualité de l'eau ou une concentration plus élevée en matière organique. Il est donc indispensable de mettre en place des traitements complémentaires afin de réduire la DCO avant tout rejet dans l'environnement.

III.3.2.5 Demande biochimique en oxygène pendant cinq jours DBO5

La demande biochimique en oxygène (DBO) représente la quantité d'oxygène consommée par les micro-organismes pour décomposer les matières organiques dissoutes ou en suspension dans un litre d'eau, pendant une période d'incubation de cinq jours à une température de 20 °C

Le graphique illustre une comparaison des valeurs de la demande biochimique en oxygène (DBO₅) mesurées sur une période de cinq jours pour deux échantillons distincts. Les résultats montrent que la DBO₅ atteint 170 mg/L pour la première analyse et 260 mg/L pour le second, alors que la norme de rejet autorisée est fixée à 30 mg/L dans les deux cas. Ces dépassements importants révèlent une forte concentration de matière organique biodégradable, traduisant un niveau élevé de pollution des eaux analysées. Cette situation souligne la nécessité d'améliorer les procédés de traitement biologique avant tout rejet dans le milieu naturel, afin de limiter les impacts environnementaux et de se conformer aux exigences réglementaires

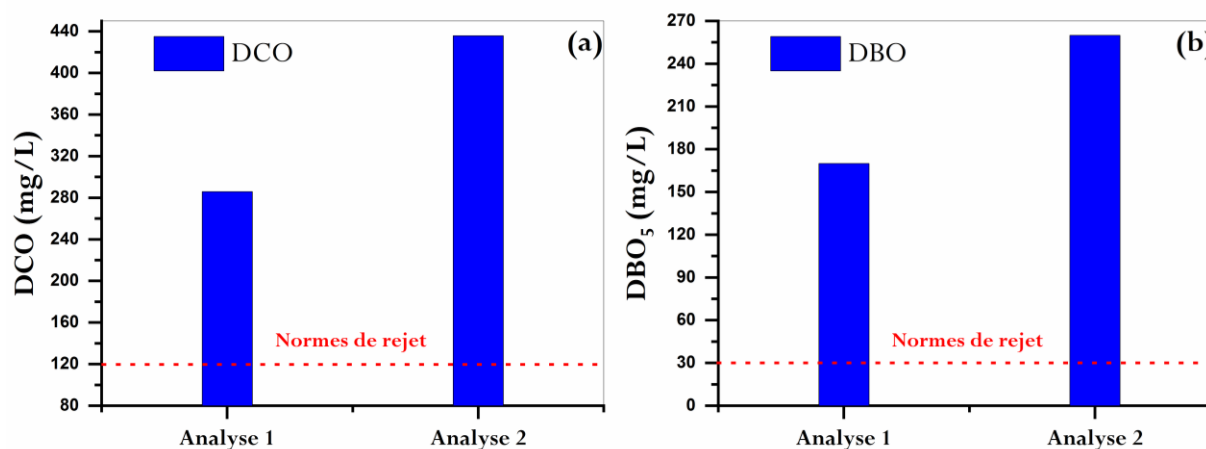


FIGURE 23: VARIATION DE LA DCO (A), ET VARIATION DE LA DBO₅ (A), POUR DIFFERENTES ANALYSES COMPAREES AUX NORMES DE REJET.

III.3.3 Conclusion

D'après les prélèvements effectués le 23 février et le 13 avril, les résultats montrent que plusieurs paramètres physico-chimiques (PH, conductivité, DCO, DBO₅ ...) dépassent les normes de rejet nationales et internationales, Cela indique que le rejet nécessite un traitement.

Par ailleurs, le rapport DBO₅/DCO, inférieur à 3, montre que la majorité des matières organiques sont biodégradables.

III. 4. Dimensions de la zone humide artificielle

III.4.1 Introduction

La phytoépuration constitue une méthode écologique et durable de traitement des eaux usées, utilisée depuis les années 1950. Elle repose sur l'interaction synergique entre les plantes, les substrats filtrants et les micro-organismes pour éliminer les polluants contenus dans les eaux usées. Les systèmes de phytoépuration peuvent être différenciés selon plusieurs critères : la présence ou non d'eau en surface (écoulement de surface ou en subsurface), la direction de l'écoulement

(vertical ou horizontal), ainsi que le type de végétaux aquatiques (macrophytes) employés. Ces procédés sont particulièrement efficaces pour éliminer la matière organique et les solides en suspension, tandis que l'efficacité de la dénitrification varie selon le type d'écoulement choisi.

Ce chapitre a pour objectif d'examiner la possibilité d'implanter des systèmes de phytoépuration dans la commune de Guemmour. Plusieurs critères doivent être pris en considération lors de dimensionnement de station de phytoépuration, parmi lesquels : la nature du sol, les propriétés physico-chimiques des eaux usées, les conditions climatiques locales, la configuration topographique du terrain, ainsi que le débit des eaux à traiter.

La capacité de la station sera déterminée en fonction des charges polluantes et des volumes à traiter. Concernant la surface nécessaire à l'installation, il convient de distinguer la surface utile, correspondant aux bassins plantés de traitement, de la surface dédiée aux équipements techniques, ainsi que de l'espace requis pour la tuyauterie, l'exploitation et la maintenance.

Dans cette étude, une station de phytoépuration sera dimensionnée pour répondre aux besoins spécifiques de la commune de Guemmour, en prenant en compte les particularités environnementales et techniques du territoire.

III.4.2.1 Bassin d'accumulation

Avant d'entamer le processus de traitement par phytoépuration, il est nécessaire d'installer un bassin d'accumulation destiné à recueillir les eaux usées issues du réseau d'assainissement. Le volume et la profondeur de ce bassin dépendent essentiellement du débit des eaux à traiter, déterminé lors des étapes précédentes de dimensionnement. Cette infrastructure joue un rôle crucial en régulant l'apport hydraulique vers les unités de traitement, tout en permettant une certaine homogénéisation des effluents.

III.4.2.2 Prétraitement

III.4.2.2.1 Fosse toutes eaux

Dans le cadre d'un système de filtres épuratoires plantés de macrophytes, le prétraitement des eaux usées nécessite l'installation d'une fosse toutes eaux. Celle-ci a pour fonction principale de permettre la décantation des matières grossières, en assurant un temps de rétention hydraulique

bien défini. Le volume utile de cette fosse sera déterminé à l'aide de la formule présentée dans ce chapitre.

$$v(m^3) = Q_{pointe} \times ts$$

Ts : Le temps de séjour (1/2 j)

Q_{pointe} : débit de pointe

$$v(m^3) = 546.048 \text{ m}^3$$

$$v = h \times l \times L \quad (11)$$

$$h=2m \quad L=3 \times l$$

$$v = h \times 3 \times l^2$$

$$l^2 = \frac{546.048}{6} = 91$$

$$h = 2m$$

$$l = 9.5m$$

$$L = 28.5m$$

III.5.2.2.2 Regard de répartition

Il s'agit d'un ouvrage de répartition des effluents, installé entre les différents bassins filtrants, dont le fonctionnement peut être adapté en fonction des besoins de l'exploitant. Cet élément assure le contrôle des débits entrants ainsi que la répartition homogène des flux vers les unités de traitement. Afin de garantir une exploitation aisée et un entretien efficace, ses dimensions standard sont généralement les suivantes :

- **Largeur:** $l = 1,00 \text{ m}$
- **Longueur:** $L = 1,00 \text{ m}$
- **Hauteur :** $H = 0,70 \text{ m}$

Avec un seuil de répartition d'une hauteur de 0,25 m.



FIGURE 24: REGARD DE REPARTITION.

III.5.2.2.3 Filtre de finition

Ce dispositif de filtration est installé entre la fosse toutes eaux et le regard de répartition, dans le but de filtrer les effluents en sortie de la fosse. Il constitue une étape intermédiaire importante dans le processus de traitement, en retenant les particules résiduelles avant leur distribution vers les bassins filtrants. Ce système est principalement utilisé dans les configurations à flux horizontal, où une filtration supplémentaire est nécessaire en amont des filtres plantés.



FIGURE 25: PHOTOS REPRESENTANT LE FILTRE DE FINITION, COMPOSE D'UN PORTE FILTRE ET UNE EPONGE, AVANT ET APRES UTILISATION (ROKBANE,2023).

III.5.2.3 Dimensionnement de bassin filtrant à écoulement horizontale

D'après Cooper et al [19], le dimensionnement des filtres horizontaux se base sur la détermination de la surface du filtre :

$$A_t = \frac{Q[\ln C_{DBOe} - \ln C_{DBOs}]}{h \times n \times K_T} \quad (12)$$

$$t_r = \frac{A \times h \times n}{Q_{max}} \quad (13)$$

$$K_T = K_R \times \theta_R^{T_w - T_R} \quad (14)$$

- A_t : Surface du filtre (m²)
- Q : Débit moyen journalier arrivant à la station (m³/j)
- C_{DBOe} : Concentration moyenne journalière en DBO₅ à l'entrée (mg/l)
- C_{DBOs} : Concentration moyenne journalière en DBO₅ souhaitée à la sortie (mg/l)
- K_T : Constante de premier ordre qui dépend de la température en j-1
- θ_R : Coefficient de température
- K_R : Constante cinétique à la température de référence en jour⁻¹ ;
- T_w : Température de la zone humide, en °C ;
- T_R : Température de référence, en °C ;
- n : Porosité du gravier
- h : Profondeur du filtre ;
- tr : Temps de rétention ;

Les valeurs de θ_R et de K_r sont représentées dans le tableau ci-dessous

TABLEAU 9: VALEURS DES PARAMETRES K20 ET θ , SELON REFERENCES.

Guide	K ₂₀	θ_R
WPCF (1990)	0.806	1.06
EPA (1993)	1.104	1.06

NB / nous nous sommes basés dans notre étude sur les guides de l'EPA, et de l'APAT, dans ce cas on prend les valeurs K₂₀ =1,104 et θ =1,06.

$$A_t = \frac{403.2[\ln 260 - \ln 30]}{0.6 \times 0.35 \times 0.54} = 7678.16 \text{ m}^2 \quad ts = 4 \text{ j}$$

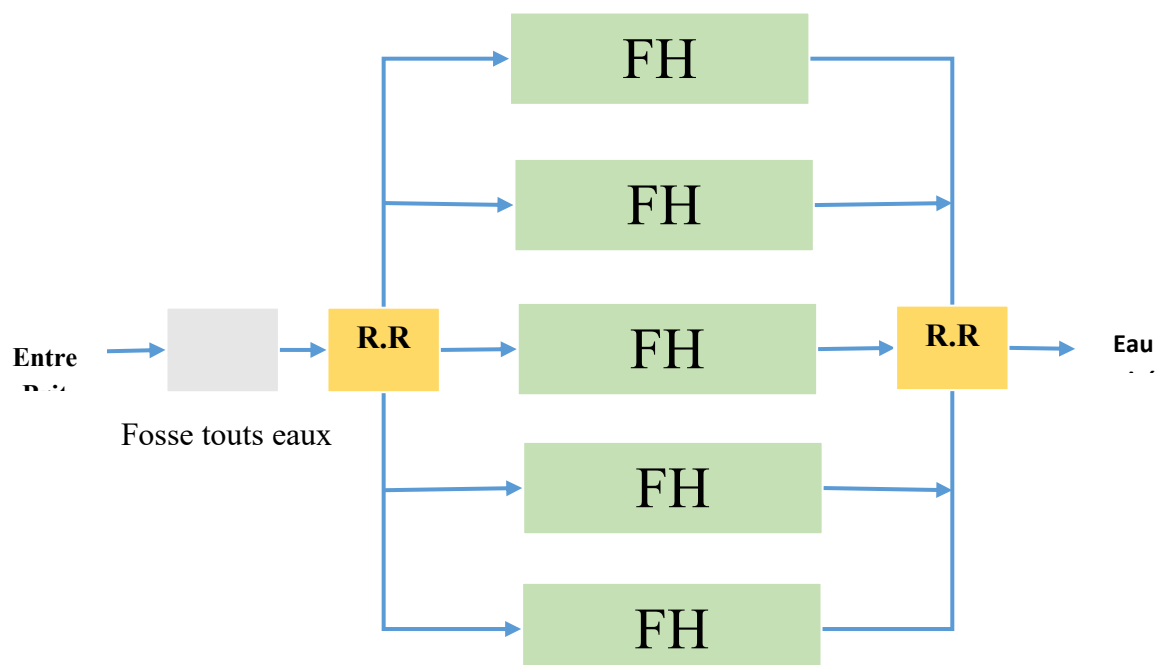


FIGURE 26: PROPOSITION D'UN SYSTEME DE PHYTOEUPURATION HORIZONTAL.

III.5.2.4 Dimensionnement du bassin filtrant à écoulement vertical

La demande en oxygène est calculée sur la base suivante : 1 kg d'O₂ est nécessaire pour éliminer 1 kg de DBO₅, et 4,3 kg d'O₂ sont requis pour oxyder 1 kg de NH₃ [19]. Le dimensionnement du lit vertical est effectué en prenant en compte un coefficient d'aération superficielle de 30 g d'O₂ par m² de surface [25], avec une hauteur fixée à 0,9 m. La superficie obtenue est ensuite majorée de 25 %.

La surface verticale est alors calculée selon la formule suivante :

$$S_v = \frac{DO}{30} \times 1.25 \tag{15}$$

$$DO = Q_{moyj} \times C_{DBO} = 403.2 \times 260 \times 10^{-3} = 92.736 \text{ Kg/j}$$

$$S_v = \frac{92.736}{0.03} \times 1.25 = 3864 \text{ m}^2 \quad ts = 3 \text{ J}$$

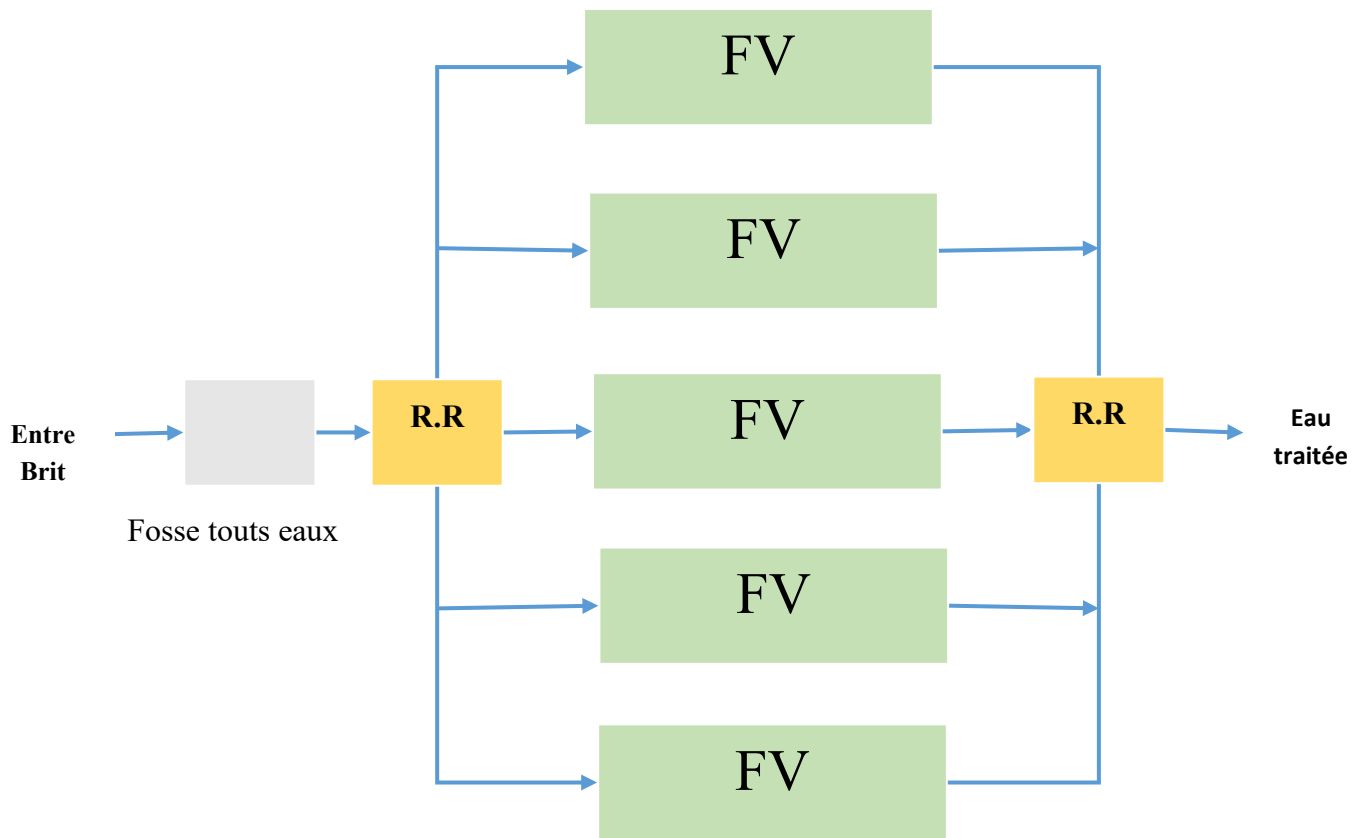


FIGURE 27: PROPOSITION D'UN SYSTEME DE PHYTOEUPURATION VERTICALE

III.4.2.5 Dimensionnement du bassin filtrant à écoulement hybride

III.4.2.5.1 système hybride FV-FH

Nous avons proposé un système hybride composé par 02 bassins le premier à écoulement vertical suivi par un écoulement horizontal.

Le bassin vertical élimine 100 mg/l de DBO₅ et le reste est acheminé vers le bassin horizontale (160 mg/l).

$$S_v = \frac{403.2 \times 100 \times 10^{-3}}{0.03} \times 1.25 = 1680 \text{ m}^2$$

$$A_t = \frac{Q[\ln C_{DBOe} - \ln C_{DBOs}]}{h \times n \times K_T} = \frac{403.2[\ln 160 - \ln 30]}{0.6 \times 0.35 \times 0.54} = 5951.91 \text{ m}^2$$

$$S = 1680 + 5951.91 = 7631.91 \text{ m}^2 \quad ts = 4.4 J$$

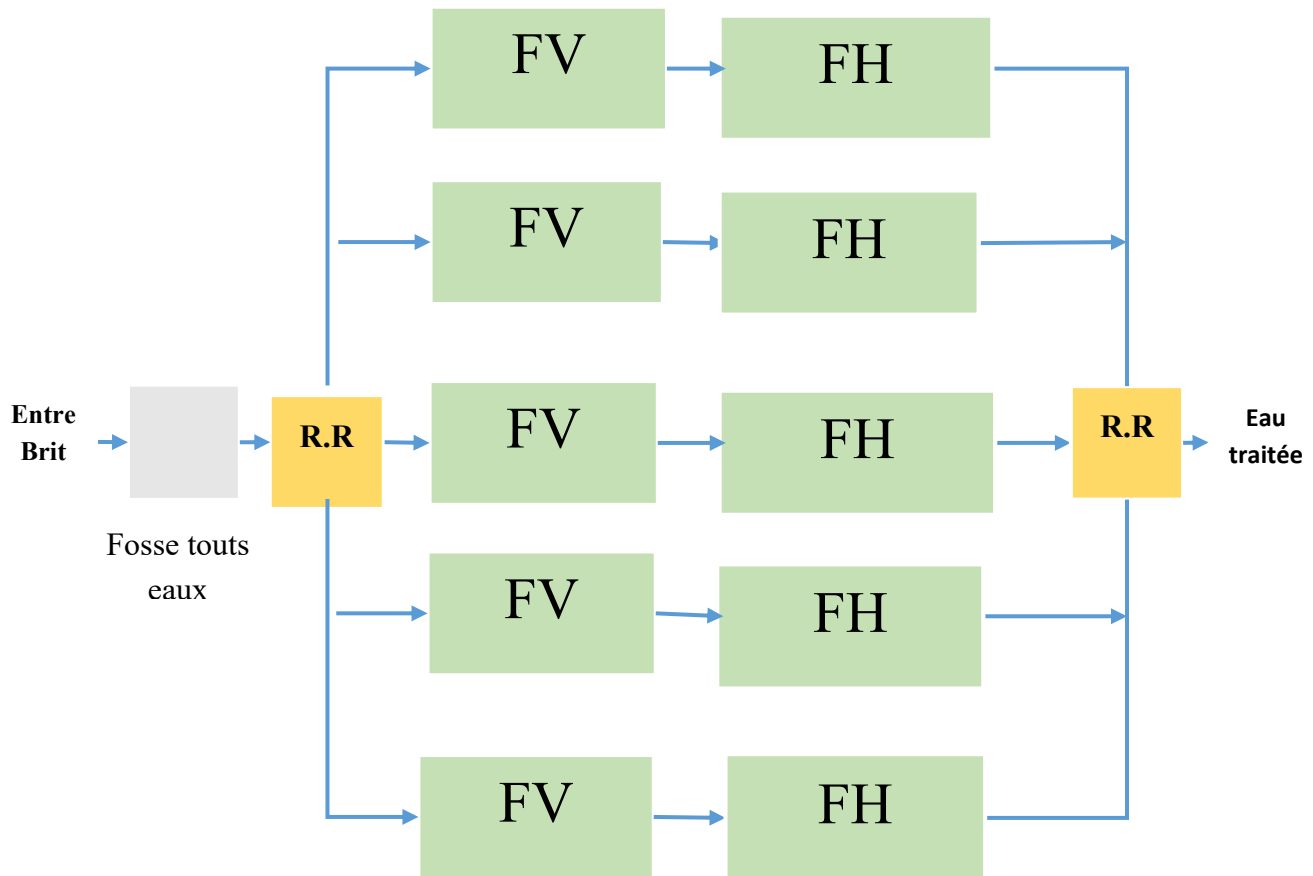


FIGURE 28:PROPOSITION D'UN SYSTEME DE PHYTOEUPURATION FV-FH.

III.4.2.5.2 système hybride FH-FV

Nous proposons un système de traitement hybride des eaux usées composé de deux bassins successifs :

- Le premier bassin, à écoulement horizontale, permet de réduire la DBOs de 100 mg/L.
- L'effluent partiellement traité est ensuite dirigé vers un second bassin, à écoulement verticale, pour un traitement complémentaire.

Mais ce système nécessite un recyclage des eaux usées sortie de bassin vertical à fin de dénitrifier ces eaux usées

$$A_t = \frac{Q[\ln C_{DBOe} - \ln C_{DBOs}]}{h \times n \times K_T} = \frac{403.2[\ln 260 - \ln 160]}{0.6 \times 0.35 \times 0.54} = 1726.25 \text{ m}^2$$

$$S_V = \frac{403.2 \times 130 \times 10^{-3}}{0.03} \times 1.25 = 2184 \text{ m}^2$$

$$S = 1726.25 + 2184 = 3910.25 \text{ m}^2 \quad ts = 2.6 J$$

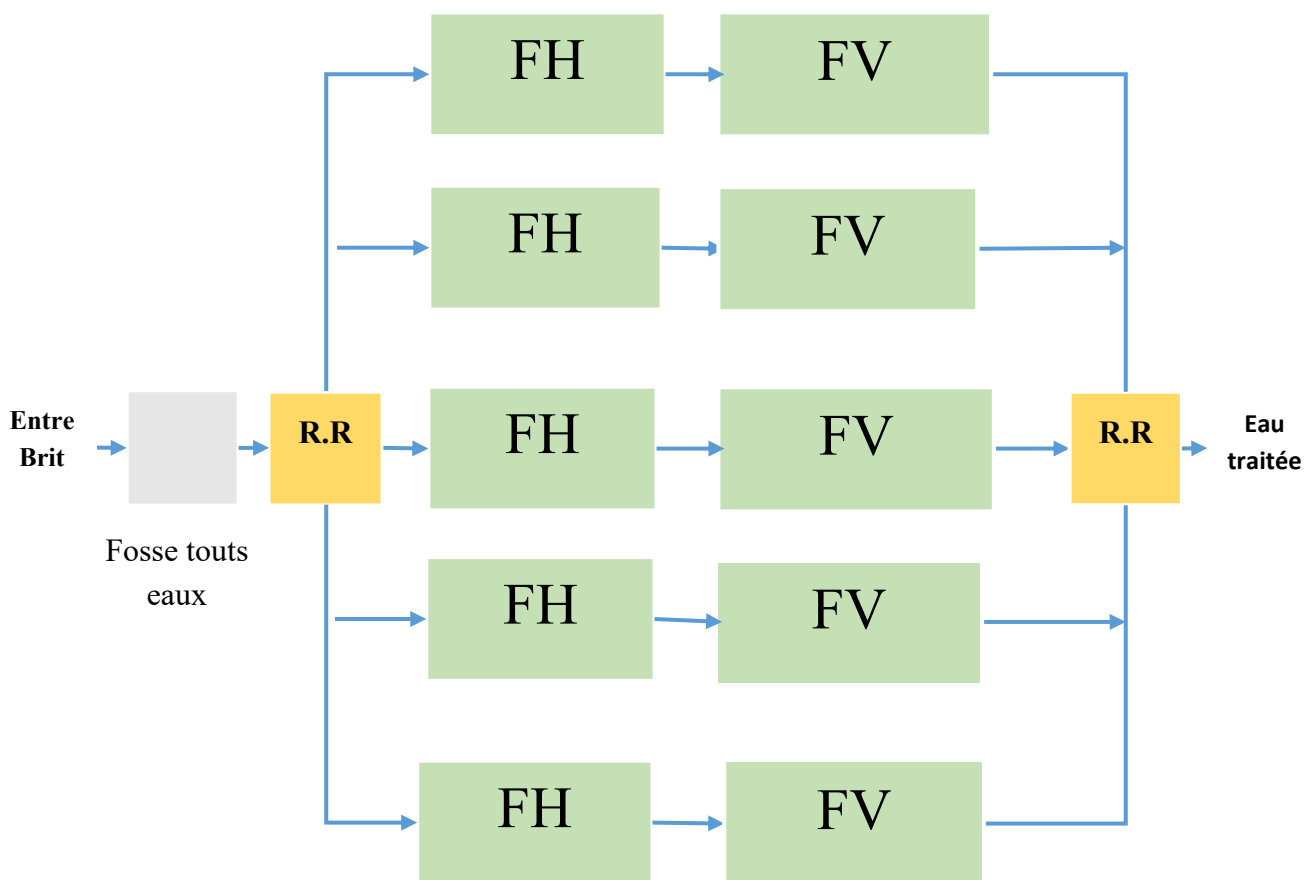


FIGURE 29: PROPOSITION D'UN SYSTEME DE PHYTOEUPURATION FH-FV.

III.4.2.5.3 système hybride FH-FV-FH

Nous proposons un système de traitement des eaux usées composé de trois bassins en série: un bassin à écoulement horizontal (FH) suivi d'un bassin à écoulement vertical (FV), puis d'un deuxième bassin horizontal (FH). Le premier bassin horizontal assure une réduction de 100 mg/L de DBO₅. L'effluent est ensuite dirigé vers le bassin vertical, où 70 mg/L supplémentaires de DBO₅

sont éliminés. Enfin, le second bassin horizontal permet une élimination finale de 60 mg/L de DBO₅, tout en favorisant la dénitrification grâce à des conditions anaérobies. Ce système permet un traitement efficace sans nécessiter de recyclage interne des eaux, tout en respectant les objectifs de dépollution organique et azotée.

$$A_t = \frac{Q[\ln C_{DBOe} - \ln C_{DBOs}]}{h \times n \times K_T} = \frac{403.2[\ln 260 - \ln 160]}{0.6 \times 0.35 \times 0.54} = 1726.25 \text{ m}^2$$

$$S_V = \frac{403.2 \times 70 \times 10^{-3}}{0.03} \times 1.25 = 1176 \text{ m}^2$$

$$A_t = \frac{Q[\ln C_{DBOe} - \ln C_{DBOs}]}{h \times n \times K_T} = \frac{403.2[\ln 90 - \ln 30]}{0.6 \times 0.35 \times 0.54} = 3906.17 \text{ m}^2$$

$$S = 1726.25 + 1176 + 3906.17 = 6808.42 \text{ m}^2 \quad ts = 3.8 J$$

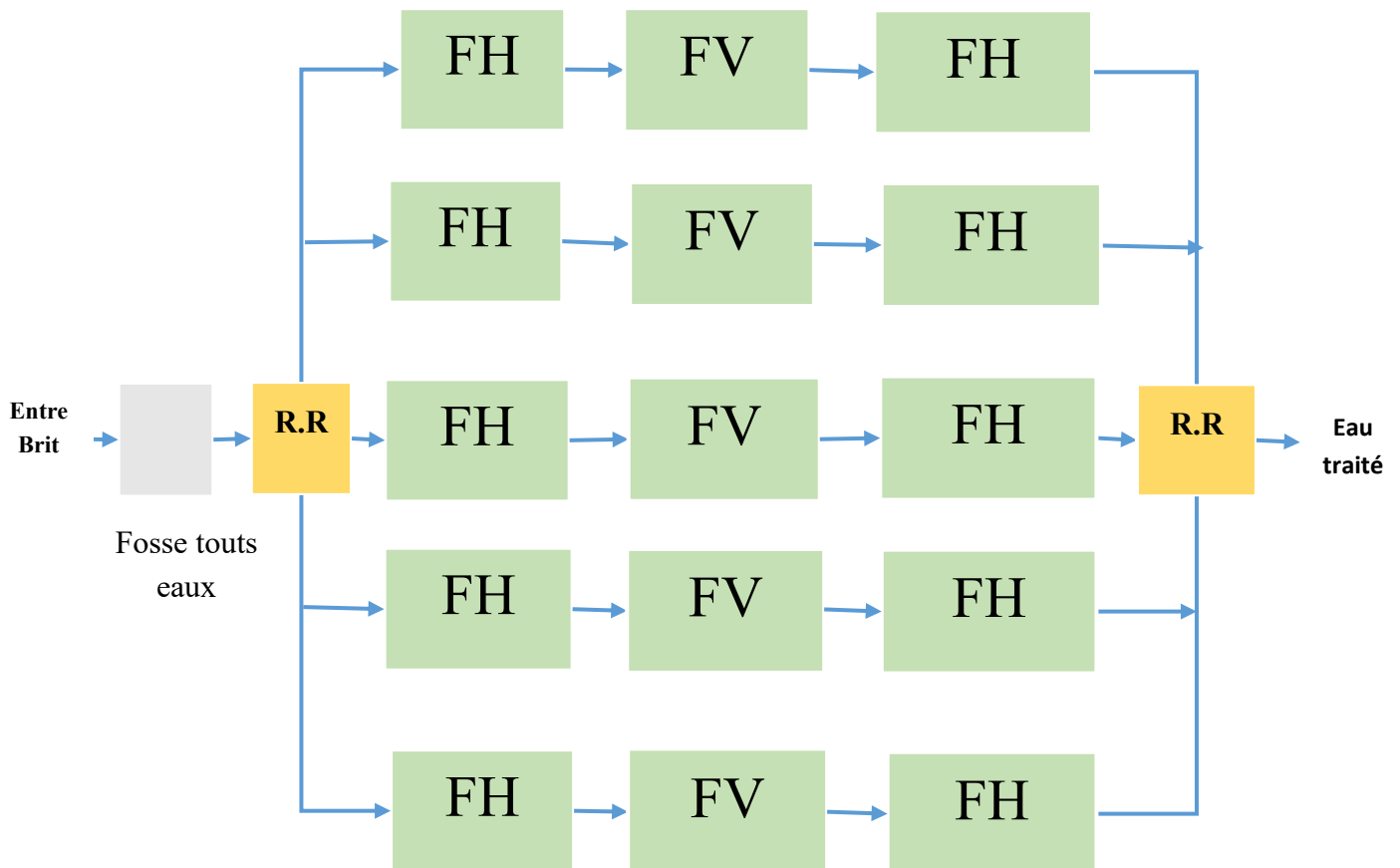


FIGURE 30: PROPOSITION D'UN SYSTEME DE PHYTOEUPURATION FH-FV-FH

III.4.3 Devis estimatif et quantitatif de la station de phytoreparation de configuration FH–FV–FH

TABLEAU 10: DEVIS ESTIMATIF ET QUANTITATIF DE LA STATION DE PHYTOREPARATION DE CONFIGURATION FH–FV–FH

Description détaillée	Unité	Quantité estimée	Prix unitaire (DA)	Montant (DA)
Fourniture et mise en œuvre de gravier lavé pour remplissage des filtres horizontaux et verticaux. Le gravier doit respecter les granulométries recommandées (10-20 mm pour FH, 4-10 mm pour FV), posé en couche homogène après pose de la membrane. Inclut le transport, épandage, et compactage manuel si nécessaire.	m ³	4 255,5	2500,00	10 638750,00
Fourniture et pose de géomembrane PEHD imperméable de 1,5 mm d'épaisseur pour assurer l'étanchéité de tous les bassins. La pose inclut préparation du fond de fouille, géotextile de protection en sous-face, chevauchements soudés, et remontées en rive.	m ²	7 806	1400,00	10 928400,00
Fourniture et pose de conduites PEHD D200mm pour alimentation gravitaire et évacuation entre les bassins. Inclut regards de répartition et de collecte, pièces de raccordement, et pente adaptée pour assurer le bon écoulement.	m	200	2500,00	500000,00
Fourniture et installation de pompes de relevage intermédiaires (pompes submersibles), avec coffret de commande, capteurs de niveau, canalisations de refoulement, et chambre de pompage. Une pompe par série de bassins.	unité	20	100 000,00	2 000000,00
Fourniture et plantation de Typha latifolia dans les bassins végétalisés. Densité de plantation environ 4-5 plants/m ² . Inclut les plants, la main d'œuvre, l'arrosage initial et les protections contre le vent ou le dessèchement.	plant	32 000	50,00	1 600000,00
Terrassement en pleine masse (creusement) pour 6 808 m ² avec profondeur moyenne 0,7 m	m ³	4 766	200	953200,00
Nivellement et compactage des fonds de fouille avant pose membrane	m ²	6 808	1000	6 808000,00
Transport et mise en décharge des déblais issus du terrassement	m ³	4 766	300	1 429800,00
Accès chantier, clôture temporaire, sécurité, signalisation, suivi travaux	lot	1	700000	700000,00
Réalisation d'un regard de répartition en béton armé (1 m x 1 m x 1 m), double nappe T10 incluant terrassement, béton de propreté, parois en béton armé, enduit hydrofuge intérieur, raccordements des tuyaux d'entrée et sortie, pose d'un cadre et tampon fonte classe remblaiement et compactage.	UNITE	25	30000	750000,00

Réalisation d'une fosse toutes eaux de dimensions L = 28,5 m ; l = 9,5 m ; h = 2,0 m, en béton armé dosé à 350 kg/m ³ avec armature en double nappe T12, incluant terrassement, coffrage, ferrailage, coulage du radier, des voiles et de la dalle de couverture, enduit intérieur étanche, trappes d'accès, événements, et remblaiement compacté périphérique.	UNITE	1	1400000	
				1 400000,00
				37 708150,00

Conclusion générale

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'objectif principal de cette étude était d'analyser, concevoir et proposer une station de phytoépuration adaptée pour le traitement des eaux usées de l'agglomération de Guemour, dans la commune d'El Anasser, en tenant compte des aspects techniques, environnementaux et économiques.

Dans un premier temps, une revue des procédés d'épuration a permis d'identifier les limites des systèmes conventionnels, notamment en contexte semi-rural, et de justifier le recours à des technologies alternatives comme la phytoépuration. Cette dernière présente des avantages significatifs en matière de coût, d'intégration environnementale et de simplicité de maintenance.

L'étude des différents types de zones humides artificielles (FH, FV et systèmes hybrides) a permis de comparer leurs performances et de sélectionner la configuration la plus adaptée au contexte climatique et démographique local. Les données collectées sur la population, les débits journaliers et les caractéristiques physico-chimiques des eaux usées ont constitué une base fiable pour le dimensionnement de la station.

Le système proposé, basé sur une configuration hybride FH–FV–FH, a été conçu pour assurer une efficacité épuratoire optimale. Le temps de séjour hydraulique global (HRT) du système est estimé à 3,8 jours, ce qui garantit un traitement suffisant pour atteindre les objectifs de qualité des rejets, notamment en matière de réduction de la DBO₅, de la DCO, des MES et des nutriments.

L'analyse technico-économique a démontré la faisabilité du projet, à la fois sur le plan de l'implantation et sur celui de l'exploitation à long terme. Ainsi, la phytoépuration apparaît comme une solution adaptée aux petites agglomérations ne disposant pas de systèmes d'assainissement centralisés, tout en répondant aux exigences de durabilité environnementale.

Il est recommandé d'envisager la mise en œuvre du projet dans la région de Guemour, tout en planifiant un suivi post-implantation afin de valider les performances en conditions réelles et d'ajuster, si nécessaire, les paramètres de fonctionnement pour une optimisation continue.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] F. Ramade, Dictionnaire encyclopédique des polluants : de l'environnement à l'homme, Ediscience International, 2000.
- [2] J. Rodier, C. Bazin, J.-P. Broutin, P. Chambon, H. Champsaur et L. Rodi, Water Analysis: Natural Waters, Residual Waters, Sea Waters, Paris: Dunod, 2005.
- [3] M. Metahri, «Élimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées par des procédés mixtes. Cas de la STEP Est de la ville de Tizi-Ouzou [Thèse de doctorat, 172 p.]», 2012.
- [4] D. Mara, Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries, UK: Earthscan Publications Ltd. (ou "Duncan Mara" si autoédition), 2003.
- [5] H. Djermakoye, «Les eaux résiduaires des tanneries et des teintureries : Caractéristiques physico-chimiques, bactériologiques et impact sur les eaux de surface et les eaux souterraines», Université de Bamako, Faculté de Médecine, Pharmacie et d'Odonto-Stomatologie, 2005.
- [6] A. Laabassi, «L'épuration des eaux usées par le système de lagunage à macrophytes Thèse de doctorat, 107 pages», Université Ferhat Abbas Sétif 1, 2016.
- [7] F. Rejsek, Analyse des eaux : aspects réglementaires et techniques, Bordeaux (France): CRDP d'Aquitaine, 2002.
- [8] F. Chellé, M. Dellale, M. Dewachter, F. Mapakou et L. Vermey, L'épuration des eaux : pourquoi et comment épurer, p. 15., Office International de l'Eau, 2005.
- [9] V. Lazarova et F. Brissaud, «Intérêt, bénéfices et contraintes de la réutilisation des eaux usées en France : Réutilisation des eaux usées», *L'eau, l'industrie, les nuisances*, n° 1299, p. 29–39, 2007.
- [10] I. Devaux, «Intérêts et limites de la mise en place d'un suivi sanitaire dans le cadre de la réutilisation agricole des eaux usées traitées de l'agglomération clermontoise», Université Joseph Fourier (Grenoble), 1999.
- [11] H. Cauchi, S. D. Nakache, B. Zagury, C. Carré, D. Denis, D. Larbaigt et S. Martigne, «Dossier : la réutilisation des eaux usées après épuration», *Techniques Sciences Méthodes (TSM)*, n° 12, p. 81–118, 1996.
- [12] A. Stoddard, J. B. Harcum, J. T. Simpson, J. R. Pagenkopf et R. K. Bastian, Municipal Wastewater Treatment: Evaluating Improvements in National Water Quality, John Wiley & Sons, 2003.
- [13] FAO, «Wastewater Treatment and Use in Agriculture Bulletin FAO d'irrigation et de drainage», FAO, Rome, 1992.

Références Bibliographiques

- [14] H. Khattabi, «Intérêts de l'étude des paramètres hydrogéologiques et hydrobiologiques pour la compréhension du fonctionnement de la station de traitement des lixiviats de la décharge d'ordures ménagères d'Etueffont (Belfort, France). Institut des Sciences de l'Environn.» 2002.
- [15] K. Seidel, *Die Flechtbinse: Ökologie, Morphologie und Entwicklung, ihre Stellung bei den Völkern und ihre wirtschaftliche Bedeutung*, Schweizerbart, 1955.
- [16] R. H. Kadlec, «Overview: Surface Flow Constructed Wetlands,» chez *Proceedings of the 4th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*, Guangzhou, China, 1994.
- [17] S. D. Wallace et R. L. Knight, *Small Scale Constructed Wetland Treatment Systems: Feasibility, Design Criteria, and O&M Requirements*, Alexandria, VA, USA: Water Environment Research Foundation, 2006.
- [18] R. H. Kadlec et S. D. Wallace, *Treatment Wetlands*. 2nd ed., Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2008.
- [19] P. F. Cooper, G. D. Job, M. B. Green et R. B. E. Shutes, *Reed Beds and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*, Medmenham, UK: WRc Publications, 1996.
- [20] P. F. Cooper, «A review of the design and performance of vertical flow and hybrid reed bed treatment systems,» *Water Science and Technology*, vol. 40, n° 13, p. 1–9, 1999.
- [21] J. Vymazal, «Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands for wastewater treatment,» *Ecological Engineering*, vol. 25, p. 478–490, 2005.
- [22] K. Seidel, *Neue Wege zur Grundwasseranreicherung in Krefeld*. Vol. II. Hydrobotanische Reinigungsmethode, 1965.
- [23] N. H. Johansen et H. Brix, «Design criteria for a two-stage constructed wetland,» chez *Proceedings of the 5th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*, Vienna, 1996.
- [24] C. J. Richardson, «Mechanisms controlling phosphorus retention capacity in freshwater wetlands,» *Science*, vol. 228, p. 1424–1427, 1985.
- [25] H. Brix et H.-H. Schierup, «The use of macrophytes in water pollution control,» *AMBIO*, vol. 18, p. 100–107, 1989.
- [26] J. Vymazal et L. Kröpfelová, *Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow*, Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2008.
- [27] J. Rodier, B. Legube et N. Merlet, *L'Analyse de l'eau*. 9e éd., entièrement mise à jour, Paris: Dunod, 2009.

Références Bibliographiques
