



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريريج

Université de Mohamed Elbachir Elibrahimi - Bordj Bou Arréridj

كلية العلوم والتكنولوجيا

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

قسم هندسة المحيط

DEPARTEMENT DE GENIE DE L'ENVIRONNEMENT

Memoire

En vue de L'obtention du Diplôme de Master
Spécialité : Génie des procédés de l'environnement

THEME

**Étude expérimentale d'une zone humide artificielle
pour le traitement des eaux usées municipales**

Présenté et soutenu Par :

Boughida Lina

Debah Lynda

Le : 22/06/2024

Devant le jury composé de :

Ayeche Riad	Professeur	UniversitéBordjBouArréridj	Président
Rokbane abdelmadjid	MCB	UniversitéBordjBouArréridj	Encadreur
Zorai Ameur	Dr	UniversitéBordjBouArréridj	Co- Encadreur
Messis Abdelaziz	Professeur	UniversitéBordjBouArréridj	Examineur

Année Universitaire : 2023/2024

Dédicace

À ceux qui rendent ma vie spéciale, à ma chère maman **Naïma** et mon papa **Amiroche**,

Vous êtes mes piliers, ma source d'inspiration et mes plus grands soutiens. Merci pour votre amour inconditionnel et vos sacrifices. Je vous aime plus que tout.

À ma chère tante **Ouchene Djega**, ta gentillesse, ta sagesse et ton amour ont illuminé mon chemin. Je suis reconnaissante d'avoir une tante aussi merveilleuse que toi.

À mes chers grands-parents, vous êtes les gardiens de nos traditions, les conteurs de notre histoire familiale. Merci pour votre affection et vos précieux enseignements qui me guident chaque jour.

À mes chères sœurs et frères, **Aya, Hiba Amine** et **Anas** à travers les rires et les défis, vous avez toujours été mes compagnons de vie les plus chers. Votre soutien indéfectible et votre amour inconditionnel ont façonné mes souvenirs les plus précieux. Merci pour chaque moment partagé, pour chaque épaule sur laquelle je peux m'appuyer. Je suis reconnaissante d'avoir chacune de vous à mes côtés.

À mes chers oncles, tantes, **Toufik Mouloud Adel Hamza** et **Lounas Maria Zahra Rachida Thaldja**.

À mes cousins et cousine et spécialement mes cousines **Ines wiam Nabila amoura anissa aya**

Chaque moment partagé avec vous est un trésor. Merci d'être une famille si chaleureuse et unie, où l'amour et le soutien sont toujours présents.

À mes amis dans mon parcours académique: **Zogham Manel, Zaidi Isra, Bouchibane Amina, amina Baya, Nada, Hadjer**. Vous avez été mes compagnons de route, mes partenaires dans la découverte du savoir. Nos rires, nos épreuves et nos succès ont fait de notre parcours académique une aventure inoubliable.

À vous tous, je suis reconnaissante de chaque instant précieux partagé ensemble. Vous avez enrichi ma vie de manière incommensurable et je suis fière de vous avoir dans ma vie.

Avec tout mon amour et ma reconnaissance,

LINA Boughida

Dédicace

Avec tous mes sentiments de respect, avec expérience de ma reconnaissance, je dédie ma remise de diplôme et ma joie.

A mon paradis, à la prunelle de mes yeux, à la source de ma joie et mon bonheur, ma lame et le fil d'espoir qui allumés mon chemin, ma moitié

Maman

À celui qui ma fait une femme, ma source de vie d'amour et d'affection à mon support qui était toujours à mes côtés pour me soutenir et m'encourage à

Mon prince papa

À mes frère **Belgasse, Rachid, Mahdi, Iskander**, pour l'amour qui il me réserve

À ma grande sœur **Basma**, qui n'ont pas cessée de me conseiller encourager et soutenir tout au long de mes études

À tous les membres de ma grande famille, mestantes et mes cousines

A mes encadreurs **Mr Roukban, et Mr Zorai**

A tous mes collègues de 2 ème année Master gènie de procèdes

À tous ce qui on participe à ma réussite et tous qui m'aiment

LINDA Debbah

Reerciement

Nous remercions dieu tout puissant de nous avoir donné le courage, la force et la volonté pour achever ce modeste travail. Nos sincères remerciements à nos encadreurs, de mémoire Mr **Rokbane Abed El Madjid** et Mr **Zorai Ameur** professeurs à l'Université de **Mouhamed El Bachir El I brahimi BBA**, pour votre guidance éclairée, votre patience et vos précieux conseils tout au long de ce parcours. Votre expertise, vos encouragements et votre soutien ont été des sources d'inspiration constantes et nous ont poussés à donner le meilleur de nous-mêmes. Nous vous sommes profondément reconnaissants pour le temps et l'énergie que vous avez investis dans notre développement académique et professionnel. A Mr **karess Housseem El din** nous tenons à vous exprimer mes sincères remerciements pour le soutien et le leadership exceptionnels dont vous avez fait preuve en tant que chef du département de Génie **des procédés de l'environnement**. Votre dévouement et votre engagement ont grandement contribué à la réussite de nombreux projets et à l'amélioration continue de notre département. Votre expertise et votre vision stratégique ont non seulement permis de surmonter des défis complexes, mais ont également inspiré et motivé l'ensemble de l'équipe. Votre approche collaborative et votre capacité à écouter et à valoriser les idées de chacun ont créé un environnement de travail enrichissant et stimulant. Nous tenons également à remercier les membres du jury Mr **Messis A.Aziz** et Mr **Ayeche Riyadh** d'avoir accepté de juger notre travail, c'est un honneur pour nous que d'avoir l'occasion de discuter les résultats de nos recherches avec vous.

A Monsieur **Ahmed Bahloul**, Nous souhaitons vous exprimer notre profonde reconnaissance pour l'accompagnement et le soutien offerts en tant que guide au laboratoire. Votre expertise et votre pédagogie claire ont fait de vous un mentor exceptionnel.

Aux ingénieurs, **Mesdames Farida, Ahlem** et **Maria** nous tenons à vous exprimer notre profonde gratitude pour votre soutien et votre expertise au laboratoire de génie des procédés. Votre dévouement et vos compétences ont été essentiels à la réussite de nos projets. Grâce à vous, nous avons pu surmonter de nombreux défis et atteindre nos objectifs avec succès. Nous tenons également à remercier tous ceux qui m'ont apporté leur aide de près ou de loin et nous a aidé à développer notre projet fin des études.

Boughida Lina et Debbah

المخلص

تصميم وتنفيذ معالجة مياه الصرف الصحي أمر لا مفر منه بسبب الآثار السامة لمياه الصرف الصحي على المحاصيل والتربة وصحة الإنسان. التحقيق الحالي هو المحاولة الرائدة لنظام الأراضي الرطبة الهجين التجريبي الذي تم بناؤه لمعالجة مياه الصرف الصحي لمدينة العناصر بالجزائر. ويتألف هذا النوع من الأراضي الرطبة المشيدة ذات التدفق الرأسي تحت السطح (BVFCW1) ، والأراضي الرطبة المشيدة ذات التدفق الأفقي تحت السطح (HFCW) ، وتسمى المخرج الأول S1 ، والأراضي الرطبة المشيدة ذات التدفق الرأسي تحت السطح (BVFCW2) وتسمى المخرج الثاني S2 ، وهي متصلة في سلسلة ، وتم زرعها بـ : 36 نوعاً/م² من تيفا لاتيفوليا. وكانت النسب المئوية النهائية لكفاءة المعالجة المسجلة لمعاملات نوعية المياه المستخرجة من المياه الأرض الرطبة هي كما يلي: الموصلية الكهربائية (49.59٪) ، المواد الصلبة الذائبة (23.00٪) ، الملوحة (52.64٪) ، التعكر (95.24٪) ، المواد الصلبة العالقة (90.14٪) ، الطلب الكيميائي على الأكسجين (83.91٪) ، الطلب البيولوجي للاكسجين (96.00٪) ، على التوالي. تم تحسين القضاء على الملوثات من قبل HCW المخرج 2 بمعدلات: الموصلية الكهربائية (11.80٪) ، المواد الصلبة الذائبة (11.27٪) ، الملوحة (10.96٪) ، التعكر (1.77٪) ، المواد الصلبة العالقة (6.04٪) ، الطلب الكيميائي على الأكسجين (6.95٪) ، الطلب البيولوجي للاكسجين (1.51٪) ، على التوالي. وكشفت النتائج HCW المخرج 1 يعد خياراً جيداً لمعالجة مياه الصرف الصحي مقارنة بتقنيات المعالجة التقليدية الأخرى باهظة الثمن. حيث تم تحسين القضاء على الملوثات HCW المخرج 2 . كما تم الكشف أن وجود النباتات وأنواع التدفق العمودي المحير والافقي لها دور مؤثر في معالجة مياه الصرف الصحي. بالإضافة إلى ذلك ، يمكن الاستنتاج أن النظام الهجين يمكن أن يحسن كفاءة إزالة الملوثات بشكل أفضل من الأراضي الرطبة المبنية بشكل فردي.

الكلمات دالة: الأراضي الرطبة، مياه الصرف الصحي، التدفق الأفقي، التدفق العمودي

Résumé

La conception et la mise en œuvre du traitement des eaux usées sont inévitables en raison des effets toxiques des eaux usées sur les cultures, le sol et la santé humaine. L'enquête en cours est la tentative pionnière d'un système de zones humides hybrides à échelle expérimentale (HCW) construit pour le traitement des eaux usées municipales de la ville d'El-Anasser, Algérie. Le HCW était composé d'une zone humide construite à écoulement dérivé vertical sous la surface (BVFCW1), une zone humide construite à écoulement horizontal sous la surface (HFCW), nommé la première sortie S1, et d'une zone humide construite à écoulement dérivé vertical sous la surface (BVFCW2) nommé la deuxième sortie S2, connectés en série, plantées par 36 espèces/m² de *Typha latifolia*. Les pourcentages finals d'efficacité du traitement enregistrés pour les paramètres de qualité de l'eau récupérée de HCW étaient les suivants: EC (49.59%), TDS (23.00%), salinité (52.64%), turbidité (95.24%), MES (90.14%), DCO (83.91%), DBO5 (96.00%), respectivement. L'élimination des polluants a été améliorée par BVFCW2 à des taux de : EC (11.80%), TDS (11.27%), salinité (10.96%), turbidité (1.77%), MES (6.04%), DCO (6.95%), DBO5 (1.51%), respectivement. Les résultats ont révélé que la HCW- S1 est une bonne option pour le traitement des eaux usées par rapport à d'autres technologies de traitement conventionnelles coûteuses. Où l'élimination des polluants s'est améliorée au HCW-S2. Il est également révélé que la présence de plantes et les types d'écoulement à un rôle influent dans le traitement des eaux usées. De plus, on pourrait conclure qu'un système hybride pourrait améliorer l'efficacité de l'élimination des polluants mieux que les CWs individuellement.

Mot clés: Zones humides, Eaux usées, Ecoulement horizontal, Ecoulement vertical

Abstract

The design and implementation of wastewater treatment is inevitable due to the toxic effects of wastewater on crops, soil and human health. The current investigation is the pioneering attempt of an experimental-scale hybrid constructed wetland system (HCW) built for the treatment of municipal wastewater from the city of El-Anasser, Algeria. The HCW was composed of a constructed wetland with vertical baffled flow below the surface (BVFCW₁), a constructed wetland with horizontal flow below the surface (HFCW), named the first exit S1, and a constructed wetland with vertical baffled flow below the surface (BVFCW₂) named the second exit S2, connected in series, planted by 36 species/m² of *Typha latifolia*. The final percentages of treatment efficiency recorded for the quality parameters of the water recovered from HCW were as follows: EC (49.59%), TDS (23.00%), salinity (52.64%), turbidity (95.24%), MES (90.14%), COD (83.91%), BOD₅ (96.00%), respectively. The elimination of pollutants was improved by BVFCW₂ at rates of: EC (11.80%), TDS (11.27%), salinity (10.96%), turbidity (1.77%), MES (6.04%), COD (6.95%), BOD₅ (1.51%), respectively. The results revealed that HCW-S₁ is a good option for wastewater treatment compared to other expensive conventional treatment technologies. Where the elimination of pollutants has improved at HCW-S₂. It is also revealed that the presence of plants and the types of flow have an influential role in the treatment of wastewater. In addition, it could be concluded that a hybrid system could improve the efficiency of pollutant removal better than individually constructed wetlands.

Key words: wetlands, wastewater, horizontal flow, vertical flow

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	01
Chapitre I Epuration des eaux usées par les zones humides artificielles plantées de macrophytes (Constructed wetland)	
I.1. Introduction	06
I.2. Zones humides artificielles « Constructed Wetland » (CWs)	06
I.3. Historique des CWs	07
I.4. Technologie de traitement par les CWs	07
I.5. Composantes des CWs	07
I.5.1. Hydrologie des CWs	07
I.5.2. Matériaux de remplissage des CWs	08
I.5.3. Végétaux des CWs	08
I.5.4. Microorganisme	09
I.5.5. Animaux aquatiques	09
I.6. Différents schémas des CWs	09
I.6.1. CWs à écoulement horizontal superficiel « Free Water Surface » (FWS) 09	
I.6.2. CWs à écoulement sous-surfacique (SSFS)	10
I.6.2.1. CWs sous-surfacique à flux horizontal (HFCW)	11
I.6.2.2. CWs sous-surfacique à flux vertical (VFCW)	12
I.6.3. CWs à écoulement hybride (HCW)	14
I.7. Principe de mécanismes des zones humides artificielles	15
I.7.1. Processus physiques	15
I.7.2. Processus chimique	15
I.7.3. Processus biologiques	16
I.8. Avantage et Inconvénients	16
I.8.1. Avantage des CWs	16
I.8.2. Inconvénients des CWs	16
I.9. Conclusion	17
Chapitre II Matériels et méthodes	
II.1. Introduction	20
II.2. Description de la zone de recherche et des Installations	20
II.2.1. Situation de la ville d'El-Anasser	20
II.2.2. Pilote expérimental	20
II.2.3. Espèces végétales utilisés pour les expériences	23
II.3. Echantillonnage, calcul et analyse statistique	23
II.3.1. Protocole de mesure du pH et de la température des eaux usés	24
II.3.2. Protocole de mesure de la conductivité, la salinité et SDT de l'eau usée	25
II.3.3. Protocole de mesure de la turbidité de l'eau usée	26
II.3.4. Protocole de mesure DBO₅ de l'eau usée	28
II.3.5. Protocole de mesure DCO de l'eau usée	29
II.3.6. Protocole de mesure de l'OD de l'eau usée	30
II.3.7. Protocole de mesure MES des eaux usées	31
II.4. Conclusion	32

Chapitre III | Résultats et Interprétations

III.1. Introduction.....	36
III.2. Caractérisation des eaux usées municipales.....	36
III.3. Evaluation des paramètres physico-chimiques	37
III.3.1. Température (T)	38
III.3.2. Potentiel Hydrogene (pH).....	39
III.3.3. Conductivité électrique (CE)	41
III.3.4. Salinité.....	42
III.3.5. Solides dissous totaux (SDT).....	43
III.3.6. Matière en suspension (MES).....	45
III.3.7. Turbidité (TUR).....	47
III.3.8. Coefficient de biodégradabilité (Rapport DCO/ DBO ₅).....	48
III.3.9. Oxygène dessous (OD)	48
III.3.10. Demande chimique en oxygène (DCO).....	50
III.3.11. Demande biochimique en oxygène (DBO ₅)	52
III.4. Conclusion.....	53
Conclusion générale	55
Références bibliographiques	
Annexe I	

Liste des figures		
Figures	Titre	Page
Partie I : Synthèse bibliographique		
Chapitre I : Epuration des eaux usées par les zones humides artificielles plantés de macrophytes (Constructed wetland)		
Figure I.01	CWs à écoulement horizontal superficiel	10
Figure I.02	CWs sous-surfacique à flux horizontal	12
Figure I.03	Conduite perforée pour la distribution sous-superficielle	12
Figure I.04	CWs sous-surfacique à flux vertical	13
Figure I.05	Photo d'un système d'évacuation d'un filtre vertical	14
Figure I.06	Configuration de système hybride	15
Partie II : Partie Expérimentale		
Chapitre II: Matériels et méthodes		
Figure II.01	Situation géographique de la ville d'El-Anasser	20
Figure II.02	Photo du système des HCWs expérimentale	21
Figure II.03	Disposition du système des HCWs, et les sections transversale de HCWs	22
Figure II.04	Photo présentant l'espèce <i>Typha latifolia</i>	23
Figure II.05	pH mètre (inoLab PH7110)	24
Figure II.06	Conductimètre (inoLab Cond7110)	26
Figure II.07	Turbidimètre (TB 300 IR)	27
Figure II.08	DBO-mètre WTW OxiTop Box	28
Figure II.09	(a) Réactifs pour la mesure de la DCO, (b) Thermomètre (CR2200), et (c) Photomètre (Photo Flex)	30
Figure III.10	(a) Fiole à vide, (b) entonnoir, (c) pompe à vide, (d) Dessiccateur, (e) Etuve, et Papiers filtre (90 mm)	31
Partie III Résultats et Interprétations		
Chapitre III Résultats et Interprétations		
Figure III.01	Variation de la T des eaux usées avant et après le traitement	39
Figure III.02	Variation du pH des eaux usées avant et après traitement	40
Figure III.03	Variation de la CE des eaux usées avant et après traitement	42
Figure III.04	Variation de la salinité des eaux usées avant et après traitement	43
Figure III.05	Variation du SDT des eaux usées avant et après traitement	45
Figure III.06	Variation de la MES des eaux usées avant et après traitement et performance épuratoire du HCW	47
Figure III.07	Variation de la turbidité des eaux usées avant et après traitement	48
Figure III.08	Variation des valeurs moyennes de l'OD des eaux usées avant et après traitement	50
Figure III.09	Variation des valeurs moyennes de la DCO des eaux usées avant et après traitement	52
Figure III.10	Variation des valeurs moyennes de la DBO ₅ des eaux usées avant et après traitement	53

Abréviations

BVFCW	: Baffled vertical constructed wetland
CWs	: Constructed Wetlands (Zones Humides artificielles)
DBO	: Demande biochimique en oxygène durant cinq (05) jours d'incubation
DCO	: Demande chimique en oxygène
FWS	: Free water flow wetlands (Zone humide à écoulement horizontal superficiel)
HCW	: Hybrid Constructed Wetlands (zone humide à écoulement hybride)
HFCW	: Horizontal flow constructed Wetland (zones humide à écoulement horizontal)
ISO	: Organisation internationale de normalisation
K	: Facteur de biodégradabilité
LCK	: Système de Tests en cuve LCK
MES	: Matière en suspension
MMS	: Matières minérales sèches
MO	: Matières Organiques
NTU	: Nephelometric Turbidity Unit
OD	: Oxygène dissous
pH	: Potentiel d'Hydrogène
SDT	: Solides dissous totaux
VFCW	: Vertical flow constructed Wetland (zones humide à écoulement vertical)

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

L'Algérie, située en Afrique du Nord, est confrontée à une grave pollution de l'eau due à divers facteurs. Les émissions industrielles, les eaux usées non traitées et les effluents agricoles sont les principales sources de contamination de l'eau en Algérie. (Ibtissem et al, 2015). Les contaminants polluent les rivières, les lacs et les eaux côtières, mettant en danger les organismes aquatiques et le bien-être humain (Ternes et al, 2015). En outre, l'insuffisance des infrastructures de traitement des eaux usées entraîne le rejet d'eaux usées non traitées dans les rivières et les océans.

Les techniques classiques d'épuration des eaux usées sont utilisées depuis de nombreuses années pour éliminer contaminants des eaux usées avant leur rejet dans l'environnement. Ces méthodes impliquent généralement des processus physiques, chimiques et biologiques pour purifier l'eau. Bien que ces techniques aient démontré leur performance dans le traitement des eaux usées, elles présentent également de nombreux avantages et inconvénients (Grégorio & Lichtfouse, 2018). L'un des inconvénients des méthodes de traitement traditionnelles est leur capacité limitée à traiter certains types de polluants et peut être énergivore, nécessitant d'importantes quantités d'électricité pour faire fonctionner des machines telles que des pompes, des ventilateurs et des agitateurs. Cela peut entraîner des dépenses élevées et des émissions de gaz à effet de serre (Capodaglio et al, 2020). Les méthodes traditionnelles de traitement des eaux usées ont leurs avantages et leurs inconvénients. Bien qu'ils aient joué un rôle déterminant dans le traitement efficace et fiable des eaux usées, ils ont également des limites qui doivent être abordées. En comprenant les avantages et les inconvénients de ces méthodes, nous pouvons travailler au développement de solutions plus durables et efficaces pour le traitement des eaux usées à l'avenir (Yaqoob et al, 2023).

L'Algérie est confrontée à des défis importants en matière de gestion des eaux usées, avec une infrastructure disponible insuffisante pour répondre à la demande croissante de traitement des eaux usées. Le pays génère environ 1.5 milliard de mètres cubes d'eaux usées par an. Cependant, seulement 10% d'entre eux sont traités et le reste est rejeté dans l'environnement, provoquant une grave pollution et présentant un risque pour la santé publique (Talbi & Al Any, 2022). Les installations actuelles de traitement des eaux usées en Algérie sont obsolètes, la plupart ayant été construites il y a plusieurs décennies. Par conséquent, ils ne peuvent pas gérer le volume accru d'eaux usées généré en raison de la croissance démographique et des activités industrielles. Il y a également un manque de pratiques d'assainissement appropriées, de nombreux ménages et entreprises se

débarrassant de leurs eaux usées de manière inappropriée. Cependant, des efforts importants sont encore nécessaires pour parvenir à une gestion durable des eaux usées en Algérie (Aroua-Berkat & AROUA, 2022). Il est essentiel pour le pays de mettre en place une stratégie à long terme qui assure des pratiques efficaces pour le traitement des eaux usées. En poursuivant ses investissements dans la construction d'infrastructures et la mise en place de solutions durables, le pays peut réaliser ses objectifs de gestion des eaux usées efficaces et préserver l'environnement pour les générations à venir (Silva, 2023). Afin de trouver des solutions durables pour le traitement des eaux usées, les zones humides artificielles appelées « Constructed wetland» (CWs) sont apparues comme une solution prometteuse. Cependant, les technologies des CWs ont été introduites en Afrique depuis environ 30 ans, mais ces technologies rustiques n'ont pas encore trouvé leur place dans les concepts d'assainissement et de traitement des eaux usées en Algérie. L'expérience algérienne était limitée à trois stations. Il a été introduit expérimentalement dans la localité de Témachine et dans la localité de N'goussa (région d'Ouargla) (ONA, 2019).

Les CWs peuvent être visualisées comme des zones humides sont délibérément créées pour atteindre des objectifs spécifiques. Les CWs utilisent principalement des éléments naturels tels que le sol, l'eau et les organismes vivants. La conception de ces structures vise à reproduire les processus et fonctions physiques, chimiques et biologiques essentiels des zones humides naturelles, dans le but d'atteindre les objectifs visés (White et al., 1996). Il existe différents types de CWs, à savoir: les zones humides d'eau de surface, les zones humides souterrain et les zones humides naturel tels que décrits par Kadlec et Knight (1996). De plus, des systèmes hybrides sont utilisés, fusionnant divers systèmes pour améliorer mutuellement leurs fonctionnalités. Souvent, une phase initiale de traitement est intégrée pour éliminer les matières en suspension totales (MES) et éviter le colmatage des substrats (Pedescoll et al., 2011).

Dans le domaine d'épuration des eaux usées, des solutions innovantes sont constamment explorées pour améliorer l'efficacité et la durabilité. Le dispositif expérimentale à écoulement hybride (BVFCW + HFCW + BVFCW) installée à la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université de Bordj Bou Arreridj en Algérie est un excellent exemple de ces avancées. Cette station de recherche explore les subtilités d'un système composé de divers composants, notamment un réservoir de stockage, des CWs à écoulement vertical (BVFCW), une CW à écoulement horizontal (HFCW).

OBJECTIFS DE LA MEMOIRE

La recherche vise principalement à exploiter la végétation aquatique des CWs afin de traiter les eaux usées des communes en minimisant la consommation d'énergie, les coûts et les entretiens. De plus, l'objectif est d'évaluer un système de traitement des eaux usées à flux hybride (HCW) dans la région d'El-Anasser en Algérie. En analysant l'effet des facteurs, le temps de rétention et les types d'écoulement, il est possible de déterminer les conditions de purification optimales.

Les buts particuliers comprennent : l'étude des propriétés des eaux usées, la détermination des indicateurs de pollution, l'évaluation de l'efficacité des plantes aquatiques différentes conditions de débit et l'évaluation de l'efficacité du traitement des eaux usées.

ORGANISATION DE LA MEMOIRE

Afin d'atteindre notre but, nos efforts sont structurés en trois parties : Dans la section théorique, il y a un chapitre qui décrit en détail le processus de purification de l'eau dans les CWs. Le chapitre expérimental comprend une description de la localisation géographique de la zone d'étude, des méthodes expérimentales et des techniques utilisées pour l'analyse physico-chimique des eaux usées. La partie finale décrivant les résultats et les interprétations est consacrée au troisième chapitre, qui explore l'analyse et l'explication des résultats obtenus.

Partie 1 | Synthèse bibliographique

**Chapitre I | Epuration des eaux usées par
les zones humides artificielles plantées de
macrophytes (Constructed wetland)**

Chapitre I / Epuration des eaux usées par les zones humides artificielles plantées de macrophytes « Constructed wetland »**I.1. Introduction**

L'eau est une ressource vitale pour l'homme, essentielle à sa survie, son alimentation, ses activités agricoles, industrielles et touristiques, ainsi qu'à la qualité de son environnement. Cependant, avec l'expansion urbaine et l'évolution des modes de consommation, les réserves d'eau potable s'épuisent plus rapidement tandis que le volume d'eaux usées collectées et rejetées, bien souvent sans traitement préalable, dans la nature ne cesse d'augmenter.

De nos jours, le traitement des eaux usées est devenu essentiel sur le plan environnemental que social, car un effluent non traité constitue une source de contamination du milieu naturel et de dangers pour la santé des populations. Malgré son efficacité, les techniques traditionnelles de traitement présentent certaines contraintes : la production de boues et les coûts d'investissement élevés. Il est donc nécessaire de rechercher des solutions de traitement à la fois économiques et efficaces.

Dans cette perspective, les systèmes de CW sont une solution appropriée pour traiter les eaux usées. Fonctionnant comme des bioréacteurs, ils permettent d'épurer les effluents en éliminant les composés biodégradables et non biodégradables, ainsi que les micro-organismes pathogènes.

I.2. Zones humides artificielles « Constructed Wetland » (CWs)

Les CWs sont des habitats conçus pour imiter les processus écologiques naturels de traitement des eaux usées. Ils sont composés de plantes, de substrats, de microbes et de l'eau. Ces techniques d'épuration utilisent une gamme de processus physiques, chimiques et biologiques pour éliminer différentes formes de pollution et améliorer la qualité des eaux usées.

La plante joue un rôle important dans la purification de l'eau, tandis que les microorganismes dégradent les contaminants organiques. Les systèmes CWs des eaux usées constituent un substitut écologique et rentable aux méthodes traditionnelles de traitement des eaux usées. Ils sont fréquemment utilisés dans les régions rurales ou périurbaines pour la purification de l'eau domestiques et industrielle (Vymazal, 2011).

I.3. Historique des CWs

L'histoire des CWs remonte à l'Antiquité, quand les Égyptiens utilisaient des lits de roseaux pour épurer les eaux usées. Des techniques de traitement des eaux usées à l'aide de CWs ont été développées par diverses cultures au cours des siècles, telles que les Chinois,

les Incas, les Romains et les Grecs. Mais ce n'est qu'à la fin du XIXe siècle qu'a été mise au point en Europe la technologie moderne des CWs. Dans les années 1950, les premiers CWs modernes ont été érigés en Allemagne, où ils ont été employés pour le traitement des eaux usées industrielles. Progressivement, les CWs ont gagné en popularité à travers le monde, devenant une méthode très prisée pour le traitement des eaux usées dans les régions rurales et périurbaines. De nos jours, les personnes (Vymazal, 2022).

I.4. Technologie de traitement par les CWs

Les CWs représentent une approche novatrice dans le domaine de traitement des pollutions aquatiques. Leur application est vaste, couvrant aussi bien les effluents agricoles et industriels que les eaux de ruissellement urbain et les lixiviats des décharges. Cette méthode, qui gagne en popularité, se distingue par son caractère écologique et sa pérennité dans le traitement des eaux usées (Wu Hai-ming et al., 2015). Les CWs démontrent une grande polyvalence, étant capables de traiter les eaux grises domestiques (Vymazal, 2013a), les rejets industriels et les eaux pluviales. En outre, elles ouvrent la voie à la réutilisation des eaux traitées, notamment pour l'irrigation agricole et d'autres usages ne nécessitant pas une qualité d'eau potable.

I.5. Composantes des CWs

Les CWs reposent sur trois éléments fondamentaux : l'eau, le substrat et la végétation. La conception et la mise en place de ces systèmes nécessitent une planification de chacun de ces composants. Il est important de considérer attentivement la qualité de l'eau à traiter, de sélectionner le substrat approprié et de choisir des espèces végétales adaptées pour optimiser l'efficacité du traitement.

I.5.1. Hydrologie des CWs

Dans les CWs l'eau joue un rôle important et polyvalent. Elle crée un milieu favorable à la croissance des plantes et à l'activité microbienne, tout en fournissant de l'oxygène aux microorganismes aérobies essentiels à la dégradation de la matière organique (MO). L'eau sert également de transportant les polluants à travers le système et facilitant leur élimination par des processus physiques, chimiques et biologiques.

Les CWs fonctionnent grâce à des opérations complexes entre l'eau, les plantes et les microorganismes. Ces derniers jouent un rôle en décomposant la matière organique, en produisant des nutriments pour les plantes et en éliminant les agents pathogènes. L'eau assure la circulation de ces éléments, permettant aux plantes d'absorber les polluants et aux nutriments d'atteindre les racines (Davis, 1995).

I.5.2. Matériaux de remplissage des CWs

Dans les CWs, les matériaux de remplissage jouent un rôle essentiel. Ce sont des couches de matériaux inertes comme le gravier, le sable ou les fragments de pierre, qui forment une zone de filtration. Ces matériaux remplissent plusieurs fonctions:

- Ils offrent une surface propice au développement des bactéries et autres micro-organismes bénéfiques qui décomposent la MO dans les eaux usées ;
- Ils facilitent l'écoulement des eaux usées à travers le système, améliorant ainsi l'efficacité de la filtration ;
- Leur taille et leur forme peuvent varier selon le type de CW et les conditions environnementales spécifiques ;
- Dans certains cas, des matériaux de remplissage spécialisés peuvent être utilisés pour cibler l'élimination de contaminants particuliers, comme les métaux lourds.

Les matériaux de remplissage sont un composant clé des CWs, contribuant significativement à l'efficacité du traitement des eaux usées grâce à leurs propriétés physiques et à leur rôle dans le soutien des processus biologiques de purification (Kadlec & Knight, 1996).

I.5.3. Végétaux des CWs

Les plantes jouent un rôle très important dans le processus de purification des eaux usées. Leurs fonctions sont multiples et complémentaires :

- Les racines des plantes servent de support idéal pour les microorganismes bénéfiques qui dégradent les MO et les nutriments présents dans les eaux usées (Vymazal, 2010);
- Les plantes assimilent directement certains nutriments comme l'azote et le phosphore, réduisant ainsi leur concentration dans l'eau traitée (Vymazal, 2010) ;
- Les plantes libèrent de l'oxygène au niveau de leurs racines, favorisant le développement de bactéries aérobies qui participent à la décomposition des MO (Qasaimeh et al., 2015).

Les plantes sont un composant essentiel des CWs, contribuant de manière significative à l'efficacité du traitement des eaux usées grâce à leurs interactions avec les microorganismes et leur capacité à absorber les polluants.

I.5.4. Microorganisme

Les micro-organismes jouent un rôle fondamental dans le traitement des eaux usées. Ces organismes microscopiques, principalement des bactéries et des champignons, se développent dans le milieu filtrant et assurent plusieurs fonctions essentielles (Davis, 1995):

- Ils dégradent les MO et les nutriments présents dans les eaux usées ;
- Ils convertissent les polluants en composés moins nocifs et utilisables par les plantes ;
- Les micro-organismes anaérobies décomposent la MO par fermentation, tandis que les aérobies utilisent la respiration cellulaire ;
- Ils fournissent des nutriments aux plantes et créent un environnement propice à leur croissance.

Les micro-organismes sont un élément clé du processus de traitement dans les CWs, assurant une dégradation efficace des polluants et travaillant en synergie avec les autres composants du système pour purifier les eaux usées (Kadlec & Wallace, 2008).

I.5.5. Animaux aquatiques

Les CWs créent un habitat diversifié pour la faune aquatique. Les invertébrés, notamment les insectes et leurs vers, jouent un rôle clé dans le traitement de l'eau en fragmentant les déchets et consommant la MO. Ils contribuent aussi à l'équilibre écologique. Bien que moins cruciaux pour la qualité de l'eau, les CWs attirent également des amphibiens, reptiles, oiseaux et mammifères, enrichissant ainsi la biodiversité du système (Cooper et al., 2001).

I.6. Différents schémas des CWs

I.6.1. CWs à écoulement horizontal superficiel « Free Water Surface » (FWS)

Les zones humides FWS (Figure I.1) (Free Water Surface) sont des CWs qui sont conçues pour traiter les eaux usées. Elles sont similaires aux NWs en ce qu'elles sont des bassins profonds plantés de végétation émergente et enracinée (Izharul et al., 2007). Les FWS sont moins exigeantes en termes de surface que les autres types de CWs. L'écoulement des eaux usées dans les FWS se fait à travers la surface des lits et est donc appelé zone humide de surface d'eau libre (Vymazal, 2010).

Le traitement dans FWS se produit principalement grâce à des activités microbiennes (bactéries et champignons) qui résident dans l'environnement des CWs. Les mécanismes d'élimination comprennent l'adhérence de surface, la sédimentation et l'agrégation pour les MES, tandis que les composés organiques solubles sont dégradés par des microbes en suspension et attachés par des mécanismes aérobies et anaérobies. Les mécanismes d'élimination du phosphore comprennent l'adsorption, l'absorption et la précipitation, mais l'élimination du phosphore a lieu à un rythme lent par rapport aux CWs souterraines. L'élimination de l'azote se produit par nitrification et dénitrification subséquente dans des conditions d'eau aérobie et dans une couche de litière anoxique à la surface du lit respectivement (Vymazal, 2010).

Les FWS sont principalement employées dans le domaine du traitement tertiaire, mais elles ont aussi été employées pour traiter les effluents produits par les lagunes de traitement, les étangs de stockage des déchets, le drainage minier acide, les fermes laitières, le ruissellement des terres cultivées et les rejets des installations aquacoles. Les FWS sont relativement faciles à gérer et à entretenir par rapport aux systèmes de plantes aquatiques flottantes. Les FWS fonctionnent efficacement tout au long de l'année avec une légère réduction de l'efficacité en hiver dans les climats froids.

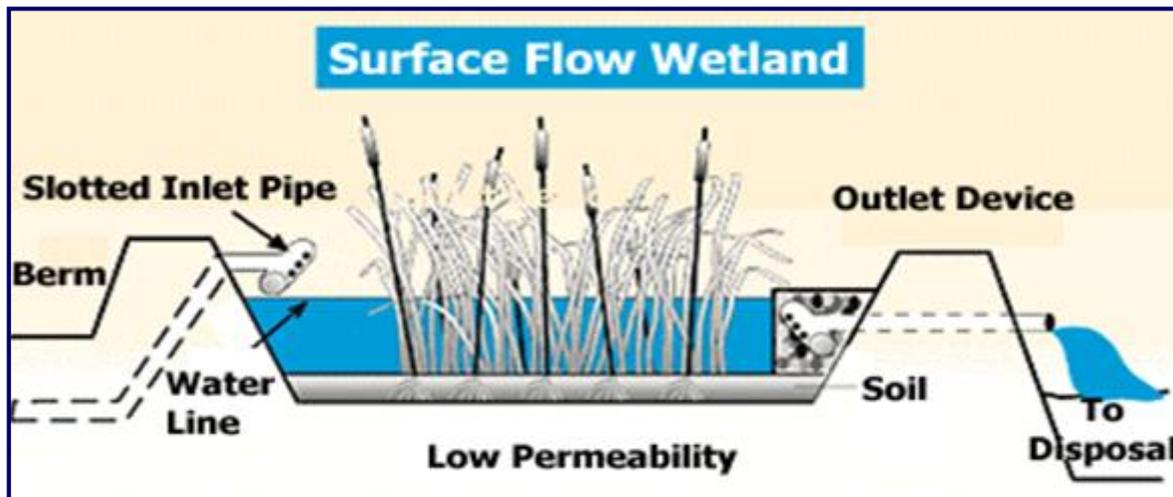


Figure I.1| CWs à écoulement horizontal superficiel (Kadlec & Wallace 2008).

I.6.2. CWs à écoulement sous-surface (SSFS)

Les CWs avec un écoulement sous-surface (SSFS), aussi appelés lits de percolation, Ce sont des dispositifs de traitement des eaux usées qui font appel à un matériau poreux afin de filtrer les substances polluantes de l'eau. Contrairement aux CWs à écoulement horizontal, les SSFS ont un flux d'eau qui circule sous la surface du substrat. L'eau est prétraitée avant d'être distribuée uniformément sur le substrat à travers des conduits perforés. Par la suite, l'eau pénètre dans le substrat, où les microorganismes décomposent les substances organiques. Les plantes présentes dans les SSFS offrent également un espace pour la croissance des microorganismes et contribuent à la préservation de la biodiversité (Khan & Khalil, 2017).

Les SSFS ont été employés afin de gérer différents types d'eaux usées, tels que les eaux usées domestiques et industrielles, et ils peuvent être utilisés pour traiter des quantités importantes de contaminants organiques, azotés et phosphatés. Les SSFS sont souvent utilisés en combinaison avec d'autres méthodes de traitement des eaux usées, comme la décantation et la désinfection, pour obtenir des performances élevées. Les SSFS présentent de nombreux bénéfices tels que leur prix abordable pour leur installation et leur maintenance, leur grande efficacité de traitement, leur faible consommation d'énergie et leur capacité à traiter une grande diversité de types d'eaux usées. Toutefois, les

désavantages des SSFS incluent la nécessité d'un espace de terrain considérable pour l'installation, une augmentation de la production de gaz à effet de serre et une possible diminution de la qualité de l'eau si la maintenance n'est pas réalisée de manière adéquate.

Les systèmes d'évacuation sont généralement équipés d'un tuyau de drainage situé au fond, à l'aval du bassin, sur toute sa largeur, et relié à une conduite dans un regard, où est installé un dispositif permettant d'ajuster le niveau d'eau à l'intérieur du système, en fonction des besoins opérationnels du système (APAT, 2005). Lorsque la largeur du bassin dépasse les 25 à 30 mètres, il est recommandé d'utiliser deux systèmes à la sortie pour diminuer les zones de stagnation.

I.6.2.1. CWs sous-surfacique à flux horizontal (HFCW)

Les HFCWs (Figure I.2), également connus sous le nom "lits de roseaux". Leur fonctionnement repose sur le passage des eaux usées à travers un substrat de sable ou de gravier, créant des zones aérobies, anoxiques et anaérobies où les bactéries associées aux racines des plantes dégradent les composés organiques. Korkusuz et al. (2005) soulignent que la capacité de transport d'oxygène insuffisante des plantes limite la dégradation des MO par des processus aérobies. Ces systèmes, principalement utilisés pour le traitement secondaire ou tertiaire, nécessitent un prétraitement pour éviter le colmatage et sont adaptés à divers types d'eaux usées.

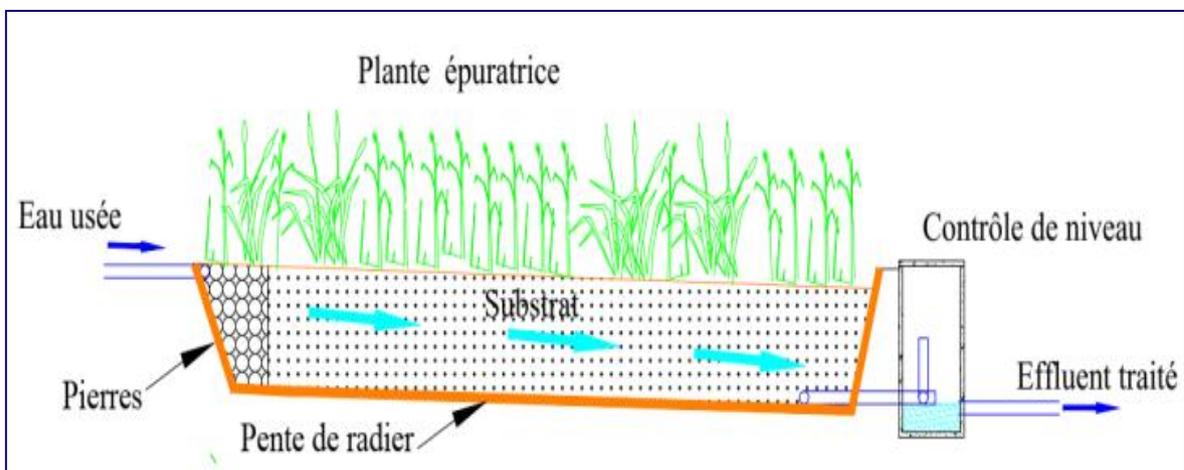


Figure I.2 | CWs sous-surfacique à flux horizontal (Rokbane, 2023).

L'alimentation des HFCW se fait en continu, soit par un canal à surface libre alimentant le bassin en plusieurs points, soit par des conduites perforées avec des pièces en « T » pour une distribution latérale de l'écoulement (Figure I.3).



Figure I.3 | Conduite perforée pour la distribution sous-superficielle (Rokbane ,2023)

I.6.2.2. CWs sous-surface à flux vertical (VFCW)

Les VFCWs sont une technologie de traitement des eaux usées plus compacte que les systèmes à flux horizontal, mais nécessitant un entretien plus intensif. Elles utilisent des macrophytes émergents et appliquent les eaux usées de manière dispersée à la surface du milieu filtrant. Brix & Arias (2005) notent que cette méthode favorise les processus de dégradation principalement aérobies (Cooper et al. 1996), ce qui améliore le processus de nitrification. Les VFCWs sont efficaces pour éliminer les MES, les MO et l'ammoniac, mais moins performantes pour le phosphore (Molle, 2003).

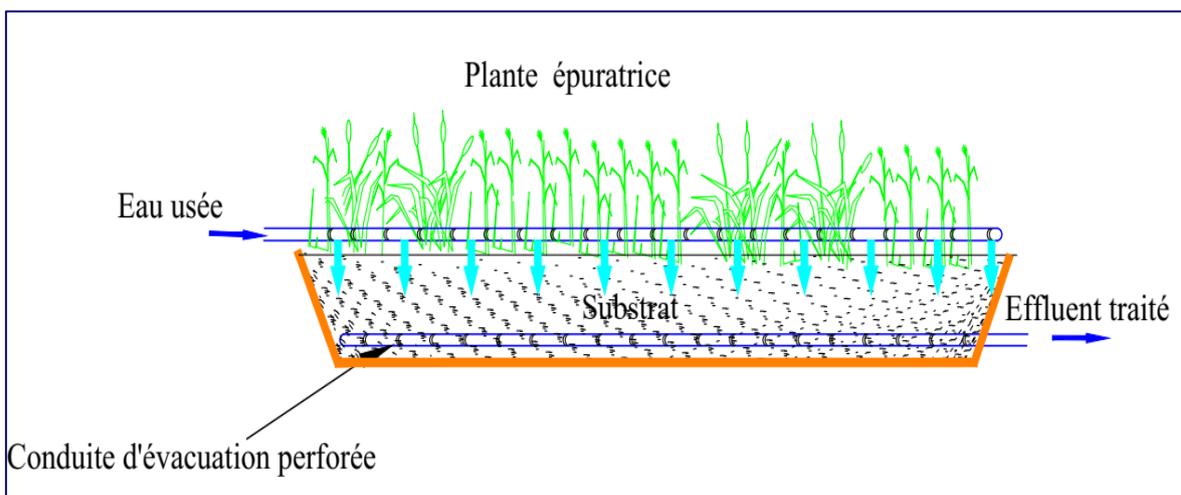


Figure I.4 | CWs sous-surface à flux vertical (Rokbane, 2023)

Leur alimentation est discontinue, alternant périodes d'activité et de repos, avec des fréquences variables selon les recommandations (APAT 2005). Le drainage est similaire aux systèmes HFCW, avec des conduites espacées de 1 à 2 mètres au fond du système. Ces systèmes sont principalement utilisés pour les eaux usées domestiques et municipales, mais peuvent traiter divers types d'effluents (Figure I.5).



Figure I.5 | Photo d'un système d'évacuation d'un filtre vertical. (Rokbane, 2023)

I.6.3. CWs à écoulement hybride (HCW)

On utilise également les CWs à écoulement hybrides (**Figure I.6**) pour traiter les eaux de ruissellement provenant des terres agricoles, des zones industrielles et urbaines, des aires de stationnement et des routes. On les utilise aussi pour traiter les eaux de drainage acides issues des mines et des zones minières. (Vymazal, 2013b). Les HCWs présentent plusieurs avantages par rapport aux systèmes individuels VFCWs ou HFCWs. En combinant les deux systèmes, l'efficacité de traitement est améliorée, en particulier pour l'élimination de l'azote. De plus, les HCWs peuvent gérer une gamme plus large de charges hydrauliques et organiques, ce qui les rend plus adaptés à différents types d'eaux usées. Les HCWs nécessitent également moins d'espace que les systèmes individuels VFCWs ou HFCW, ce qui les rend plus appropriés pour les sites où l'espace est limité (Vymazal, 2013b).

Toutefois, la conception et la construction des HCWs sont plus complexes que les systèmes individuels VFCWs ou HFCWs, ce qui entraîne un coût initial plus élevé. Les HCW sont néanmoins de plus en plus couramment employés à travers le monde en raison de leur grande efficacité de traitement et de leur polyvalence pour diverses formes d'eaux usées (Vymazal, 2013b).

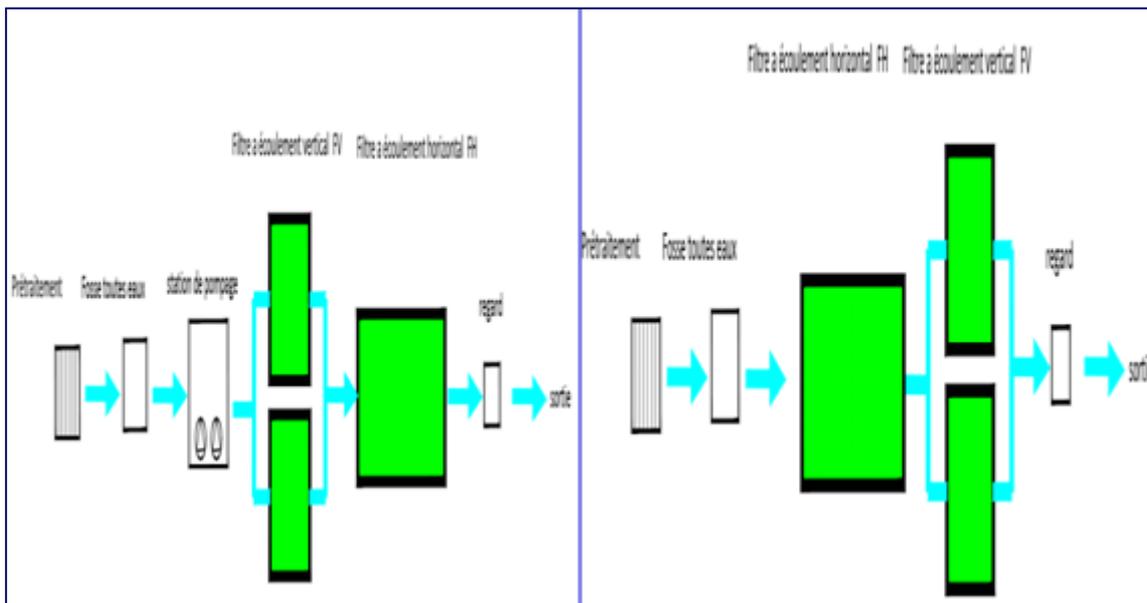


Figure I.6 | Configuration de système hybride (Rokbane, 2023).

I.7. Principe de mécanismes des zones humides artificielles

I.7.1. Processus physiques

Le problème du traitement des eaux usées revêt une importance capitale pour préserver l'environnement et la santé publique. L'utilisation de CWs est l'un des moyens les plus performants pour traiter les eaux usées. Grâce à ces CWs, il est possible d'éliminer les MES. Les racines des plantes dans les CWs constituent en effet un filtre naturel qui capte les particules et les impuretés présentes dans l'eau. De plus, la formation de sédiments joue également un rôle important dans le traitement des eaux usées. L'eau s'écoule à travers les couches de gravier et de sable, tandis que les particules et solides se déposent au fond du CWs. La photolyse est un autre processus physique qui se produit dans les CWs. On observe principalement cette réaction dans les eaux usées superficielles, où les rayons du soleil décomposent certains polluants et éliminent les bactéries pathogènes présentes dans les eaux usées (Mimeche, 2014).

I.7.2. Processus chimique

Les métaux ont la capacité de se déposer dans la colonne d'eau sous forme de substances insolubles. L'exposition à la lumière et aux gaz atmosphériques peut décomposer les pesticides organiques ou tuer les organismes producteurs de maladies (EPA, 1995). De nombreuses réactions et processus sont fortement influencées par le pH de l'eau et des sols dans les CWs, tels que la transformation biologique, la transition entre les formes ionisées et non ionisées des acides et des bases, l'échange de cations, ainsi que la solubilité des solides et des gaz.

Il existe également une variété d'organismes dans les CWs qui peuvent contribuer à l'élimination des polluants et des contaminants de l'eau. En outre, la restauration des CWs

peut constituer un moyen efficace pour réduire les conséquences du changement climatique. En raison de leur capacité à stocker de grandes quantités de carbone, les CWs contribuent à la diminution des émissions de gaz à effet de serre.

I.7.3. Processus biologiques

Les organismes vivants, y compris les plantes, ont développé des mécanismes pour s'adapter aux contraintes environnementales, ce qui leur permet de survivre. Les végétaux ont mis au point des systèmes biochimiques complexes afin de s'ajuster aux conditions géochimiques locales et de modifier leur environnement direct, notamment en éliminant les substances toxiques présentes dans le sol naturel. Il est également possible d'utiliser ces mécanismes de détoxification pour les composés xénobiotiques présents dans l'environnement. Les plantes peuvent être utilisées comme des outils pour éliminer les polluants de l'eau et du sol, et même pour dépolluer les sites contaminés. La sélection de plantes adaptées aux environnements pollués peut renforcer cette capacité de détoxification, ce qui peut entraîner l'apparition de plantes résistantes à la pollution, capables de détoxifier rapidement les polluants et de contribuer à la restauration de l'environnement. (Healy et al., 2007).

I.8. Avantage et Inconvénients

I.8.1. Avantage des CWs

- ♣ Le coût estimé de la construction d'une CW est comparativement moins élevé que celui d'autres méthodes de traitement.
- ♣ La construction ne nécessite pas de matériaux coûteux.
- ♣ L'exploitation et la maintenance du système sont faciles. Une fois établi, le processus est cohérent.
- ♣ Le processus ne nécessite pas de combustibles fossiles ni de produits chimiques pour le traitement.
- ♣ En plus de la purification, l'installation peut servir à la culture de poissons, à la production de biomasse, à l'agriculture, aux loisirs, à la préservation de la flore et de la faune, ainsi qu'à la fourniture d'eau (EPA, 1993).
- ♣ En mesure de satisfaire aux exigences de qualité des effluents visés.

II.8.2. Inconvénients des CWs

- ♣ La construction nécessite une grande surface.
- ♣ La disponibilité et l'accessibilité des terrains constituent une contrainte.
- ♣ Il est essentiel de maîtriser l'écologie des CWs et des espèces indigènes.

- ♣ La maximisation des performances des paramètres devient difficile lorsque différents types d'eaux usées sont mélangés.
- ♣ La récolte périodique de la biomasse est essentielle pour maintenir des performances cohérentes.
- ♣ Les critères de conception sont encore en développement pour différents types d'eaux usées dans des conditions climatiques différentes.

I.9. Conclusion

Les CWs présentent de multiples bénéfices en tant que méthode de traitement des eaux usées. Outre sa consommation d'énergie réduite et l'absence de produits chimiques coûteux, elle peut aussi servir à d'autres usages comme la biomasse, la pêche, l'agriculture, la conservation de la flore et de la faune et l'approvisionnement en eau pour diverses utilisations. Néanmoins, la réalisation d'une CWs requiert une superficie considérable de terrain, et la disponibilité et le coût des terres peuvent constituer des obstacles considérables. En outre, il est essentiel d'avoir une compréhension approfondie de l'écologie des CWs et des espèces indigènes afin d'améliorer les performances de la CW. La complexité de la composition des eaux usées peut également influencer les performances, et il est important de collecter régulièrement la biomasse afin de maintenir les performances de la CW. La technologie des CWs représente une alternative efficace et respectueuse de l'environnement pour le traitement des eaux usées. Toutefois, il est essentiel de prendre en compte des aspects essentiels lors de la planification, de la construction et de l'entretien de la CW afin d'assurer des performances optimales et durables.

Partie 2 | Partie expérimentale

Chapitre II | Matériels et méthodes

Chapitre II / Matériels et méthodes

II.1. Introduction

Dans le premier chapitre, la zone d'étude est présentée, avec sa localisation géographique et ses caractéristiques climatiques. Cette partie est importante car elle permet de situer le contexte dans lequel les expériences ont été menées et de comprendre les conditions environnementales auxquelles les plantes aquatiques ont été exposées.

Le chapitre suivant se focalise sur les méthodes expérimentales employées afin d'évaluer l'efficacité de la plante aquatique *Typha latifolia*. Les systèmes de CW à écoulement hybride (HCW) installés dans cette zone ont été utilisés pour la culture de cette plante. La méthodologie utilisée pour mener les expériences est expliquée en détail dans cette section, incluant la conception des systèmes de culture, les mesures et les analyses réalisées afin d'évaluer la croissance et le rendement épuratrices du système.

II.2. Description de la zone de recherche et des Installations

II.2.1. Situation de la ville d'El-Anasser

Un nouveau système de HCW, utilisé dans cette recherche (**Figure II.1**) a été fabriqué et installé à la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université de Bordj Bou Arreridj, Algérie (coordonnées GPS 36° 02 ' 23 "N, 4° 49' 06 " E). Se caractérise par un climat méditerranéen, avec une température allant de 10 ° C à 30 ° C et des précipitations annuelles moyennes de 500 mm.



Figure II.1 | Situation géographique de la ville d'El-Anasser.

II.2.2. Pilote expérimental

Le système expérimental a été construit en février 2024 et elle a traité les eaux usées provenant de l'Est de la ville d'El-Anasser. Le système a été mis en service en mars 2024 pour recevoir les effluents d'eaux usées municipales. Le système HCW se composait d'un

reservoir de stockage des eaux usées brutes (100 L), d'un flux vertical descendant et ascendant (4 pièces) (BVFCW₁), d'un flux horizontal (1 pièce) (HFCW) et d'un flux vertical descendant et ascendant (4 pièces) (BVFCW₂) relié en série (**Figure II.2**).



Figure II.2 | Photo du système des HCWs expérimentale

Les VFCWs et le HFCW ont été plantés avec *Typha latifolia* à une densité de 36 plants / m² et remplis d'eau du robinet pendant un mois pour faciliter le développement des racines. La phase de démarrage a duré un mois (février 2024), au cours de laquelle les systèmes ont été alimentés avec un mélange d'eau du robinet et d'eaux usées (en février 2024) avant d'être entièrement irrigués avec uniquement des eaux usées (mars 2024). Il s'agissait d'une phase de démarrage similaire à celle utilisée par d'autres études.

Dans cette étude, nous avons utilisé le système expérimental afin de tester l'impact des plantes et du type d'écoulement sur le traitement des eaux usées, il a été rempli de 35 cm de gravier mélangé (\varnothing 0.63 –5 cm, la porosité $n=38\%$) afin de faciliter le drainage des eaux usées. Les deux pièces VFCW avaient des dimensions de 30 cm (longueur), 30 cm (largeur) et 35 cm (profondeur). Les pièces VFCW ont des ouvertures (10*10 cm nombre: 2) en bas pour faciliter le passage des eaux usées d'une pièce à l'autre de manière déconcertante. Le nombre de pièces VFCW est de 8, mais le HFCW est un système à un seul intermédiaire et avait les dimensions de 30 x 150 x 30 cm. Une représentation visuelle du HCW à l'échelle pilote est fournie à la **figure II.3**

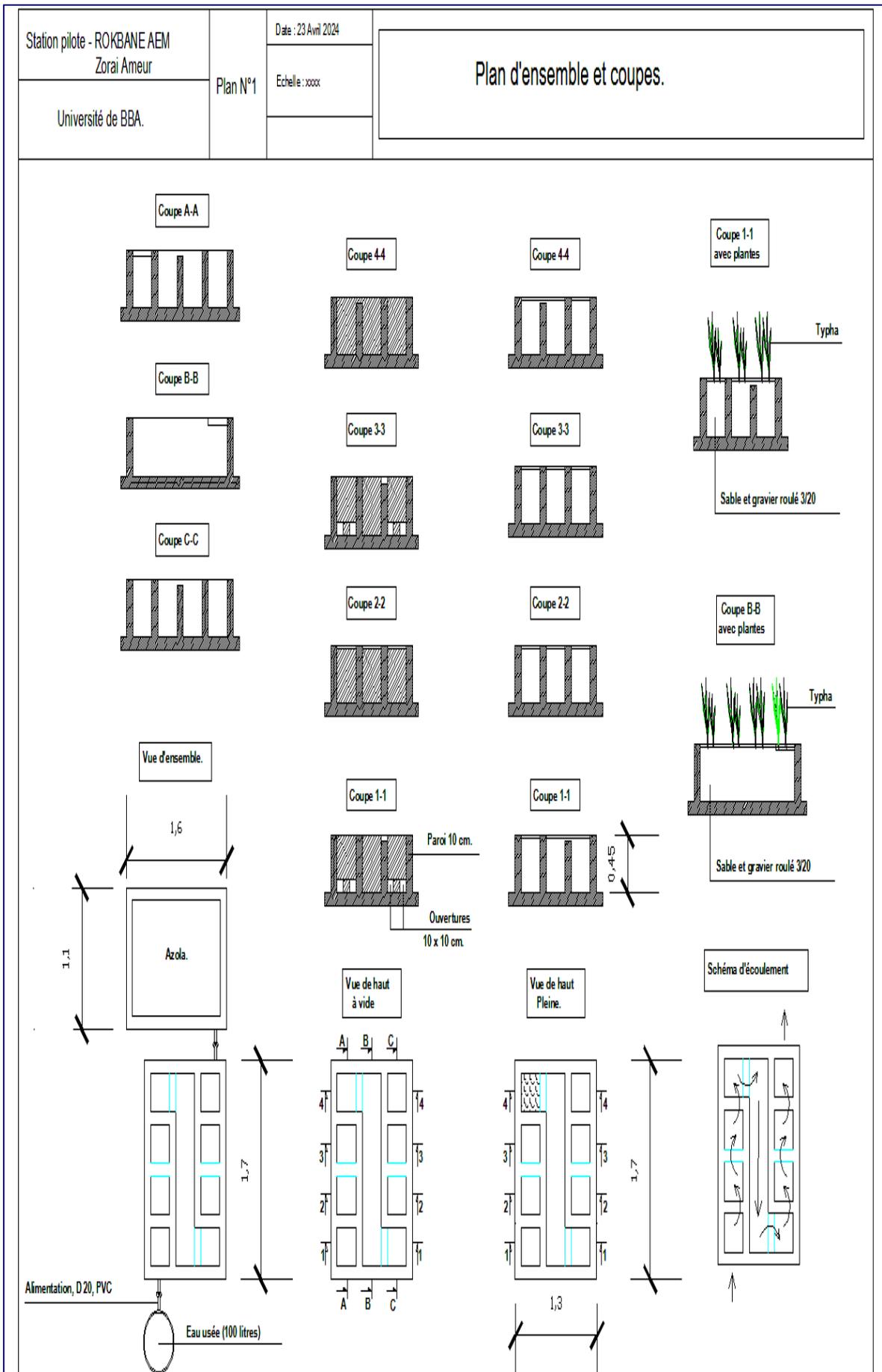


Figure II.3 | Un plan de station expérimentale pour les HCWs.

Les campagnes d'échantillonnage ont été menées pendant deux mois. Les eaux usées ont été induites à la surface du premier VFCW₁ en mode discontinu avec un taux de chargement hydraulique de 0.1 m³/ jour. L'opération marémotrice était contrôlée par des barrières construites. Le HFCW était continu et le temps de rétention hydraulique était de 6h à 3 jours.

II.2.3. Espèces végétales utilisés pour les expériences

Typha latifolia (Figure II.4) est une espèce vivace herbacée de la famille des Typhacées, couramment employée en CWs pour traiter les eaux usées, offrant ainsi une alternative au traitement classique (Guitttonny-Philippe et al., 2014). Il a été utilisé dans des HCWs à une échelle expérimentale.



Figure II.4 | Photo présentant l'espèce *Typha latifolia* (Zorai, 2023)

II.3. Echantillonnage, calcul et analyse statistique

Des échantillons d'eau ont été prélevés une fois par semaine dans l'influent brut et, une fois à la sortie S₁, et une autre à la fin du système hybride S₂.

La température, le pH, l'CE, le TDS, OD, et la salinité ont été enregistrés instantanément à l'aide d'un multiparamètre. La turbidité a été mesurée à l'aide d'un turbidimètre IR Orion TB 300. La DCO, a également été déterminé conformément aux normes ISO 6060/2 (ISO 1989), la DBO₅, Le test de DBO de 5 jours a été réalisé en utilisant des capteurs de gaz de tête OxiTop (OxiTop ® WTW box). La mesure du MES a été réalisée en utilisant la méthode gravimétrique (APHA, 2005).

Pour chaque variable, le calcul du rendement RE (équation 1) a été déterminé en considérant la concentration du polluant et en suivant les directives énoncées par l'Association internationale de l'eau.

$$RE = \left[\frac{(C_e - C_s)}{C_e} \right] \cdot 100 \dots\dots\dots \text{Eq 1}$$

Où C_e et C_s sont les concentrations d'entrée et de sortie exprimées en mg/l, respectivement.

L'évaluation statistique de l'efficacité du système de CWs a été réalisée en comparant les concentrations moyennes de différents paramètres physico-chimiques dans l'effluent, tout en maintenant des conditions opérationnelles similaires. Cette évaluation a été réalisée à l'aide d'un logiciel statistique spécialisé, en particulier le logiciel Origin (2018). Afin d'accomplir cela, on a employé un test ANOVA unidirectionnel, avec un niveau de signification statistique prédéterminé à 0.05. Ensuite, on a utilisé le test de Tukey (LSD) afin de détecter d'éventuelles différences entre les moyennes. Les écarts statistiquement significatifs étaient identifiés en utilisant l'écart type et la méthode d'analyse de variance.

II.3.1. Protocole de mesure du pH et de la température des eaux usés

Le pH représente le niveau d'acidité ou de basicité d'un environnement (APHA et al. 2012). L'importance de ce paramètre réside dans son impact sur l'activité métabolique et la croissance des bactéries, ainsi que sur la solubilité des divers composés chimiques présents dans l'environnement (Morin et al ; 2017). La température joue un rôle essentiel dans la régulation de la plupart des phénomènes physiques, chimiques et biologiques dans l'environnement aquatique. La solubilité des gaz dissous est influencée par elle, tout comme la vitesse des réactions chimiques et biochimiques. Les changements climatiques peuvent perturber l'équilibre des écosystèmes aquatiques (Bonacina et al. 2023) le matériel et la procédure de la détermination du T et du pH est fournie dans la Figure II.5 et le Tableau II.1 respectivement.



Figure II. 5 | pH mètre (inoLab PH7110)

Tableau II.1 | Matériel et procédure de la détermination du T et pH

Matériel
pH-mètre (inoLab PH7110), des béchers, échantillonnage (eau usée), eau distillée, Solutions tampons étalons pH 4 et pH 7 PH10 et Chiffons propres
Procédure
Préparation de l'échantillon: Prélever un échantillon d'eau usée représentatif dans un bécher propre. Noter la température.
Rinçage de la sonde: Rincer soigneusement la sonde de pH avec de l'eau distillée ou déminéralisée pour éliminer toute contamination. Sécher la sonde avec un chiffon propre.
Étalonnage de la sonde: Immerger la sonde de pH dans une solution tampon pH 4 et ajuster le transmetteur de pH à 4,00. Rincer ensuite la sonde avec de l'eau distillée et sécher. Répéter l'opération avec la solution tampon pH 7 et ajuster le transmetteur à 7,00 Puis pH10 .
Mesure du pH: Plonger la sonde de pH dans l'échantillon d'eau usée et attendre que la lecture se stabilise. Noter la valeur du pH et de température affichée sur le transmetteur.
Rinçage et stockage de la sonde: Rincer la sonde de pH avec de l'eau distillée et sécher soigneusement. Stocker la sonde dans une solution de stockage recommandée par le fabricant.

II.3.2. Protocole de mesure de la conductivité, salinité et SDT de l'eau usée

La conductivité électrique (CE) est un indicateur essentiel qui permet d'évaluer la concentration de sels dissous dans l'eau, comme les sulfates, les chlorures, le calcium, le sodium et le magnésium. Elle prend de l'importance avec la température de l'eau et la quantité de sels dissous. Dans les eaux usées, la qualité de l'eau potable utilisée, l'alimentation de la population et les activités industrielles dans les zones urbaines sont les principaux facteurs qui influencent la CE. La conductivité est mesurée en utilisant le siemens (S) ou le microsiemens (μS) (Morin et al., 2017).

Le nombre total de substances minérales, organiques et inorganiques dissoutes dans une eau spécifique est appelé le total des solides dissous (SDT). Sa composition est composée de sels inorganiques et d'une partie de matière organique, et elle est généralement exprimée en mg/L ou en parties par million (ppm). Les cations sont le potassium, le calcium, le magnésium et le sodium, ainsi que les anions sont les carbonates, les nitrates, les bicarbonates, les chlorures et les sulfates. Dans cette étude, on a utilisé une sonde multiparamètres modèle (inoLab cond 7110) pour mesurer la CE et le SDT. Le matériel et le processus de détermination de la CE et du SDT sont présentés respectivement dans la **Figure II.6** et le **Tableau II.2**.



Figure II.6 | Conductimètre (inoLab Cond7110)

Tableau II.2 | Matériel et procédure de la détermination conductimètre

Matériel
Conductimètre (inoLab cond7110), Des béciers, Des solutions étalons de conductivité, De l'eau distillée, Des gants et Des lunettes de protection
Procédure
Préparer le conductimètre: Rincez la cellule du conductimètre avec de l'eau distillée et séchez-la soigneusement. Suivez les instructions du fabricant pour calibrer le conductimètre avec des solutions étalons de conductivité.
Prélever un échantillon d'eau usée: Portez des gants et des lunettes de protection.
Prélevez un échantillon d'eau usée représentatif dans un bécier propre. Laissez l'échantillon refroidir à la température ambiante
Mesurer la conductivité: Rincez la cellule du conductimètre avec l'échantillon d'eau usée et séchez-la soigneusement. Plongez la cellule dans l'échantillon d'eau usée et attendez que la lecture se stabilise. Notez la valeur de la conductivité, de la salinité, de TDS et la température de l'eau.
Rincer et sécher la cellule: Rincez la cellule du conductimètre avec de l'eau distillée et séchez-la soigneusement

III.3.3. Protocole de mesure de la turbidité de l'eau usée

La turbidité représente l'aptitude d'un échantillon d'eau à diffuser et absorber la lumière en raison de la présence de particules en suspension ou colloïdales. Elle est causée par une grande variété de particules solides en suspension, de tailles variées allant des particules grossières aux dimensions colloïdales, ainsi que par une certaine quantité de matières dissoutes conférant une coloration à l'échantillon. Plus il y a de particules solides en suspension dans l'échantillon, plus la diffusion de la lumière est importante et donc plus la turbidité est élevée "FWPCA Methods for chemical analysis of water and wastes, 275

(1969)". Le matériel et la procédure de la détermination de la TUR est fourni dans la **Figure II.7**, et le **Tableau II.3** respectivement.

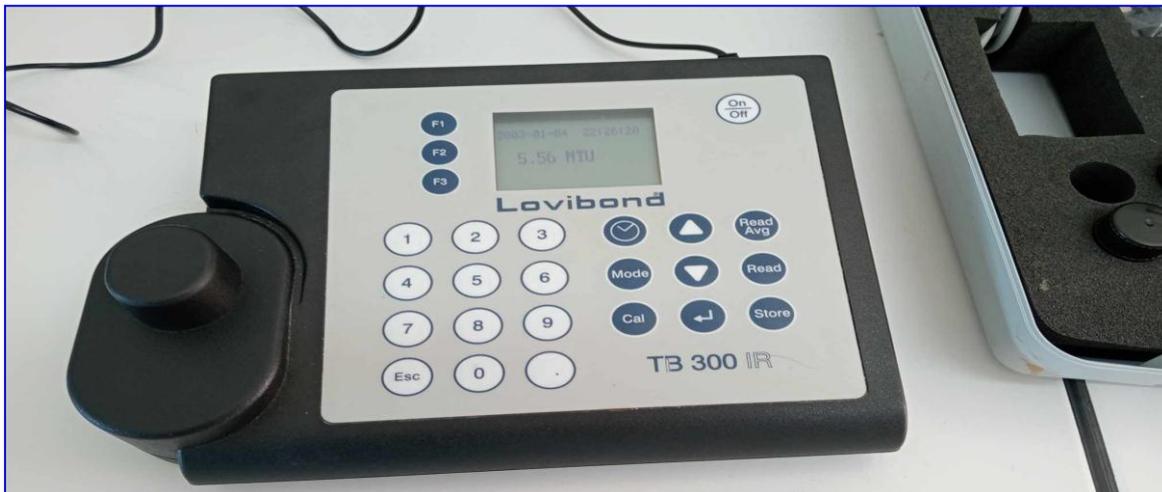


Figure II.7 | Turbidimètre (TB 300 IR)

Tableau II.3 | Matériel et procédure de la détermination turbidité

Matériel
Turbidimètre (TB 300 IR), Des cuvettes à échantillons, Un chiffon non pelucheux, De l'eau distillée et Des solutions de formazine étalon (si nécessaire)
Procédure
<ul style="list-style-type: none"> - Mettre le turbidimètre sous tension et laisser-le chauffer pendant la période recommandée par le fabricant. - Calibrer le turbidimètre avec des solutions de formazine étalon si nécessaire. Suivez les instructions du fabricant pour effectuer le calibrage
Préparation de l'échantillon:
<ul style="list-style-type: none"> - Collecter un échantillon d'eau usée représentatif dans une cuvette propre. - Si l'échantillon contient des particules grossières, le filtrer sur un papier filtre Whatman de 0,45 µm. - Rincer la cuvette avec de l'eau distillée et la sécher avec un chiffon non pelu-cheux.
Mesure de la turbidité:
<ul style="list-style-type: none"> - Remplir la cuvette avec l'échantillon d'eau usée jusqu'au trait de repère. - Essuyer l'extérieur de la cuvette avec un chiffon non pelucheux pour enlever toute trace d'empreintes digitales ou de saleté. - Placer la cuvette dans le compartiment à échantillons du turbidimètre. - Fermer le couvercle du compartiment à échantillons. - Appuyer sur le bouton de mesure pour démarrer la mesure. - Le turbidimètre affichera la valeur de la turbidité de l'échantillon en unités néphéométriques de turbidité (NTU).
Nettoyage
<ul style="list-style-type: none"> - Rincer la cuvette avec de l'eau distillée et la sécher avec un chiffon non pelu-cheux. - Éteindre le turbidimètre lorsqu'il n'est pas utilisé.

II.3.4. Protocole de mesure DBO₅ de l'eau usée

Il est important d'estimer la pollution domestique et industrielle en entrée et en sortie des stations d'épuration en utilisant la mesure de la DBO₅. Nous avons employé un DBO-mètre WTW OxiTop Box pour évaluer la DBO₅ (Figure II.8, Tableau II.4).

Chaque échantillon a été placé à 20°C pendant une période de 5 jours. On a ajouté des gouttes d'inhibiteur de nitrification afin d'empêcher ce processus. Le test évalue la pression générée par la consommation d'oxygène par les micro-organismes qui génèrent du CO₂, absorbé par des pastilles d'hydroxyde de sodium (NaOH). La valeur de DBO₅ est calculée en fonction de la pression mesurée dans les têtes OxiTop, en accord avec la norme AFNOR (1990). Ceci témoigne de la destruction de la MO par les micro-organismes.



Figure III.8 | DBO-mètre WTW OxiTop Box

La méthode manométrique repose sur le principe de la méthode respirométrique de WARBURG, où la respiration de la biomasse est directement évaluée par un dispositif. Les flacons à bouchon rodé contiennent un volume d'échantillon.

En règle générale, on évalue le DBO₅ à une température de 20°C et dans l'obscurité, en agitant. On évoque alors DBO₅.



Tableau II.4 | Matériel et procédure de la détermination du DBO₅

Matériel
Eprouvette graduée de 250 ml, sonde DBO ₅ de dépression, Socle et absorbeur de CO ₂ , Flacon de verre, Eau distillée, Echantillon d'eaux usées, Thermomètre, Incubateur à 20°C, NAOH en grain, et Spatule.
Procédure
Introduire dans éprouvette 250 ml l'échantillon d'eau Usée.
vider l'eau usée dans le flacon de verre.
Mettre NAOH dans le socle à partir la spatule et l agitateur dans le Falcon.
Fermer le flacon de verre bien par la sonde DBO ₅ .
Incuber le flacon à 20°C pendant 5 jours.
Après 5 jours d'incubation, noter la pression finale de flacon.
Calculer la DBO ₅ en mg/L en utilisant la formule suivante :
DBO ₅ (mgO ₂ /L) =valeur lue (Mano) * facteur (Tableau II.1)

Pour déterminer les volumes à analyser pour la DBO₅, nous avons sélectionné la DCO et calculé le volume de l'échantillon d'essai à l'aide de la relation (**Tableau II.5**). Les résultats ont été exprimés en mg/L pour la DBO₅ et la DCO (**Morin-Crini et al., 2017**).

Tableau II.5 | Volumes des d échantillon d'après les valeurs de la DCO

La charge	DCO (mg/l)	Prise d'essai (ml)	Facteur	KOH
Très faible	0 – 40	432	1	1 goutte
Faible	0 – 80	365	2	2 gouttes
Moyenne	0 – 200	250	5	2 gouttes
Plus que moyenne	0 – 400	164	10	4 gouttes
Un peu chargée	0 – 800	97	20	4 gouttes
Chargée	0 – 2000	43.5	50	4 gouttes
Très chargée	0 – 4000	22.7	100	5 gouttes

II.3.5. Protocole de mesure DCO de l'eau usée

La quantité de MO oxydables présentes dans un échantillon liquide est connue sous le nom de DCO. Il s'agit d'une mesure fréquemment employée pour évaluer la qualité de l'eau, car elle permet de repérer la présence de substances polluantes organiques. En général, on évalue la DCO en mgLO₂/L en utilisant un titreur. L'oxydation par le bichromate de potassium (K₂ Cr₂ O₇) est la méthode la plus courante, en milieu acide, avec du sulfate d'argent (Ag₂ SO₄) et du sulfate de mercure (Hg SO₄). Les réactifs commerciaux sont utilisés pour déclencher la réaction. On évalue alors la réduction de la coloration jaune du chrome VI en utilisant la spectrophotométrie. Grâce à cette approche, il est possible d'évaluer l'efficacité des traitements des eaux et de vérifier si les niveaux de matières organiques sont appropriés (**Figure II.9, Tableau II.6**).

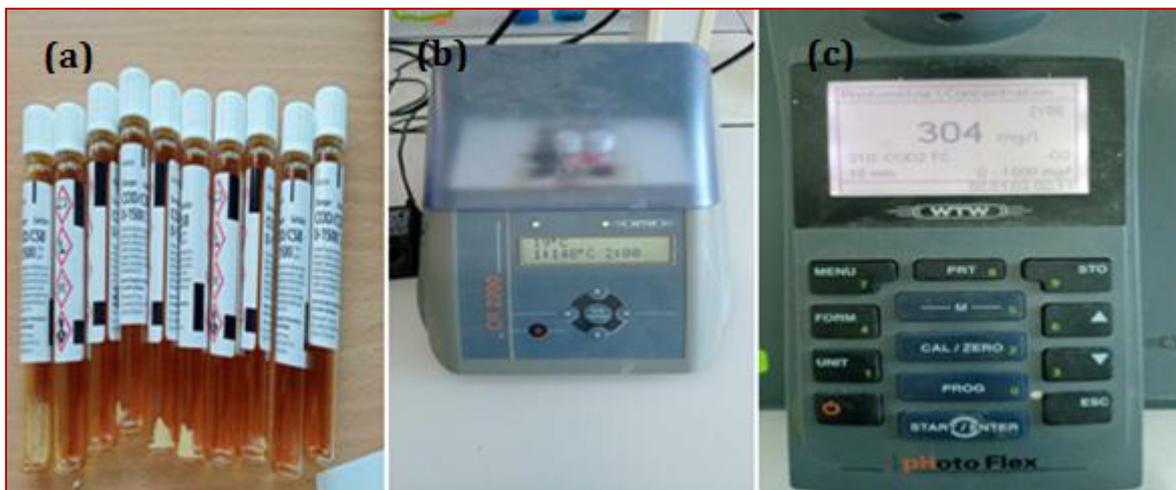


Figure II.9 | (a) Réactifs pour la mesure de la DCO, (b) Thermomètre (CR2200), et (c) Photomètre (Photo Flex)

Tableau II.6 | Matériel et procédure de la détermination de la DCO

Méthode Dichromate ISO 6060-1989, DIN 38409- H41-H44
Matériels
Echantillon d'eau usée, micro pipette, thermomètre, spectrophotomètre (Photo Flex), le réactif DCO (LCK 314) pour les faibles concentrations, le réactif DCO (LCK 114) pour les fortes concentrations et l'eau distillée.
Procédure
Prendre 2 ml d'eau Blanc à l'aide de micro pipette
On verse le volume l'eau Blanc dans le tube en ferme le tube hermétiquement.
Prendre 2ml d'eau usée à l'aide de micro pipette
On verse le volume d'eau usée dans le deuxième tube et en ferme hermétiquement.
Métrer les deux tubes dans thremoréacteur pendant 2h a 148°C
Laisser les tubes pour refroidir
Programmer le photomètre au prg DCO
Lire le tube du l'eau distillé premièrement après le tube du l'eau usée
Note la valeur de DCO

II.3.6. Protocole de mesure de l'OD de l'eau usée

L'OD joue un rôle dans la mesure des paramètres, car il constitue la base des tests de DBO₅ et de taux d'absorption. La nitrification peut être inhibée par une faible concentration d'oxygène, tandis qu'une concentration trop élevée peut provoquer une nitrification excessive. Les analyses d'OD ont été effectuées sur le site d'étude, après le traitement dans l'effluent traité final, en utilisant une sonde Multiparamètre modèle HI9829 préalablement calibrée. Il est primordial de surveiller l'OD afin de vérifier le bon déroulement des différentes étapes du traitement des eaux usées dans la station d'épuration dans son ensemble.

II.3.7. Protocole de mesure MES des eaux usées

Le but est d'évaluer la quantité de MES présente dans un échantillon d'eau. On prépare des échantillons d'essai de 100 ml d'eau homogénéisée, puis on les filtre sur une membrane de 0.45 μm . Les filtres contenant les MES retenues sont ensuite séchés à l'étuve à 105°C pendant 1 heure. L'opération de séchage est répétée jusqu'à obtenir une masse constante du filtre. La teneur totale en MES de l'échantillon est alors calculée par différence entre la masse finale du filtre avec les matières sèches et sa masse initiale avant filtration. Cette méthode d'analyse des MES par filtration, séchage est conforme à la norme française NF T90-105 (AFNOR, 1997) (Figure II.10, Tableau II.7)



Figure II.10 | Fiole à vide, entonnoir, pompe à vide, Dessiccateur, Etuve, et Papiers filtre (90 mm)

Tableau II.7 | Matériel et procédure de la détermination de la DCO

Méthode de filtration
Matériel
Échantillon d'eau usée, Fioles à vide, Filtres en fibres de verre (pore de 90mm), Entonnoirs, Pompes à vide, Étuve, Balance analytique, Dessiccateur et Eau distillée
Procédure
<p>Préparation du matériel:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rincer soigneusement les fioles à vide et les filtres en fibres de verre avec de l'eau distillée. - Sécher les fioles à vide et les filtres à l'étuve à 105°C pendant au moins une heure - Laisser les fioles à vide et les filtres refroidir dans un dessiccateur jusqu'à température ambiante - Noter le poids de chaque fiole à vide (M0) à l'aide d'une balance analytique.
<p>Filtration:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Agiter vigoureusement l'échantillon d'eau usée pour homogénéiser le contenu - Prélever un volume approprié d'échantillon d'eau usée (V) dans une fiole à vide. Le volume de l'échantillon doit être choisi en fonction de la concentration attendue en MES - Installer un filtre en fibres de verre sur l'entonnoir et assembler l'appareil de filtration. - Appliquer une légère dépression à l'aide de la pompe à vide pour amorcer la filtration. - Filtrer l'échantillon d'eau usée en entier. - Rincer le filtre avec une petite quantité d'eau distillée pour s'assurer que toutes les particules ont été transférées sur le filtre
<p>Séchage et pesée</p> <ul style="list-style-type: none"> - Transférer le filtre avec les MES retenues dans la fiole à vide pré-pesée - Sécher la fiole et le filtre à l'étuve à 105°C pendant au moins une heure. - Laisser la fiole et le filtre refroidir dans un dessiccateur jusqu'à température ambiante. - Peser la fiole et le filtre sec (Mf) à l'aide d'une balance analytique.
<p>Calcul</p> <ul style="list-style-type: none"> - La concentration en MES (mg/L) est calculée par la formule suivante: $\text{MES} = (\text{Mf} - \text{M0}) / \text{V} * 1000$ où: <ul style="list-style-type: none"> • MES est la concentration en MES (mg/L) • Mf est la masse de la fiole et du filtre après séchage (mg) • M0 est la masse de la fiole à vide (mg) • V est le volume de l'échantillon d'eau usée filtré (L)

II.4. Conclusion

Ce chapitre met en évidence l'importance de prendre en compte les conditions climatiques locales lors de la mise en place d'un système de traitement des eaux usées. La température, les précipitations et la qualité de l'eau brute peuvent en effet avoir un impact significatif sur l'efficacité du traitement.

Des détails sont fournis sur l'unité expérimentale utilisée pour tester les performances du système, notamment sa taille, sa configuration et les différentes technologies de traitement employées. Des illustrations permettent de visualiser la configuration et les processus.

Le chapitre décrit également les méthodes d'analyse utilisées pour mesurer les paramètres physico-chimiques comme la DBO, la DCO, les MES, etc. Les équipements et protocoles sont explicités pour assurer la fiabilité des résultats.

Ce chapitre donne un aperçu complet des travaux menés à l'université, des méthodes employées et souligne l'importance de considérer les conditions climatiques spécifiques au site. Ces informations sont essentielles pour relever les défis du traitement des eaux usées et développer des solutions pérennes adaptées au contexte local.

Partie 3 | Résultats et interprétations

Chapitre III | Résultats et interprétations

Chapitre III / Résultats et Interprétations

III.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer la qualité des eaux usées brutes et de mesurer les performances épuratoires de la HCW. Afin d'accomplir cela, des paramètres de pollution ont été étudiés concernant les eaux usées brutes de la ville d'El-Anasser, Bordj Bou-Argeridj, en Algérie. Les indicateurs comprennent les matières en suspension (MES), la turbidité (TUR), la demande biochimique en oxygène sur 5 jours (DBO₅), la demande chimique en oxygène (DCO), ainsi que la température (T), le pH, la conductivité électrique (CE), l'oxygène dissous (OD), la salinité et les solides dissous totaux (TDS).

Les performances du dispositif expérimental de traitement par HCWs seront évaluées en comparant les résultats obtenus aux normes recommandées par le Journal Officiel de la République Algérienne (JORA) et l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).

Les résultats sur l'épuration des eaux usées sont présentés afin de fournir des informations sur l'efficacité de HCW, la qualité des eaux et les défis à relever pour une gestion durable des ressources en eau.

III.2. Caractérisation des eaux usées municipales

Une analyse approfondie de la qualité de l'eau a été effectuée pour évaluer l'efficacité du traitement des eaux usées au laboratoire GP de l'université de BBA. L'objectif de cette analyse était de mesurer divers paramètres physico-chimiques essentiels dans les eaux brutes et traitées. En outre, on a calculé le facteur de biodégradabilité K (DCO/DBO₅) afin de donner une évaluation plus exhaustive de la qualité de l'eau.

Au cours d'une période d'étude de six semaines, six échantillons ont été prélevés pour chaque paramètre analysé. Les résultats de ces analyses, ainsi qu'une description détaillée des caractéristiques de la pollution des eaux usées de la ville de d'El-Anasser après le traitement, sont présentés dans le **Tableau III.1**, tandis que les rendements d'élimination sont répertoriés dans le **Tableau III.2**.

Tableau III.1 | Résultats des analyses statistiques descriptives des données des eaux usées brutes et traitée par le système expérimental HCW de la ville de d'El-Anasser.

Eaux usée d'alimentation et traitée: Moy± ET, (Min-Max), (SNS)						
Date de prélèvement (Mar 2024, Mai 2024)						
Paramètres	Unité	n	Influent	Sortie S1	Sortie S1	JORA,2009
T	°C	6	16.95 ± 4.27 (13 - 25)	15.26 ± 2.36 (12.6 - 19)	15.06 ± 3.10 (10.8 - 19.9)	30
pH	/	6	7.37 ± 0.26 (7.19 - 7.86)	7.55 ± 0.56 (6.87 - 8.28)	7.84 ± 0.74 (7.2 - 9.19)	5.5 – 8.5
CE	mS/cm	6	2.60 ± 0.45 (2.04 - 3.23)	1.625 ± 0.40 ^(EU) (1.2 - 2.32)	1.33 ± 0.48 ^(EU) (0.46 - 1.71)	/
OD	mg/l	6	0.25 ± 0.081 (0.18 - 0.38)	2.96 ± 0.93 ^(EU) (1.87 - 4.24)	4.13 ± 1.74 ^(EU) (2.21 - 6.44)	/
Salinité	mg/l	6	1.63± 0.22 (1.4 - 2)	0.95± 0.137 ^(EU) (0.8 - 1.1)	0.78±0.312 ^(EU) (0.2 - 1.1)	/
SDT	mg/l	6	1959 ± 238.55 (1723 - 2414)	1715.8 ± 173.97 (1515 - 1965)	1523±545.64 (489 - 1974)	/
MES	mg/l	6	115.83 ± 42.61 (65.33-162.66)	17.10±22.88 ^(EU) (1.3 - 62.66)	10.48±16.55 ^(EU) (0.4 - 42.66)	600
TUR	NTU	6	229.83±28.44 (190 - 260)	14.42± 5.56 ^(EU) (8.1 - 22.5)	10.21± 11.11 ^(EU) (4 - 32.6)	
DCO	mg/l	6	890.33± 236.02 (604 - 1160)	188.6±45.33 ^(EU) (112 - 240)	150.16±86.69 ^(EU) (80 - 290)	1000
DBO ₅	mg/l	6	365±98.33 (240 - 480)	16.5± 12.94 ^(EU) (5 - 35)	12.5± 8.21 ^(EU) (5 - 25)	500

Tableau III.2 | Efficacité d'élimination (%) de la pollution

Paramètres	Rendement de différents HCWs (%)		
	R% Sortie S1	R% Sortie S2	Écart relatif (%)
DCO	76.96	83.91	6.95
DBO ₅	94.48	96.00	1.51
MES	84.09	90.14	6.04
TUR	93.47	95.24	1.77
Salinité	41.67	52.64	10.96
TDS	11.72	23.00	11.27
EC	37.78	49.59	11.80

III.3. Evaluation des paramètres physico-chimiques

Au cours de l'étude, on évalue la qualité de l'eau en mesurant les concentrations de différents paramètres physiques et chimiques. En complément de ces mesures, on évalue également la qualité de certains indicateurs afin de fournir une évaluation globale de la pollution organique des eaux usées.

III.3.1. Température (T)

Les réactions chimiques et biochimiques, la croissance des organismes aquatiques, en particulier des micro-organismes sont affectées par les températures (Wijaya, 2016).

Le **Tableau III.1** présente l'évolution des températures après avoir analysé la température des eaux usées brutes prélevées sur une période de 6 semaines, de Mars à Mai. Les données sur les températures des eaux usées à l'entrée et à la sortie du système de HCW sont essentielles pour évaluer l'efficacité du traitement et les conditions opérationnelles du système. La température moyenne à l'entrée (16.95°C) diminue légèrement à la sortie S₁ : 15.26°C à S₂ : 15.06°C (**Figure III.1**). Cela suggère que le système de HCW exerce une influence modératrice sur la température, probablement en raison de l'évaporation des plantes et de la dissipation de la chaleur dans le système de traitement.

Les résultats de cette étude ressemblent à ceux obtenus par (Vymazal, 2013) (entre 15°C et 20°C) dans un système HCW, sont légèrement supérieurs à ceux rapportés par (Mc Cartney et al., 2015), et sont inférieurs à ceux rapportés par (Zineb et al., 2013) (28.22°C), (Zorai et al., 2023) (28.22°C) et (Chadli, 2020) à Naâma (25.65 °C). En outre, les données thermiques démontrent l'efficacité et la stabilité du système de la HCW.

L'écart type passe de 4.27°C à l'entrée à 2.36 °C à la sortie S₁ et 3.10 °C à la sortie S₂. Ceci démontre une baisse de la fluctuation de la température des eaux usées après leur traitement. La diminution de la variabilité à la sortie suggère que le système de HCW maintient la stabilité thermique des eaux usées, garantissant ainsi une température plus homogène. Les valeurs maximales et minimales sont également plus restreintes à la sortie (19°C et 12.6°C pour la sortie S₁ ; 19.9°C et 10.8°C pour la sortie S₂) par rapport à l'entrée (25°C et 13°C). Cela reflète la capacité du système à atténuer les extrêmes de température, assurant ainsi une meilleure gestion des variations thermiques des eaux usées.

La réduction des températures moyennes et la stabilisation des écarts indiquent que le système de HCW est efficace non seulement pour le traitement des polluants mais aussi pour la gestion thermique. Des températures plus stables peuvent améliorer les processus biologiques, comme la nitrification et la dénitrification, qui sont sensibles aux variations de température.

Les différences entre les sorties S₁ et S₂ (avec des écarts types légèrement différents) peuvent indiquer des variations dans la conception ou l'opération des différents segments du système de HCW. Cela pourrait être dû à de contact avec l'atmosphère

Les données de température montrent que le système de HCW fonctionne efficacement pour modérer et stabiliser les températures des eaux usées. Cette stabilisation est bénéfique pour l'efficacité globale du traitement et pour le maintien de conditions optimales pour les processus biologiques nécessaires à l'épuration des eaux usées.

Des analyses ont démontré que la température à l'entrée et à la sortie 1 et 2 de ces dispositifs respectait les valeurs limites établies par les normes algériennes [Annexe I tableau 2 \(JORA 2006\)](#).

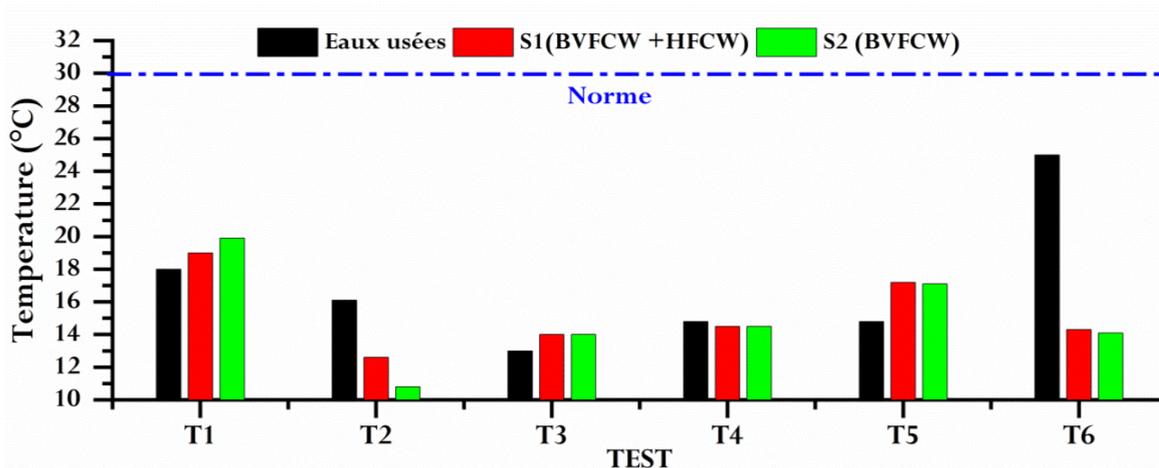


Figure III.1 | Variation des valeurs moyennes de la T des eaux usées avant et après le traitement.

III.3.2. Potentiel Hydrogene (pH)

Le pH représente un indicateur permettant de déterminer si un milieu est acide ou basique (APHA et al., 2012). L'activité métabolique et la prolifération des bactéries sont influencées par son niveau, ainsi que la solubilité des composés chimiques (Morin et al., 2017).

Le [Tableau III.1](#) présente les résultats de la mesure du pH des eaux usées de l'entrée et des sorties. On peut observer que la moyenne du pH des eaux usées brutes est de (7.37 ± 0.26) , les valeurs variant de 7.19 à 7.86. Quant à la sortie S₁ du système, la moyenne est de (7.55 ± 0.56) , les valeurs allant de 6.87 à 8.28, il y a une hausse plus significative de la moyenne et de la variabilité, ce qui se poursuit dans la sortie S2 avec une moyenne (7.84 ± 0.74) allant de 7.2 à 9.19.

Les conclusions de cette étude sont similaires à celles obtenues par d'autres recherches précédentes, comme (Friedler et Hadari, 2006) qui ont observé des valeurs de pH allant de 7 à 8 et (Zhang et al., 2012) allant de 8 à 10 ; ainsi que (Vymazal, 2011) qui ont observé des valeurs de pH allant de 6.5 à 8.5 lors du traitement des eaux usées.

L'analyse statistique des valeurs de pH révèle des différences significatives entre les sorties des systèmes de traitement. Le pH moyen à la sortie S_1 (BVFCW + HFCW) est de 8.48, ce qui est significativement plus élevé que le pH de référence (7) avec une $p = 0.01$. Cela indique que l'ajout de HFCW à BVFCW entraîne une augmentation notable du pH par rapport aux autres sorties et au pH de référence. En revanche, le pH moyen des eaux usées et de la sortie S_2 (BVFCW₂ seul) n'est pas significativement différent du pH de référence, avec des $p = 0.05$. Ces résultats suggèrent que le traitement par BVFCW₂ seul n'a pas d'impact significatif sur le pH. L'ajout de HFCW à BVFCW (sortie S_1) augmente significativement le pH, tandis que le traitement par BVFCW₂ seul ne modifie pas le pH de manière notable par rapport au pH de référence.

Les valeurs de pH des eaux traitées se situent toujours dans une plage acceptable pour le rejet dans l'environnement, oscillant entre neutre et légèrement basique. Cette plage de pH est idéale pour la plupart des applications écologiques. Les deux sorties de traitement utilisés (BVFCW₁ + HFCW et BVFCW₂) se sont révélés efficaces pour maintenir le pH des eaux usées traitées dans cette plage. L'augmentation du pH après traitement peut être attribuée à l'action de la biomasse et aux processus chimiques dans les systèmes HCW. Selon les normes de l'OMS, un pH acceptable se situe entre 6.5 et 8.5. Le pH des effluents était inférieur à la valeur limite des normes algériennes [Annexe I tableau 2 \(JORA, 2006\)](#), ce qui prouve l'efficacité des systèmes pour produire une eau adaptée au rejet ou à d'autres utilisations avantageuses.

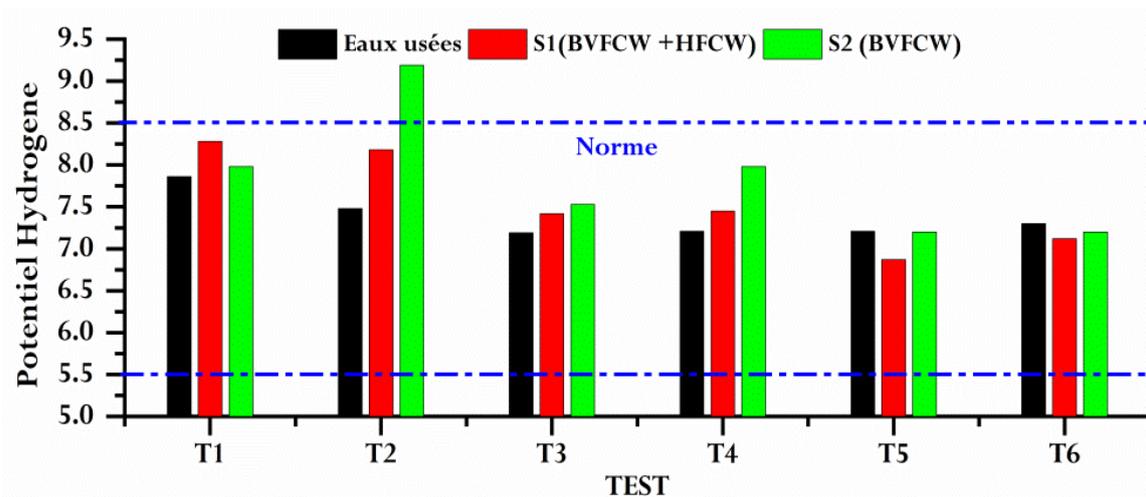


Figure III.2 | Variation des valeurs moyennes du pH des eaux usées avant et après traitement

III.3.3. Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique (CE) est un paramètre facile et fréquemment utilisé pour surveiller la qualité des eaux. Celle-ci permet d'estimer la minéralisation totale de l'eau et la quantité de sels dissous qui y sont présents. (Rodier, 1984).

La CE diminue considérablement du point d'entrée aux points de sortie, passant de $(2.60 \pm 0.45 \text{ mS/cm})$ à l'entrée à $(1.62 \pm 0.40 \text{ mS/cm})$ à la sortie S₁ et à $(1.33 \pm 0.48 \text{ mS/cm})$ à la sortie S₂, indiquant une purification efficace par réduction des ions dissous. Les échantillons non traités, avec une CE initiale de 4.04 à 5.75 mS/cm, montrent une diminution après traitement à 1.2 à 2.32 mS/cm à la sortie S₁ et 0.46 à 1.71 mS/cm à la sortie S₂, ce qui réduit la variabilité des ions dissous. Malgré un écart type légèrement supérieur à la sortie S₂ (0.48 mS/cm) par rapport à la sortie S₁ (0.40 mS/cm), les fluctuations des niveaux de CE sont globalement inférieures à l'entrée (0.45 mS/cm). Ces résultats, similaires à ceux de Taha Ahmed et al. (2022), montrent une réduction de 2.60 mS/cm à l'entrée à 1.62 mS/cm et 1.33 mS/cm aux sorties. Pedro N. Carvalho et al. (2017) ont également constaté que les systèmes hybrides combinant flux horizontal et vertical réduisent efficacement la CE, ce qui est cohérent avec notre étude. Vymazal (2018) a trouvé des réductions significatives de la CE dans différentes CWs, en fonction de la conception et des paramètres opérationnels. Les mesures indiquent que les systèmes de HCW combinés (horizontal + vertical) sont efficaces pour réduire les ions dissous, améliorant ainsi la qualité de l'eau.

Les eaux usées ont initialement une CE de 1.23 à 3.05 mS/cm, qui diminue après traitement dans le système HCW Sortie S₁ et Sortie S₂. La sortie S₁ permet une réduction de 28.17% à 58.66%, avec une moyenne de 37.79%, tandis que la sortie S₂ est plus performante, avec des réductions de 40.20% à 77.45% et une moyenne de 49.59%. Les moyennes générales montrent que les deux sorties abaissent significativement la CE, le système BVFCW seul (Sortie 2) étant le plus efficace avec près de 50% de réduction en moyenne, contre environ 38% pour le système combiné (Sortie 1).

Les résultats montrent que le système combiné BVFCW+HFCW réduit la CE de 0.98 en moyenne par rapport aux eaux usées brutes, de manière statistiquement significative ($p=0,0049$). Le système BVFCW seul réduit la CE de 1,27, également de manière très significative ($p=0.00035$). La différence de 0.29 entre les deux systèmes n'est pas significative ($p=0.5143$). En résumé, les deux systèmes réduisent significativement la CE par rapport aux eaux usées brutes, avec une performance légèrement meilleure pour le système BVFCW seul, bien que non significative.

Malgré l'absence de différence significative de conductivité électrique (CE) entre les eaux usées brutes et les eaux traitées, cela démontre l'efficacité du système HCW pour réduire la salinité et la minéralisation. Il est à noter que la baisse significative de la CE obtenue grâce aux systèmes HCW de-vrait permettre la réutilisation sans risque majeur des eaux traitées pour l'irrigation ou d'autres usages, Selon [JORA \(2006\)](#), ils doivent être finalement qualifiés en respectant les recommandations de l'OMS et la réglementation algérienne en vigueur.

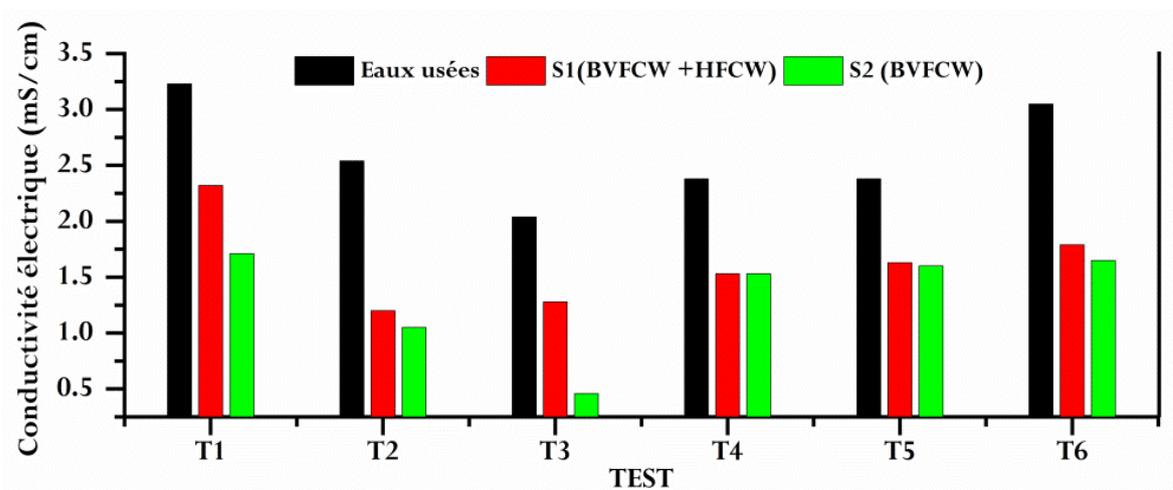


Figure III.3 | Variation mensuelle des valeurs moyennes de la CE des eaux usées avant et après traitement

III.3.4. Salinité

La salinité globale de l'eau constitue un paramètre clé dans l'évaluation de la qualité des eaux usées. Elle peut être estimée au moyen de la minéralisation totale ou bien être mesurée via la conductivité électrique (CE) ([Kankou, 2010](#)).

Une étude réalisée sur six semaines, de mars à mai, a examiné les niveaux de salinité à l'entrée et à deux sorties distinctes du système ([Figure III.4](#)). À l'entrée, la salinité moyenne était de $(1.63 \pm 0.22 \text{ mg/L})$ et des valeurs allant de 1.4 à 2 g/L. À la première sortie, comprenant un système de marais artificiel horizontal et vertical (BVFCW+HFCW), la salinité moyenne a diminué à $(0.95 \pm 0.137 \text{ mg/L})$, indiquant une réduction efficace de la salinité et de sa variabilité. La deuxième sortie, ajoutant un autre système horizontal (BVFCW), montrait une salinité moyenne encore réduite à $(0.78 \pm 0.312 \text{ mg/L})$, mais avec une variabilité accrue, suggérant des fluctuations nécessitant des investigations supplémentaires. En général, les deux systèmes montrent une efficacité notable dans la réduction de la salinité des eaux usées, le système BVFCW seul offrant une performance

légèrement supérieure (réduction moyenne de 52,64%) par rapport au système combiné (réduction moyenne de 41,68%). Les analyses statistiques confirment la réduction significative de la salinité par rapport aux eaux usées brutes, bien que la différence entre les deux systèmes ne soit pas statistiquement significative. Des études antérieures, telles que celles de [Zhang et al. \(2014\)](#) et [Castillo et al. \(2019\)](#), corroborent ces résultats en montrant que les systèmes de marais artificiels réduisent efficacement les polluants et les nutriments, malgré une certaine variabilité influencée par des facteurs environnementaux et opérationnels.

L'étude révèle que les systèmes de HCW étudiés sont efficaces pour diminuer la salinité des eaux usées à des niveaux qui respectent les normes de l'OMS pour l'eau potable et les recommandations des [JORA 2006](#) pour les eaux usées traitées. Grâce à ces dispositifs, il est possible de convertir des eaux usées avec une salinité initiale moyenne de 1.63 mg/L en eaux avec des salinités moyennes de 0.95 mg/L et 0.78 mg/L, ce qui est bien inférieur aux limites recommandées pour l'irrigation et les rejets environnementaux.

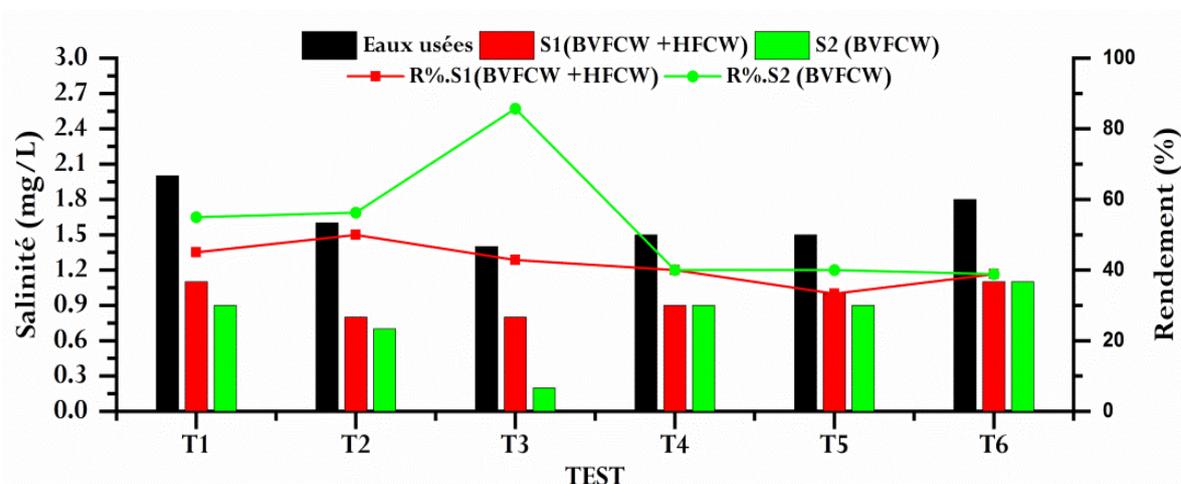


Figure III.4 | Variation des valeurs moyennes de la salinité des eaux usées avant et après traitement

III.3.5. Solides dissous totaux (SDT)

La quantité de SDT présente dans les eaux usées dépend de leur origine et de leur composition chimique. Dans les régions arides, elle peut être plus élevée en raison d'une salinité naturelle plus élevée ([Stefanakis, 2020](#)).

La concentration moyenne de SDT (**Figure III.5**) dans les eaux usées brutes est de $(1959 \pm 238.55 \text{ mg/L})$, avec une plage de variation allant de 1723 à 2414 mg/L, ce qui correspond à la fourchette attendue pour les eaux usées domestiques. Après traitement, la

Sortie 1 (BVFCW + HFCW) présente une concentration moyenne de $(1715.83 \pm 173.97 \text{ mg/L})$, avec une variation de 141 à 2196 mg/L, présente une augmentation significative de la concentration par rapport aux eaux usées brutes. La concentration moyenne de SDT dans la Sortie 2 (BVFCW) est de $(1523 \pm 545.64 \text{ mg/L})$, avec une variation de 489 à 1974 mg/L, ce qui représente une augmentation modérée par rapport aux eaux usées brutes et une concentration légèrement inférieure à celle de la Sortie 1. La comparaison des moyennes de SDT révèle que la Sortie 1 a une concentration de TDS significativement plus élevée que les eaux brutes et la Sortie 2, et présente également une variabilité plus importante de la concentration de SDT. Cependant, l'analyse statistique montre que les réductions de SDT dans les deux systèmes ne sont pas significatives (Sortie 1 : $p=0.4848$; Sortie 2 : $p=0.1217$) et qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux systèmes ($p=0.6289$). Ces résultats peuvent être dus à la grande variabilité des échantillons et au nombre limité de mesures (6 pour chaque sortie).

Ces résultats sont en accord avec les recherches menées par [\(Kadlec et Wallace, 2009\)](#) dans leur livre intitulé « Treatment Wetlands », rapportent que les CWs peuvent réduire les TDS de manière significative, bien que les réductions puissent varier en fonction des conditions spécifiques et des configurations des systèmes. Selon [Vymazal \(2011\)](#), lors de son étude des CWs, il a été observé que les SDT peuvent être réduits de 10 à 50 %, ce qui correspond à la diminution observée dans nos résultats.

Les concentrations en TDS après traitement des eaux usées varient. Les eaux brutes peuvent contenir jusqu'à 2414 mg/L de SDT. Après traitement, le système BVFCW seul respecte le seuil d'irrigation de l'OMS, tandis que le système combiné est légèrement au-dessus. Pour les normes algériennes, seul le système BVFCW respecte les seuils pour l'irrigation des cultures maraîchères, mais aucun des systèmes ne respecte les recommandations pour l'eau potable.

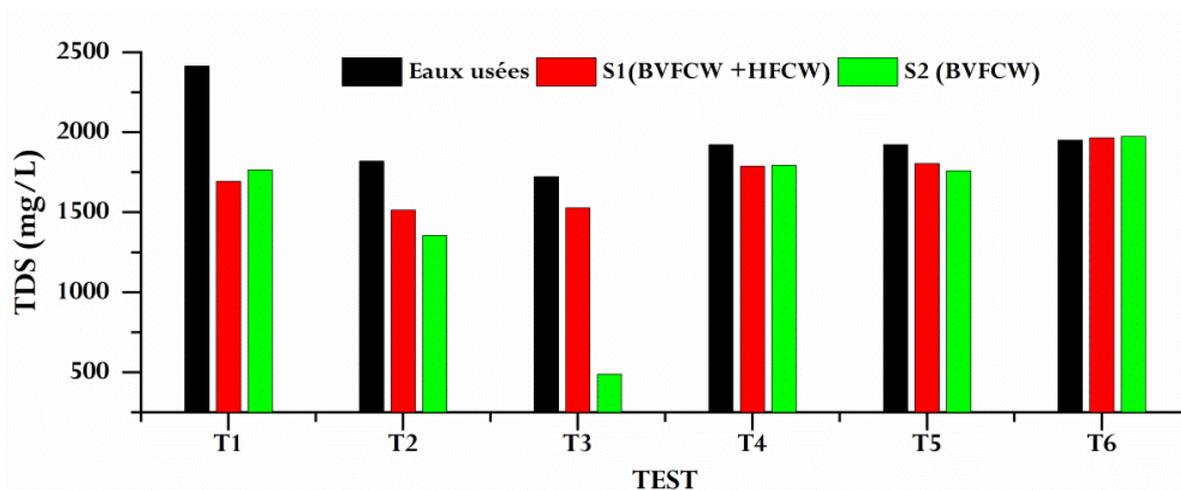


Figure III.5 | Variation des valeurs moyennes du SDT des eaux usées avant et après traitement

III.3.6. Matière en suspension (MES)

Les eaux usées renferment des particules minérales et organiques appelées MES, qui peuvent être éliminées par des techniques physiques comme la filtration, la sédimentation et le dépôt de surface dans des systèmes de traitement comme les CWs (Vymazal, 2008; Vincent et al., 2014). Plusieurs facteurs influencent les concentrations de MES dans les eaux usées, tels que la nature des rejets et les caractéristiques des sols (Rodier, 1984). Selon Metcalf et Eddy (2003), les MES ont un effet néfaste sur l'eau en altérant la turbidité et en diminuant la pénétration de la lumière pour la photosynthèse. Les concentrations typiques dans les eaux usées domestiques varient de 110 mg/L à 400 mg/L.

Nos résultats (Tableau 1) montrent la performance du système expérimental de HCW pour l'élimination de la matière en suspension.

Selon les conclusions exposées dans la Figure III.6, le système de HCW composé d'un lit à écoulement vertical sous surfacique dirouté (BVFCW₁) suivi d'un lit à écoulement horizontal sous surfacique (HFCW) (Sortie : S₁) et d'un lit BVFCW₂ (Sortie : S₂) permet une élimination efficace des MES des eaux usées. De 115.88 ± 42.61 mg/L dans les eaux usées brutes, les concentrations moyennes en MES fluctuent entre $17,1 \pm 22.8$ mg/L en sortie S₁ (BVFCW₁+HFCW) et 10.48 ± 16.55 mg/L en sortie S₂ du BVFCW₂. Les écart-types relativement élevés (22.88 et 16.55 mg/L) indiquent cependant une certaine variabilité des performances, probablement liée aux variations de charge en entrée (Min : 65.33 à Max : 162.66 mg/L de MES dans les eaux usées brutes). Les rendements épuratoires atteignent donc respectivement 84.09% et 90.14% pour les deux sorties de traitement.

L'analyse statistique des résultats d'élimination des MES par le système HCW de montre des différences significatives entre les eaux usées brutes et les effluents traités. La comparaison des moyennes (MeanDiff) indique une réduction de 98.78 mg/L de MES après traitement par le système BVFCW₁+HFCW (Sortie S₁) et de 105.39 mg/L après traitement par le BVFCW₂ (Sortie S₂) par rapport aux eaux usées brutes. Les valeurs de P probabilités associées ($9.86 \cdot 10^{-05} < 0.05$ et $4.90 \cdot 10^{-05} < 0.05$), confirment que ces différences sont statistiquement significatives. En revanche, la différence de 6,6 mg/L entre les deux sorties de traitement (S₂ et S₁) n'est pas significative ($P = 0.92 > 0.05$). Ces résultats suggèrent que les deux configurations de HCW sont efficaces pour l'abattement des MES.

Selon les résultats de cette étude, les résultats obtenus sont similaires à ceux observés dans la littérature. [Rani & Pohekar \(2021\)](#) ont rapporté un taux de 86.20 %, tandis que [Zorai et al \(2023\)](#) ont rapporté un taux de 88.55 % et 89.93 pour une HCW à écoulement VF-HF plantée par différents types de plantes. Par ailleurs, les conclusions obtenues étaient plus élevées que celles rapportées par [Comino et al \(2011\)](#) (80.00 %) et par [Haydar et al \(2020\)](#) (74.00%) pour une HCW à écoulement VF-HF.

Par rapport à la (sortie 1), les résultats obtenus dans cette étude sont similaires à ceux observés dans la littérature pour l'élimination des MES dans les HCWs, [Rani & Pohekar \(2021\)](#) ont signalé un taux d'élimination du MES de 86.20 % pour une CWs à écoulement hybride VF-HF et [Zorai et al \(2023\)](#) ont signalé un taux d'élimination du MES de (88.55 % et 89.93) pour une CWs à écoulement hybride VF-HF plantée par différent type de plantes. D'autre part, les résultats obtenus étaient supérieurs à ceux rapportés par [Comino et al \(2011\)](#) (80.00 %) et par [Haydar et al \(2020\)](#) (74.00%) pour une CWs VF-HF.

Les taux d'élimination des MES sont améliorés de 6,04% grâce au système BVFCW₂, avec un taux d'élimination global de 90,14%. D'autres études ont montré des résultats similaires à un réacteur à chicane anaérobie et un HCW, (92.20 %) par [Gholipour & Stefanakis \(2021\)](#).

Malgré des concentrations variables des MES d'entrée, le système HCW a atteint une efficacité d'élimination du MES de plus de 90 %, dépassant ainsi les niveaux moyens des autres systèmes de CWs, principalement grâce à une filtration efficace lors de la phase initiale des HCWs ([Fernandez-Fernandez et al., 2020](#)), démontrant ainsi la capacité du BVFCW à éliminer le MES ([Calheiros et al., 2009](#)). Selon [JORA \(2006\)](#) et [JORA \(2012\)](#), les niveaux de MES dans les effluents étaient en dessous de la valeur limite des normes algériennes (35 mg/L).

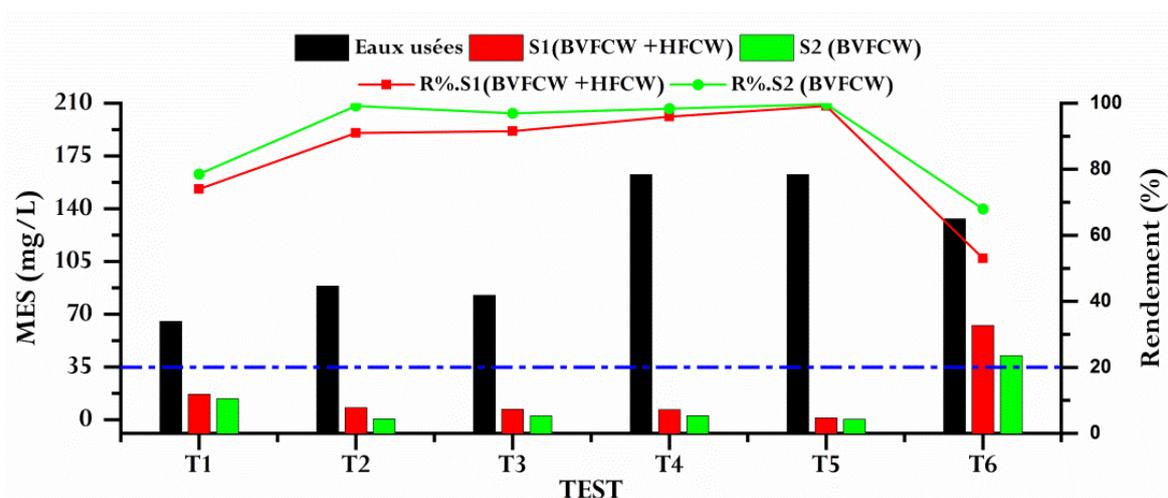


Figure III.6 | Variation des valeurs moyennes de la MES des eaux usées avant et après traitement

III.3.7. Turbidité (TUR)

L'argile, le limon, les grains de silice et les matières organiques peuvent être présents dans les eaux usées, ce qui entraîne une turbidité significative. La turbidité, qui correspond au niveau de trouble d'un liquide, est un indicateur indirect de la quantité de particules en suspension (Schroeder, 2003).

Les eaux usées ont des valeurs initiales de turbidité variant de 190 à 260 NTU. Les systèmes de traitement Sortie S₁ (BVFCW₁+HFCW) et Sortie S₂ (BVFCW₂) réduisent fortement cette turbidité. Les statistiques descriptives montrent un total de 6 échantillons, avec des moyennes de turbidité de (229.83 ± 28.44 NTU) pour les eaux brutes, (14.42 ± 5.56 NTU) après Sortie S₁, et (10.21 ± 11.11 NTU) après Sortie S₂, indiquant une nette diminution. Les systèmes montrent des réductions moyennes de turbidité de 93.47% pour Sortie S₁ et 95.24% pour Sortie S₂, avec des variations de 83.94% à 98.42% pour Sortie S₁, et de 91.64% à 98.41% pour Sortie S₂ (Figure III.7). Les résultats révèlent que le BVFCW₂ seul est légèrement plus efficace et stable. Les différences de turbidité entre les sorties sont très significatives, avec une réduction moyenne de 215.41 NTU pour Sortie S₁ et 219.62 NTU pour Sortie S₂ par rapport aux eaux brutes, toutes deux très significatives (P<0,0001). Il n'y a pas de différence significative entre les deux sorties (p=0,9132). Les procédés de phytoépuration, notamment le BVFCW₂ seul, sont très efficaces pour clarifier les eaux usées, réduisant considérablement les matières en suspension responsables de la turbidité, avec des performances équivalentes entre la sortie combiné et le BVFCW₂ seul.

Les systèmes de traitement Sortie S₁ (BVFCW₁+HFCW) et Sortie S₂ (BVFCW₂) réduisent significativement la turbidité des eaux usées, mais les valeurs obtenues ne sont

pas conformes aux normes de l'OMS pour l'eau potable (5 NTU) ni aux normes JORA 2006 (5 NTU). Toutefois, le système Sortie S₂ (BVFCW₂) s'approche de la norme JORA 2009 (10 NTU), bien qu'il soit légèrement au-dessus.

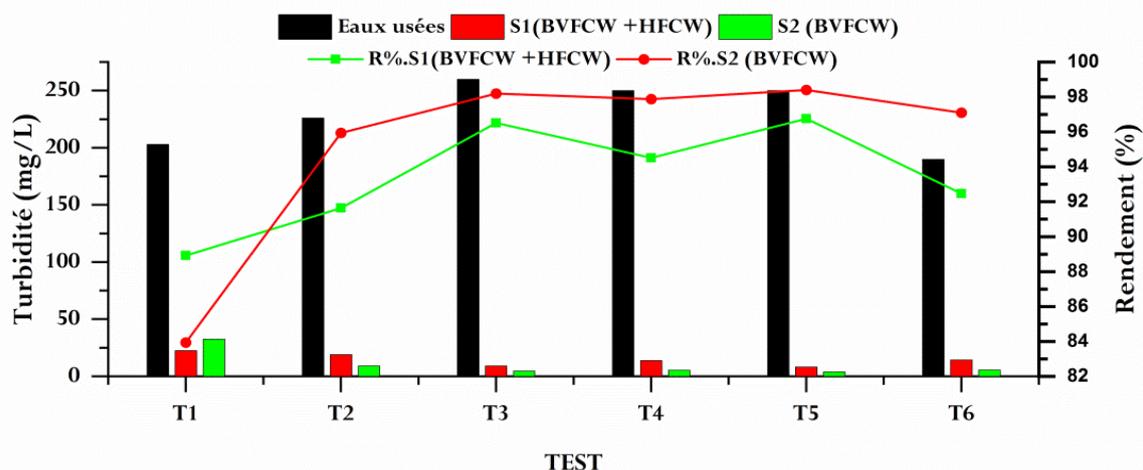


Figure III.7 | Variation de la turbidité des eaux usées avant et après traitement

III.3.8. Coefficient de biodégradabilité (Rapport DCO/ DBO₅)

Le [tableau III.3](#) présente le coefficient de biodégradabilité des eaux usées, représenté par le ratio COD/BOD₅, qui est un indicateur largement utilisé pour évaluer la biodégradabilité des eaux usées, allant de 2.11 à 3.41 avec une moyenne de 2.47, ce qui suggère que le contenu organique des eaux usées est biodégradable et provient uniquement ([Atinkpahoun, 2018](#)).

Tableau III.3 | Coefficient de biodégradabilité.

Tests	DCO	DBO ₅	K=DCO/DBO ₅
Test 1	680	290	2.34
Test 2	604	240	2.51
Test 3	762	360	2.11
Test 4	1068	480	2.22
Test 5	1068	480	2.22
Test 6	1160	340	3.41
Moy	890.33	365	2.47

III.3.9. Oxygène dessous (OD)

Avant et après le traitement des eaux usées par des CWs, l'analyse des concentrations en oxygène dissous (OD) est réalisée. ([Figure III.8](#)) révèle une nette amélioration de la qualité de l'eau. Initialement, les eaux usées brutes présentaient une faible teneur moyenne en OD de (0.25 ± 0.081 mg/L), reflétant des charges organiques élevées consommatrices d'oxygène. Après le passage dans (BVFCW₁+HFCW) S1

combinant des bassins à écoulement vertical et horizontal, on observe une augmentation significative de la concentration moyenne en OD à (2.96 ± 0.93 mg/L). Le traitement par (BVFCW2) S2 constituée uniquement de bassins à écoulement vertical conduit à une concentration moyenne en OD encore plus élevée de (4.13 ± 1.74 mg/L). Les niveaux d'OD augmentent considérablement après le passage dans les CWs, ce qui démontre l'efficacité du traitement pour éliminer les charges organiques et réoxygéner l'eau, améliorant ainsi considérablement sa qualité. La variance observée peut être élucidée par le développement supérieur du feuillage de *Typha latifolia*, améliorant ainsi le processus de photosynthèse, comme discuté par [Rani et Pohekar \(2021\)](#).

L'analyse statistique comparative des concentrations en oxygène dissous (OD) met en évidence l'efficacité significative du traitement des eaux usées par les CWs. La différence moyenne des niveaux d'OD entre les eaux usées brutes et les effluents de (BVFCW1+HFCW) S1 est de MeanDiff =2.71 mg/L. Cette différence est statistiquement très significative ($p = 0.00249 < \alpha = 0,05$). De même, la comparaison entre les eaux brutes et les effluents de (BVFCW2) S2 constituée uniquement de bassins verticaux révèle une différence moyenne de MeanDiff =3.88 mg/L ($p < 0,0001$). Cependant, entre les deux systèmes de traitement, la différence moyenne des niveaux d'OD n'est pas statistiquement significative ($p = 0.21413 > \alpha = 0,05$). Ces résultats démontrent que bien que les deux configurations de CWs permettent une augmentation hautement significative des concentrations en oxygène dissous, l'ajout de bassins horizontaux n'apporte pas d'amélioration notable comparé au système à écoulement vertical seul.

Le phénomène de photosynthèse et la diffusion des gaz atmosphériques dans les conduits remplis d'air des plantes des zones humides pourraient expliquer l'augmentation de la densité organique des effluents, ce qui favorise le transfert d'oxygène vers les racines. ([Pérez et al., 2014](#)). De plus, l'introduction d'une aération dans l'eau brute lors de son utilisation dans les lits VFCW mis en œuvre dans cette recherche pourrait également contribuer à cette augmentation. De même, l'aération de l'eau non traitée dans les lits VFCW utilisés dans cette étude peut également jouer un rôle dans l'augmentation observée de la DO des effluents ([Rehman et al., 2017](#)).

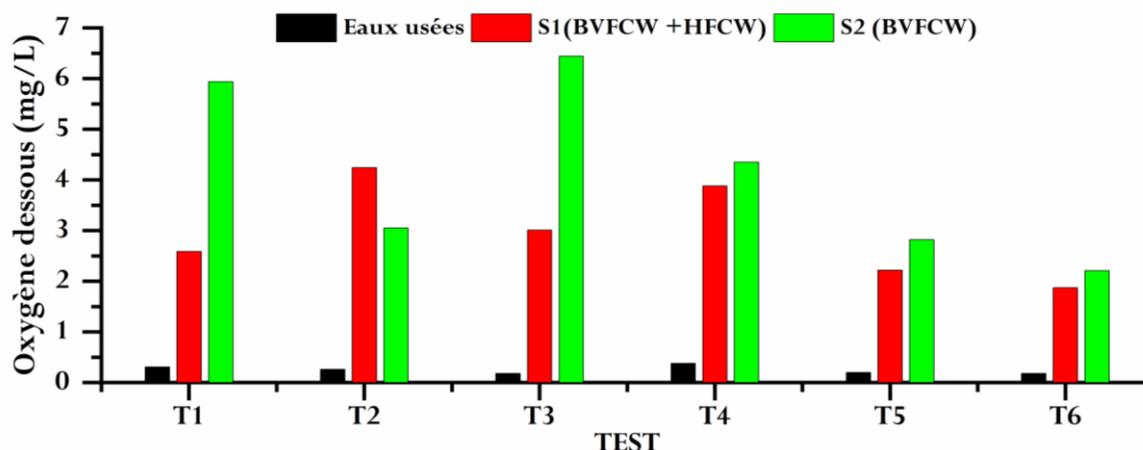


Figure III.8 | Variation de l'OD des eaux usées avant et après traitement

III.3.10. Demande chimique en oxygène (DCO)

La DCO joue un rôle essentiel dans l'évaluation de la concentration en MO dans l'eau usée, utilisé pour mesurer la quantité de substances organiques et inorganiques présentes dans l'eau, représentant l'oxygène requis pour oxyder tous les composés organiques présents dans l'eau en CO_2 et H_2O (Hopcroft, 2014).

Les concentrations de DCO (**Figure III.9**) dans les eaux usées brutes et après traitement par la HCW sont présentées dans le **tableau III.3**. Selon les tests, les niveaux de DCO dans les eaux usées brutes fluctuent entre 604 et 1160 mg/L, avec une moyenne de $(890.33 \pm 236.02 \text{ mg/L})$. Une fois dans le système HCW, les concentrations en sortie sont nettement diminuées. Les concentrations obtenues grâce au traitement en deux étapes (Sortie S1. BVFCW1 +HFCW) varient de 112 à 240 mg/L, avec une moyenne de $(188.66 \pm 45.33 \text{ mg/L})$. Le traitement final (Sortie S2. BVFCW2) réduit encore les concentrations, qui sont comprises entre 80 et 290 mg/L avec une moyenne de $(150.16 \pm 86.69 \text{ mg/L})$. Selon Metcalf & Eddy (2003), ces résultats se trouvent dans la plage des concentrations autorisées pour les eaux usées d'origine domestique, qui s'élèvent à 250 à 1000mg/L, et suggèrent que l'eau brute de la région d'étude est relativement riche en matières organiques.

On calcule les rendements d'élimination de la DCO en se basant sur les concentrations de DCO dans les eaux usées brutes et après deux étapes de traitement (Sortie 1. BVFCW + HFCW et Sortie 2. BVFCW). Les rendements d'élimination de la DCO après le traitement en sortie S1 varient de 68.5% à 90.3%, avec une moyenne de 76.96%. Le traitement final (R% S2) permet d'atteindre des rendements encore plus élevés, allant de 80.9% à 88.2% avec une moyenne de 83.91%. Ces résultats démontrent

l'efficacité des HCW testées pour éliminer la DCO des eaux usées, avec des rendements moyens de 76.9% après le traitement en premier étape et de 83.9% après le traitement final. Malgré quelques variations selon les tests, les performances restent élevées, confirmant l'intérêt de cette technique pour le traitement des eaux usées.

L'analyse statistique montre une valeur de l'écart-type élevé (236 mg/L) dans les eaux brutes reflète la variabilité des concentrations initiales de DCO, qui est progressivement réduite après les traitements (écart-types de 45.33 et 86.69 mg/L). La différence moyenne entre les concentrations d'entrée et de sortie est de 701,67 mg/L pour le traitement en (Sortie 1. BVFCW₁ +HFCW) et de 740,17 mg/L pour le traitement final (Sortie 2. BVFCW₂). Un test statistique (Tukey) a été réalisé pour évaluer la significativité des différences observées. La valeur q calculée est de 11.65 presque pour les deux comparaisons. La p-value très faible ($1.63 \cdot 10^{-6}$ et $8.09 \cdot 10^{-7}$) confirme que les différences sont hautement significatives. L'analyse statistique démontre que Le HCW testé réduisent de manière significative les concentrations de DCO des eaux usées. Les différences moyennes de -701,67 et -740,17 mg/L sont statistiquement significatives au seuil de 0,05. Ces résultats confirment l'efficacité de cette technique pour l'élimination de la DCO des eaux usées.

Les processus aérobies et les mécanismes de filtration et de sédimentation, qui sont les principaux mécanismes d'élimination dans les VFCW, sont responsables de l'élimination efficace de la DCO (Gholipour et Stefanakis, 2021). De plus, il est noté que la partie supérieure du milieu de remplissage est l'endroit où les composés organiques ont tendance à s'accumuler (Xu & Cui, 2019). La méthode d'écoulement BVFCW (ascendante et descendante) permet d'augmenter le pourcentage d'oxygène, ce qui conduit à l'élimination des substances organiques dans l'eau usées. Par rapport aux résultats d'études précédentes (système hybride), les résultats obtenus dans cette étude sont similaires que ceux indiqués par El Fanssi *et al.* (2019) et Gholipour & Stefanakis. (2021). Le système BVFCW₂, améliore les taux d'élimination des DCO de 6.95 %, avec un taux d'élimination globale de 83.91 %.

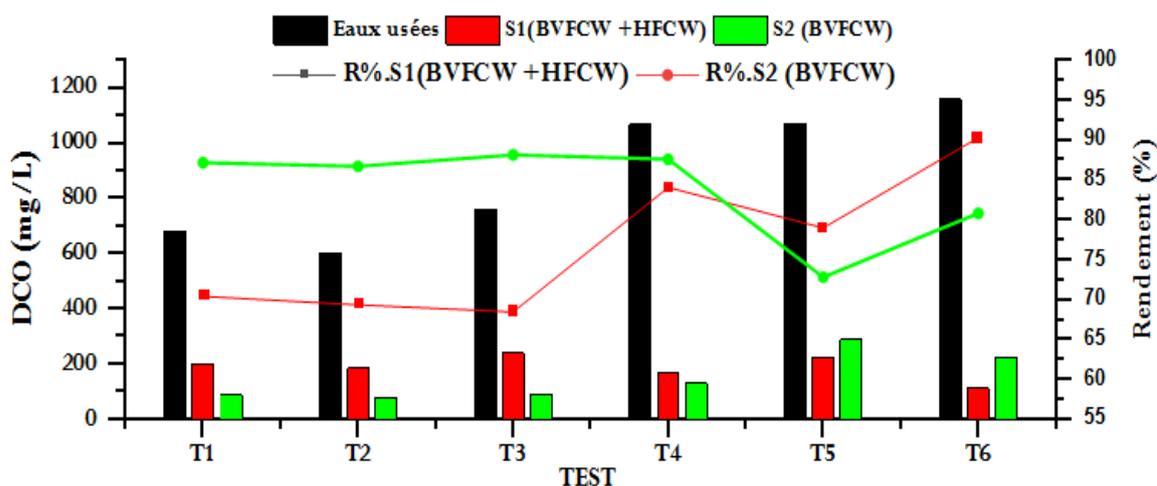


Figure III.9 | Variation des valeurs moyennes de la DCO des eaux usées avant et après traitement

III.3.11. Demande biochimique en oxygène (DBO₅)

Les niveaux de pollution dans les eaux usées sont souvent évalués à l'aide de la DBO, qui évalue la quantité de MO biodégradables présentes. La DBO est définie comme l'oxygène dissous consommé par les micro-organismes pendant cinq jours à une température de 20 °C. (Riffat, 2013).

La concentration moyenne de DBO₅ dans l'influent était de (365 ± 98,33 mg/L) lors de cette étude (tableau 1). Les résultats dépassent les niveaux de concentration approuvés pour les ménages de l'eau usée, allant de 100 à 360 mg/L, comme indiqué par Metcalf et Eddy (2003). Les résultats de cette étude sont conformes aux normes algériennes, qui spécifient une valeur maximale de rejet de 500 mg/L d'eaux usées dans le réseau d'égouts public ou la station d'épuration (JORA, 2009). Les concentrations de DBO₅ résultantes pour la sortie du système hybride (BVFCW₁ + HFCW) et le BVFCW₂ après traitement étaient de (16,5 ± 12,94 mg/L) et (12,5 ± 8,21 mg/L), respectivement (Figure III.10). Nous avons détecté une variance statistique notable (S1 : P=1.34 10⁻⁸<0.05 et S2 : P=2.52 10⁻⁹<0.05) entre les emplacements d'échantillonnage à l'entrée et à la sortie (S₁ et S₂), probablement attribuée à des mécanismes de traitement naturels à médiation végétale utilisant la végétation, les sols et les communautés microbiennes qui les accompagnent pour améliorer la qualité de l'eau (Sudarsan et al., 2015).

Cependant, l'élimination de la DBO₅ pour les hybrides était très élevée, celle du système S₁ étant significativement plus importante (94,48%) que celle S₂ (96,00%). Le système BVFCW₂ a connu une légère amélioration, avec un taux d'élimination global de

96%, car la plupart des MO sont éliminés lors de la première phase de traitement (Vymazal & Kröpfelova, 2015). La valeur moyenne des eaux usées traitées reste inférieure à la valeur limite maximale (35 mg/l) recommandée par (JORA, 2006). Ces efficacités d'élimination de la DBO sont supérieures de celles trouvées par d'autres auteurs tels que Puigagut et al. (2007) qui ont constaté une élimination moyenne de 87% de la DBO₅ ou O'Hogain (2003) qui a obtenu une élimination de 88% de la DBO pour un système hybride à grande échelle. D'autres études ont montré des résultats similaires pour différents HCWs, tels que Zorai et al. (2023) qui ont utilisé un HCW vertical-horizontal, et Herrera-Melián et al. (2020) qui ont utilisé deux HCWs. Selon Gizińska-Górna et al (2020), 96.6 % des HCWs sont réalisés en quatre étapes. Par ailleurs, on a constaté une élimination de la DBO₅ de 97.6 % en moyenne dans des HCWs avec ventilation (Thalla et al, 2019). Les résultats encourageants de cette étude peuvent servir à élaborer le système HFC à un niveau concret.

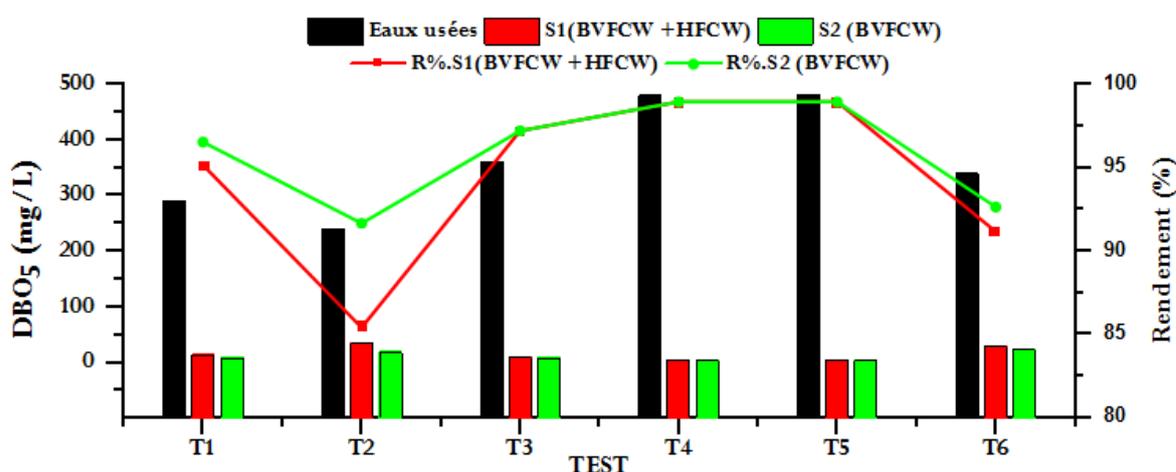


Figure III.10 | Variation des valeurs moyennes de la DBO₅ des eaux usées avant et après traitement

III.4. Conclusion

D'après les résultats, il a été démontré que HCW dispose d'une capacité adéquate pour éliminer différentes formes de MO et garantir le respect des limites des eaux usées en Algérie. Il peut servir d'unités de traitement. Cette situation nous incite à approfondir nos recherches sur ce système.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette recherche vise à éliminer les substances organiques des eaux usées en utilisant des plantes aquatiques dans une zone humide artificielle à flux hybride HCW. La mise en œuvre de méthodes traditionnelles pour le traitement des eaux usées s'est avérée efficace dans les zones urbaines denses. Cependant, ils sont peu utilisés en milieu rural, notamment en milieu à faible densité de population, en raison de la nécessité de personnel qualifié et des coûts considérables liés à leur mise en place et à leur fonctionnement.

Bien que de nombreux pays développés et en développement aient adopté les stations d'épuration en raison de leur rentabilité, cette technologie reste largement inconnue en Algérie, à l'exception de deux stations d'épuration situées dans les villes de Témacine et N'Goussa, dans la région de Ouargla. Ainsi, cette étude a été initiée dans le but de promouvoir l'utilisation des CWs en Algérie, en tirant parti de leurs bénéfices environnementaux et économiques. Ainsi, les questions essentielles suivantes ont été répondues : les plantes aquatiques sélectionnées sont-elles efficaces pour éliminer la matière organique et quel est leur impact sur l'efficacité globale du traitement des eaux usées? En même temps que l'analyse de l'efficacité du HCW suggéré dans cette étude, elle a simplifié le diagnostic du niveau de contamination des eaux usées dans la ville d'El-Anasser, incluant une évaluation des propriétés physiques et chimiques des effluents d'eaux usées.

Les conclusions de cette recherche sont les suivantes: Le taux de COD/BOD₅ (2.47) indique que les eaux usées proviennent de la production domestique et sont très biodégradables. L'élimination totale de la DCO, de la DBO₅, du MES, de la turbidité, de la salinité, du TDS et de la CE étaient respectivement de 83.91 %, 96.00 %, 90.14 %, 52.64 %, 23.00 % et 49.59 %. En revanche, le système BVFCW2 améliore les taux d'élimination de la DCO, de la DBO₅, du MES, de la turbidité, de la salinité, du TDS et de la CE de 6.95%, 1.51%, et 6.04%, 1.77%, 10.96%, 11.27% et 11.80%. En outre, le HCW a maintenu les niveaux de température et de pH dans la plage optimale (T < 30 °C) et (pH 6,5 à 8,5) en conséquence. Les résultats démontrent que ce système a une capacité suffisante pour éliminer de manière efficace différents organismes nocifs en accord avec les normes des eaux usées en Algérie. Il peut être utilisé comme un élément de traitement, ce qui met en évidence l'importance de mener des recherches approfondies sur ce système.

La recherche dans le domaine du traitement des eaux par les CWs a de nombreux avènements à explorer. En premier lieu, il serait avantageux de mettre au point une méthode scientifique pour concevoir des CWs qui répondent aux conditions climatiques locales.

Conclusion générale

Cela pourrait nécessiter la quête d'équations mathématiques afin de diminuer la surface nécessaire pour ces CWs et d'obtenir un dimensionnement adéquat de ce système tout en préservant leur efficacité. De plus, il serait intéressant d'étudier d'autres espèces végétales afin de déterminer celles qui ont la capacité de réduire les concentrations des autres polluants, ce qui favoriserait le recyclage de l'eau dans le domaine agricole. Ces horizons de recherche pourraient jouer un rôle dans l'amélioration de l'efficacité et de la durabilité des systèmes de traitement des eaux par les zones humides.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- AFNOR. (1990). NF T90-103. Essais des eaux - Détermination de la demande biochimique en oxygène DBO). 5 p.
- AFNOR. (1997). Recueil de norme française : Eau, méthodes d'essai, 2ème édition, Paris Édition, Paris
- Aroua-Berkat, S., & Aroua, N. (2022). Opportunities and challenges for wastewater reuse in Algeria. *LARHYSS Journal* P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782, (51), 7-17.
- APAT, (2005). Linee guida per la progettazione e gestione di zone umide artificiali per la depurazione dei reflui civili, Firenze, luglio.
- APHA, AWWA, WEF (2012). Standard methods for the examination of water and wastewater, 22e édition. American Public Health Association, American Water Works Association et Water Environment Federation, Washington D.C.
- Bonacina, L., Fasano, F., Mezzanotte, V., & Fornaroli, R. (2023). Effects of water temperature on freshwater macroinvertebrates: a systematic review. *Biological Reviews*, 98(1), 191-221. <https://doi.org/10.1111/brv.12903>
- Boutin, Catherine & Caquel, O. & Dimastromatteo, N. & Dumaine, J. & G., Fernandes & Gervasi, Claudio & Parotin, Sandrine & Prost-Boucle, Stéphanie & Tscherter, C.. (2015). Guide d'exploitation des filières de traitement par boues activées.
- Brix, H., Arias, C.A., (2005). Danish guidelines for small-scale constructed wetland system for onsite treatment of domestic sewage. *Water Science and Technology* 51(9):1-9.
- Calheiros, C. S., Rangel, A. O., & Castro, P. M. (2009). Treatment of industrial wastewater with two-stage constructed wetlands planted with *Typha latifolia* and *Phragmites australis*. *Bioresource technology*, 100(13), 3205–3213. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.02.017>
- Capodaglio, A. G., & Olsson, G. (2019). Energy issues in sustainable urban wastewater management: Use, demand reduction and recovery in the urban water cycle. *Sustainability*, 12(1), 266.
- Castillo, A., X., Y., & Z. (2019). Effects of salinity on the performance of constructed wetlands. *Journal of Environmental Management*, Volume(Issue), pages.
- Chadli, A. (2020). Évaluation des performances épuratoires de système de lagunage à macrophytes sous climat aride cas de la wilaya de Naâma (Doctoral dissertation).
- Cheriti, A., Talhi, M. F., Belboukhari, N., & Taleb, S. (2011). Copper ions biosorption properties of biomass derived from Algerian Sahara plants. *Expanding issues in desalination*. Intech, 319-338.
- Comino, E., Riggio, V., & Rosso, M. (2011). Mountain cheese factory wastewater treatment with the use of a hybrid constructed wetland. *Ecological Engineering*, 37(11), 1673-1680. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.06.048>
- Cooper P.F., Job G.D., Green M.B. and Shutes R.B.E. (1996). *Reed Beds and Constructed Wetland for Wastewater Treatment*. WRc Swindon, UK

- Cooper, P. F. (2001). Nitrification and denitrification in hybrid constructed wetlands systems. *Transformations on nutrients in natural and constructed wetlands*, 257-270.
- Davis, L. (1995). A handbook of constructed wetlands: A guide to creating wetlands for: agricultural wastewater, domestic wastewater, coal mine drainage, stormwater. In the Mid-Atlantic Region. Volume 1: General considerations. USDA-Natural Resources Conservation Service.
- El Fanssi, S., Ouazzani, N., & Mandi, L. (2019). Effectiveness of domestic wastewater treatment using a constructed wetlands and reuse tests of treated wastewater in rural area of Morocco. *Geo Eco Trop.*, 43, 385-393.
- Fernandez-Fernandez, M. I., Vega, P. T., Jaramillo-Morán, M. A. and Garrido, M. (2020). Hybrid constructed wetland to improve organic matter and nutrient removal. *Water*, 12(7), 2023. <https://doi.org/10.3390/w12072023>
- Friedler, E. and Hadari, M. (2006) Economic Feasibility of On-Site Greywater Reuse in Multi-Storey Buildings. *Desalination*, 190, 221-234. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.10.007>
- Gholipour, A. and Stefanakis, A. I. (2021). A full-scale anaerobic baffled reactor and hybrid constructed wetland for university dormitory wastewater treatment and reuse in an arid and warm climate. *Ecological Engineering*, 170, 106360. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106360>
- Gizińska-Górna, M., Józwiakowski, K. and Marzec, M. (2020). Reliability and efficiency of pollutant removal in four-stage constructed wetland of SSVF-SSHF-SSHF-SSVF type. *Water*, 12(11), 3153. <https://doi.org/10.3390/w12113153>
- Guittonny-Philippe, A., Masotti, V., Höhener, P., Boudenne, J. L., Viglione, J., & Laffont-Schwob, I. (2014). Constructed wetlands to reduce metal pollution from industrial catchments in aquatic Mediterranean ecosystems: A review to overcome obstacles and suggest potential solutions. *Environment International*, 64, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.11.016>
- Grégorio, Crini & Lichtfouse, Eric. (2018). *Wastewater Treatment: An Overview*. 10.1007/978-3-319-92111-2_1.
- Haydar, S., Anis, M., & Afaq, M. (2020). Performance evaluation of hybrid constructed wetlands for the treatment of municipal wastewater in developing countries. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 28(6), 1717-1724. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.02.017>
- Healy, M. G., Rodgers, M., & Mulqueen, J. (2007). Treatment of dairy wastewater using constructed wetlands and intermittent sand filters. *Bioresource technology*, 98(12), 2268-2281.
- Herrera-Melián, J. A., Mendoza-Aguiar, M., Guedes-Alonso, R., García-Jiménez, P., Carrasco-Acosta, M., & Ranieri, E. (2020). Multistage horizontal subsurface flow vs. hybrid constructed wetlands for the treatment of raw urban wastewater. *Sustainability*, 12(12), 5102. <https://doi.org/10.3390/su12125102>
- Hopcroft, F. (2014). *Wastewater treatment concepts and practices*. Momentum Press. DOI: 10.5643/9781606504871

- Ibtissem, S., Saloua, N., Ouafia, A., Hanene, R., & Zoubeida, M. (2023). Water pollution of the Oued D'Hous River (Algeria) and its potential impact on fauna and flora. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*, 11(1), 0-0.
- Izharul, F., Farrukh, B., Rahat, C. (2007). Constructed Wetland System for Wastewater Treatment. *The 12th World Lake Conference*: 1004-1009.
- JORA. (2006). *Journal officiel de la république Algérienne: Les valeurs limites des paramètres de rejets dans un milieu récepteur.*
- JORA. (2006). *Journal officiel de la république Algérienne: Les valeurs limites des paramètres de rejets dans un milieu récepteur.*
- JORA. (2012). *Journal officiel de la république Algérienne: Les spécifications des eaux usées épurées utilisées à des fins d'irrigation et la liste des cultures pouvant être irriguées avec des eaux usées épurées : Arrêté interministériel du 02 Janvier 2012*
- Kadlec, R.H. and Knight, R.L. (1996). *Treatment Wetlands*. Lewis Publishers, Boca Raton, 893 p.
- Kadlec, R.H., & Wallace, S. (2008). *Treatment Wetlands (2nd ed.)*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420012514>
- Khan, X. U., & Khalil, N. (2017). Constructed Wetlands for Domestic Wastewater Treatment—A Promising Technology for Rural Areas in India. *International Journal of Engineering Technology Science and Research*, 4(6).
- Korkusuz, E. A., Beklioğlu, M., & Demirel, G. N. (2005). Comparison of the treatment performances of blast furnace slag-based and gravel-based vertical flow wetlands operated identically for domestic wastewater treatment in Turkey. *Ecological Engineering*, 24(3), 185-198.
- LeChevallier, M. W., & Au, K. K. (2004). *Water treatment and pathogen control*. Iwa Publishing
- Metcalf, L. (2003). *Wastewater engineering: treatment and reuse*. Metcalf & Eddy Inc. McGraw-Hill Inc., New York.
- Metcalf, L. (2003). *Wastewater engineering: treatment and reuse*. Metcalf & Eddy Inc. McGraw-Hill Inc., New York.
- Mimeche, L. (2014). *Etude de faisabilité de l'installation de station d'épuration des rejets urbains par les filtres plantés en milieu aride-Application à la région de Biskra (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider Biskra)*. <http://thesis.univ-biskra.dz/id/eprint/1162>
- Molle, P. (2003). *Filtres plantés de roseaux: limites hydrauliques et rétention du phosphore (Doctoral dissertation, Doctorat discipline Energétique génie des procédés, Université Montpellier II)*.
- Morin-Crini, N. (2017). *Eaux industrielles contaminées: réglementation, paramètres chimiques et biologiques & procédés d'épuration innovants*. Presses universitaires de Franche-Comté

- Pérez, M. M., Hernández, J. M., Bossens, J., Jiménez, T., Rosa, E., & Tack, F. (2014). Vertical flow constructed wetlands: kinetics of nutrient and organic matter removal. *Water science and technology*, 70(1), 76-81. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.183>
- O'Hogain S .2003. The design, operation and performance of a municipal hybrid reed bed treatment system. *Water Sci. Technol.* 48 (5), 119–126.
- OMS. (1971). Organisation mondiale de la santé: Normes de rejets usées rejetées.
- Pedescoll, A.; Corzo, A.; Álvarez, E.; García, J.; Puigagut, J. The effect of primary treatment and flow regime on clogging development in horizontal subsurface flow constructed wetlands: An experimental evaluation. *Water Res.* 2011, 45, 3579–3589
- Qasaimeh, A., AlSharie, H., & Masoud, T. (2015). A Review on Constructed Wetlands Components and Heavy Metal Removal from Wastewater. *Journal of Environmental Protection.* 06. 710-718. <https://doi.org/10.4236/jep.2015.67064>.
- Rani, N., & Pohekar, K. N. (2021). Assessment of Hybrid Subsurface Flow Constructed Wetland Planted with *Arundo Donax* for the Treatment of Domestic Wastewater at Different Hydraulic Retention Time. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 43(2), 178-183. <https://doi.org/10.3103/S1063455X21020107>
- Rehman, F., Pervez, A., Khattak, B. N., & Ahmad, R. (2017). Constructed wetlands: perspectives of the oxygen released in the rhizosphere of macrophytes. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 45(1). <https://doi.org/10.1002/clen.201600054>
- Riffat R. (2013). *Fundamentals of wastewater treatment and engineering*. CRC Press/Taylor & Francis.
- Rodier, J., Geoffray, C., & Rodi, L. (1984). *L'analyse de l'eau: eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer: chimie, physico-chimie, bactériologie, biologie*.
- Rodier, J., Geoffray, C., & Rodi, L. (1984). *L'analyse de l'eau: eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer: chimie, physico-chimie, bactériologie, biologie*.
- Rokbane, A. (2023) Thèse de doctorat. Epuration des Eaux Usées par Filtre Planté (Phytoépuration) et Réutilisation pour l'Irrigation. Application à la Ville d'OuledDjellal.
- Schroeder, P. (2003). *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement: Second Edition*, CRC Press, Taylor & Francis Group
- Silva, Jorge Alejandro. 2023. "Wastewater Treatment and Reuse for Sustainable Water Resources Management: A Systematic Literature Review" *Sustainability* 15, no. 14: 10940. <https://doi.org/10.3390/su151410940>
- Sudarsan, J. S., Roy, R. L., Baskar, G., Deeptha, V. T., & Nithiyantham, S. (2015). Domestic wastewater treatment performance using constructed wetland. *Sustainable Water Resources Management*, 1(2), 89-96.
- Taha Ahmed, et al. (2022). "Étude sur la réduction de la conductivité électrique dans les systèmes de traitement des eaux usées." *Journal de l'Environnement et des Technologies de l'Eau*, vol. 10, no. 4, pp. 123-135

Ternes, T.; Joss, A.; Oehlmann, J. Occurrence, fate, removal and assessment of emerging contaminants in water in the water cycle (from wastewater to drinking water). *Water Res.* 2015, 72, 1–2.

Thalla, A. K., Devatha, C. P., Anagh, K., & Sony, E. (2019). Performance evaluation of horizontal and vertical flow constructed wetlands as tertiary treatment option for secondary effluents. *Applied Water Science*, 9(6), 1-9. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1014-9>

Vincent, G., & Jacques, B., (2014). Les marais filtrants (eaux usées). Société québécoise de phytotechnologie', Fiches techniques de la SQP. 12p. http://www.phytotechno.com/wpcontent/uploads/2018/02/SQP_Fiche_MaraisFiltrants.pdf

Vymazal, J. (2008). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Review. *Proceedings of Taal 2007: The 12th World Lake Conference*.

Vymazal, J. (2010). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water*, 2(3), 530–549. MDPI AG. Retrieved from. http://dx.doi.org/10.3390/w2030530_27

Vymazal, J. (2011b). Constructed wetlands for wastewater treatment: five decades of experience. *Environmental science & technology*, 45(1), 61-69. <https://doi.org/10.1021/es101403q>

Vymazal, J. (2013a). Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: a review. *Ecological engineering*, 61, 582-592. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.06.023>

Vymazal, J. (2013b). The use of hybrid constructed wetlands for wastewater treatment with special attention to nitrogen removal: A review of a recent development. *Water Research*, 47(14), 4795–4811. doi:10.1016/j.watres.2013.05.029

Vymazal, J. (2014). Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review. *Ecological engineering*, 73, 724-751. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.034>

Vymazal, J. (2018a). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. 10.1016/B978-0-12-409548-9.11238-2.

Vymazal, J. (2022). The historical development of constructed wetlands for wastewater treatment. *Land*, 11(2), 174. <https://doi.org/10.3390/land11020174>

Wu, H., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Hu, Z., Liang, S., Fan, J., & Liu, H. (2015). A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. *Bioresource technology*, 175, 594–601. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.068>

Yaqoob, A. A., Guerrero–Barajas, C., Ahmad, A., Ibrahim, M. N. M., & Alshammari, M. B. (2023). Advanced technologies for wastewater treatment. *Green Chemistry for Sustainable Water Purification*, 179-202.

Xu, Q., & Cui, L. (2019). Removal of COD from synthetic wastewater in vertical flow constructed wetland. *Water Environment Research*, 91(12), 1661-1668. <https://doi.org/10.1002/wer.1168>

- Zhang, D., Gersberg, R. M., Ng, W. J., & Tan, S. K. (2014). Constructed wetlands in China. *Ecological Engineering*, 61, 224-233. doi:10.1016/j.ecoleng.2013.10.035
- Zhang, Y. (2012). Design of a constructed wetland for wastewater treatment and reuse in Mount Pleasant, Utah (Doctoral dissertation, Utah State University).
- Zineb, H., Said, B., Zaoui, K., Oualid, B., & Abdelhakim, M. (2013). Traitement des eaux usées urbaines par des procédés naturels (Utilisation de l'argile jaune et rouge). <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/12837>
- Zorai, A, Benzahi, K, Labed, B, Ouakouak, A, Benzahi, R, Benachoura, S, E, Serraoui, M, Bouhoreira, A. (2023). Performance of Hybrid Constructed Wetland System for the Treatment of Secondary Wastewater Effluent under Arid Climate Conditions (Southeastern Algeria): A Laboratory Scale Investigation. *Pollution*, 9(1): 401-420. <http://doi.org/10.22059/POLL.2022.349117.1637>

Annexes

Annexe I

Réglementation relative à l'eau

Norme d'analyse des paramètres physicochimiques

Tableau 01 | Les normes des eaux usées rejetées selon l'OMS (1971).

Paramètres	Bonne ou très bonne qualité	Qualité acceptable	Qualité médiocre	Mauvaise ou très Mauvaise
O ₂ Dissous mg/l	> 5	≥ 3	≥ 1	< 1
O ₂ Dissous %	≥ 70	≥ 50	≥ 10	< 10
DBO ₅ mg/l	≤ 5	≤ 10	25	> 25
DCO mg/l	≤ 25	≤ 40	80	> 80
NO ₃ ⁻ mg/l	≤ 25	≤ 50	80	> 80
NH ₄ ⁺ mg/l	≤ 0.5	≤ 2	8	> 8
NO ₂ ⁻ mg/l	≤ 0.3	≤ 1	> 1	-
NTK mg/l	≤ 2	≤ 3	10	> 10
PO ₄ ³⁻ mg/l	≤ 0.5	≤ 1	2	> 2
MES mg/l	≤ 70	-	> 70	-
Phosphore total mg/l	≤ 0.3	≤ 0.6	1	> 1
Conductivité	≤ 2	-	2000	-
pH	≥ 6.5 et ≤ 8.5	-	< 6.5 ou > 8.5	-

Tableau 02 | Les valeurs limites des paramètres de rejets dans un milieu récepteur
(Journal officiel de la république Algérienne, 2006).

24 Rabie El Aouel 1427 23 avril 2006		JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 26		5
<p>Art. 11. — Les opérations de contrôle, telles que définies ci-dessus, donnent lieu à la rédaction d'un procès-verbal établi à cet effet.</p> <p>Le procès-verbal comporte :</p> <ul style="list-style-type: none"> — les noms, prénoms et qualité des personnes ayant effectué le contrôle, — la désignation du ou des générateurs du rejet d'effluents liquides industriels et de la nature de leur activité, — la date, l'heure, l'emplacement et les circonstances de l'examen des lieux et des mesures faites sur place, — les constatations relatives à l'aspect, la couleur, l'odeur du rejet, l'état apparent de la faune et de la flore à proximité du lieu de rejet et les résultats des mesures et des analyses opérées sur place, 		<ul style="list-style-type: none"> — l'identification de chaque échantillon prélevé, accompagné de l'indication de l'emplacement, de l'heure et des circonstances de prélèvement, — le nom du ou des laboratoires destinataires de l'échantillon prélevé. <p>Art. 12. — Les méthodes d'échantillonnage, de conservation et de manipulation des échantillons ainsi que les modalités d'analyses sont effectuées selon les normes algériennes en vigueur.</p> <p>Art. 13. — Toutes dispositions contraires au présent décret et notamment les dispositions du décret exécutif n° 93-160 du 10 juillet 1993, susvisé, sont abrogées.</p> <p>Art. 14. — Le présent décret sera publié au <i>Journal officiel</i> de la République algérienne démocratique et populaire.</p> <p>Fait à Alger, le 20 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 19 avril 2006.</p> <p style="text-align: right;">Ahmed OUYAHIA.</p>		
ANNEXE I				
VALEURS LIMITES DES PARAMETRES DE REJETS D'EFFLUENTS LIQUIDES INDUSTRIELS				
N°	PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCES AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS
1	Température	°C	30	30
2	PH	-	6,5 - 8,5	6,5 - 8,5
3	MES	mg/l	35	40
4	Azote Kjeldahl	"	30	40
5	Phosphore total	"	10	15
6	DCO	"	120	130
7	DBO5	"	35	40
8	Aluminium	"	3	5
9	Substances toxiques bioaccumulables	"	0,005	0,01
10	Cyanures	"	0,1	0,15
11	Fluor et composés	"	15	20
12	Indice de phénols	"	0,3	0,5
13	Hydrocarbures totaux	"	10	15
14	Huiles et graisses	"	20	30
15	Cadmium	"	0,2	0,25
16	Cuivre total	"	0,5	1
17	Mercure total	"	0,01	0,05
18	Plomb total	"	0,5	0,75
19	Chrome Total	"	0,5	0,75
20	Etain total	"	2	2,5
21	Manganèse	"	1	1,5
22	Nickel total	"	0,5	0,75
23	Zinc total	"	3	5
24	Fer	"	3	5
25	Composés organiques chlorés	"	5	7
<p>PH : Potentiel d'hydrogène DBO₅ : Demande biologique en oxygène pour une période de cinq (5) jours DCO : Demande chimique en oxygène MES : Matière en suspension</p>				

Tableau 03 | Les spécifications des eaux usées épurées utilisées à des fins d'irrigation
 Arrêté interministériel du 02 Janvier 2012

20		JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 41		25 Chaâbane 1433 15 juillet 2012	
2. PARAMETRES PHYSICO - CHIMIQUES					
PARAMETRES		UNITÉ	CONCENTRATION MAXIMALE ADMISSIBLE		
Physiques	pH	—	6.5 ≤ pH ≤ 8.5		
	MES	mg/l	30		
	CE	ds/m	3		
	Infiltration le SAR = o - 3 CE		0.2		
	3 - 6		0.3		
	6 - 12	ds/m	0.5		
	12 - 20		1.3		
	20 - 40		3		
Chimiques	DBO5	mg/l	30		
	DCO	mg/l	90		
	CHLORURE (Cl)	meq/l	10		
	AZOTE (NO3 - N)	mg/l	30		
	Bicarbonate (HCO3)	meq/l	8.5		
Eléments toxiques (*)	Aluminium	mg/l	20.0		
	Arsenic	mg/l	2.0		
	Béryllium	mg/l	0.5		
	Bore	mg/l	2.0		
	Cadmium	mg/l	0.05		
	Chrome	mg/l	1.0		
	Cobalt	mg/l	5.0		
	Cuivre	mg/l	5.0		
	Cyanures	mg/l	0.5		
	Fluor	mg/l	15.0		
	Fer	mg/l	20.0		
	Phénols	mg/l	0.002		
	Plomb	mg/l	10.0		
	Lithium	mg/l	2.5		
	Manganèse	mg/l	10.0		
	Mercuré	mg/l	0.01		
	Molybdène	mg/l	0.05		
	Nickel	mg/l	2.0		
	Sélénium	mg/l	0.02		
	Vanadium	mg/l	1.0		
Zinc	mg/l	10.0			

(*) : Pour type de sols à texture fine, neutre ou alcalin.

Tableau 04 | Caractéristiques typiques des eaux usées municipales non traitées Source: Adapté de Metcalf et Eddy (2003).

Component	Concentration range	Unit
Biochemical oxygen demand, BOD ₅ at 20 °C	100 – 360	mg/l
Chemical oxygen demand, DCO	250 – 1000	mg/l
Total organic carbon, TOC	80 – 300	mg/l as N
Total kjeldahl nitrogen (NTK)	20 – 85	mg/l as P
Total phosphorus	5 – 15	mg/l
Oil and grease	50 – 120	mg/l
Total solids (TS)	400 – 1200	mg/l
Total dissolved solids (TDS)	250 – 850	mg/l
Total suspended solids (TSS)	110 – 400	mg/l
Volatile suspended solids (VSS)	90 – 320	mg/l
Fixed suspended solids (FSS)	20 – 80	mg/l
Settleable solids	5 – 20	mg/l
Total coliform	10 ⁶ – 10 ¹⁰	No./100ml
Fical coliform	10 ³ – 10 ⁸	No./100ml

Tableau 05 | Temperature correction factors f₂₅ for non-linear conductivity correction