

Université du Québec  
Institut National de la Recherche Scientifique  
Centre Eau Terre Environnement

# CONCEPTION ET MISE EN APPLICATION D'UN PROTOTYPE PORTATIF DE TRAITEMENT DES EAUX USÉES DOMESTIQUES EN MILIEU RURAL

Par

Jean Truchard Saint Clore

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de  
Maître Sciences (M.Sc.) en sciences de l'eau

## Jury d'évaluation

Président du jury et examinateur interne

Professeur Tarek Rouissi  
INRS

Examineur externe

Komenan Gildas Gbassi  
Université Félix-Houphouët-Boigny de  
Côte d'Ivoire Département des Sciences  
Analytiques et de Santé Publique

Directeur de recherche

Professeur Jean-François BLAIS  
INRS



## REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée au Centre Eau Terre et Environnement de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS). Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à Monsieur le Professeur Patrick Drogui, mon ex-Directeur de recherche, pour m'avoir intégré dans son équipe. Je lui suis immensément reconnaissant pour son soutien précieux, pour la générosité avec laquelle il a partagé ses vastes connaissances, pour son encadrement éclairé et ses conseils judicieux, ainsi que pour sa capacité indéfectible à agir avec la sollicitude et la bienveillance d'un véritable mentor.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à chacun des membres de l'équipe LEEPO qui m'ont soutenu tout au long de cette formation. J'adresse une reconnaissance particulière à Sanae Benkaraache, ainsi qu'à mes collègues Oumaima El Hachimi, Mahdieh Khajvand et Abléma Tanoë, Hela Rekik pour leur soutien indéfectible et mon ami et collaborateur Angrand Rosely.

Je souhaite exprimer ma gratitude infinie à chacun des professeurs pour la qualité exceptionnelle de la formation qu'ils m'ont dispensée tout au long de mon parcours universitaire au sein de cet éminent établissement.

J'exprime ma profonde gratitude envers le personnel des laboratoires de l'INRS pour leur expertise exceptionnelle, leurs conseils techniques judicieux, ainsi que pour leur présence constante et leur assistance inestimable.

Je désire enfin exprimer ma profonde gratitude envers chaque membre de ma famille pour leur soutien constant et leur encadrement précieux : mes fils Kenny Tuchard et Jovany Trucharson, ainsi que mes filles Bishara Tséphanie et Anne Laurie Saint Clore. Leur affection inébranlable et leur soutien indéfectible ont joué un rôle essentiel dans la concrétisation de mon projet.



## RÉSUMÉ

La qualité d'assainissement des eaux usées générées par la population haïtienne est préoccupante. En raison du manque d'infrastructures adaptées pour traiter ces effluents, ceux-ci sont rejetés sans traitement dans le milieu naturel. Ces rejets engendrent des conséquences graves sur la santé publique et sur les écosystèmes. De plus, les catastrophes naturelles, associées à la situation socio-économique du pays, nous poussent à proposer des solutions d'assainissement des eaux usées.

Dans cette optique, cette étude vise à remédier au problème persistant et urgent de l'accès à un assainissement de qualité dans les zones rurales défavorisées. Notre projet de recherche a pour objectif de proposer une technologie compacte et mobile pour purifier les Eaux Usées Domestiques (EUD) en milieu rural et réduire les impacts environnementaux liés aux rejets non traités. Nous avons analysé les besoins en assainissement des communautés rurales, plus particulièrement en particulier en Haïti, en tenant compte de la qualité de l'eau rejetée et des conditions environnementales.

La technologie environnementale retenue dans ce projet associe un système membranaire à un procédé électrochimique. Le dispositif proposé combine la biofiltration (BIOF), utilisant un substrat composé de fibres et de coques de noix de coco, à l'électrocoagulation (EC). L'objectif du couplage de (BIOF-EC) est de permettre l'élimination de la pollution organique, inorganique et microbienne.

Les résultats obtenus avec la disposition du BIOF en amont de EC ont permis d'atteindre un taux d'élimination de 75% de la DCO, de 99,59% des coliformes totaux et de 99,96% des coliformes fécaux après le passage de l'eau dans le passage dans le BIOF. Un taux d'élimination de 96,8% du phosphore total a également été enregistré après cinq minutes d'électrocoagulation avec un courant de 0,5 A.

Mots-clés : Eaux usées domestiques, biofiltration, électrocoagulation.



## ABSTRACT

The quality of domestic wastewater sanitation in Haiti remains a major concern. Due to the absence of adequate wastewater treatment infrastructure, municipal effluents are often discharged directly into the natural environment without prior treatment. As a result, untreated discharges significantly impact both public health and surrounding ecosystems, through the spread of waterborne diseases and the degradation of natural resources. Furthermore, the country's vulnerability to natural disasters-combined with its challenging socio-economic conditions-reinforces the urgent need to implement sustainable and context-appropriate wastewater management solutions. Therefore, promoting decentralized, low-cost, and resilient sanitation systems becomes essential to protect both human and environmental health.

In this context, the present study aims to address the persistent and pressing issue of access to safe and adequate sanitation in underserved rural areas. Our research project focuses on developing a compact and mobile wastewater treatment technology tailored to the purification of Domestic Wastewater (DWW) in rural environments. The goal is to significantly reduce the environmental impacts associated with the discharge of untreated effluents into natural ecosystems. To this end, we conducted a needs assessment of rural communities-particularly in Haiti-taking into account effluent quality, local environmental conditions, and the technical feasibility of decentralized sanitation solutions.

The environmental technology selected for this project combines a membrane-based system with an electrochemical treatment process. Specifically, the proposed device integrates biofiltration (BIOF), using a substrate composed of natural coconut fibers and shells, with electrocoagulation (EC). This BIOF-EC hybrid approach is designed to enhance the removal of organic, inorganic, and microbial contaminants commonly found in domestic wastewater. By coupling these two processes, the system aims to achieve a more efficient and sustainable treatment solution adapted to decentralized rural settings.

The results obtained with the configuration placing the biofiltration (BIOF) unit upstream of the electrocoagulation (EC) process demonstrated promising performance. After passing through the BIOF system, a removal efficiency of 75% for Chemical Oxygen Demand (COD), 99.59% for total coliforms, and 99.96% for fecal coliforms was achieved. Furthermore, the subsequent electrocoagulation step, operated at a current of 0.5 Amperes for five minutes, resulted in a 96.8% reduction of total phosphorus. These findings highlight the effectiveness of the BIOF-EC treatment

sequence in significantly reducing both organic and microbial loads, as well as nutrient content in domestic wastewater.

Key words : Domestic wastewater, biofiltration, electrocoagulation.

# TABLE DES MATIÈRES

<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>III</b>
<b>RÉSUMÉ</b> .....	<b>V</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VII</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b> .....	<b>IX</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>XIII</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>XV</b>
<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS</b> .....	<b>XVII</b>
<b>1 INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>2 REVUE DE LITTÉRATURE</b> .....	<b>3</b>
2.1.1 <i>Matières organiques</i> .....	4
2.1.2 <i>Contaminants inorganiques et traces métalliques</i> .....	4
2.1.3 <i>Huiles et graisses (H&amp;G)</i> .....	8
2.1.4 <i>Matières solides</i> .....	8
2.1.5 <i>Organismes pathogènes</i> .....	8
2.2 <b>NORMES SUR LE TRAITEMENT DES EAUX USÉES DES RÉSIDENCES AU QUÉBEC</b> .....	9
2.3 <b>GESTION ET TRAITEMENT DES EAUX RÉSIDUAIRES DOMESTIQUES</b> .....	10
2.3.1 <i>Assainissement individuel et autonome – Traitement par fosse septique</i> .....	10
2.3.2 <i>Assainissement des petites et moyennes collectivités - Traitement primaire et biologique</i> 11	
<b>3 HYPOTHÈSES ET OBJECTIFS SCIENTIFIQUES</b> .....	<b>17</b>
3.1 <b>DESCRIPTION DES HYPOTHESES DE TRAVAIL</b> .....	17
3.2 <b>FORMULATION DES OBJECTIFS SCIENTIFIQUES</b> .....	18
3.3 <b>METHODES ET CHOIX TECHNIQUES</b> .....	18
3.3.1 <i>Étude du procédé ECS en amont du procédé BIOF</i> .....	18
3.3.2 <i>Étude du procédé ECS en aval du procédé BIOF</i> .....	20

<b>4</b>	<b>MATÉRIEL ET MÉTHODES .....</b>	<b>23</b>
4.1	ÉCHANTILLONNAGE ET CARACTÉRISATION DES EUD .....	23
4.2	COQUE DE LA NOIX ET FIBRES DE COCO .....	24
4.2.1	<i>Fibre de coco</i> .....	25
4.2.2	<i>Coque concassée</i> .....	25
4.3	MONTAGE ET CARACTERISTIQUES DES DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX .....	26
4.3.1	<i>Unité de biofiltration</i> .....	26
4.3.2	<i>Unité d'électrocoagulation</i> .....	28
4.4	TECHNIQUES EXPERIMENTALES .....	29
4.5	MÉTHODES ANALYTIQUES .....	31
4.5.1	<i>pH, conductivité, turbidité</i> .....	31
4.5.2	<i>Demande chimique en oxygène</i> .....	31
4.5.3	<i>Azote ammoniacal (NH<sub>4</sub>) et orthophosphate (PO<sub>4</sub>)</i> .....	31
4.5.4	<i>Analyse des métaux</i> .....	31
4.5.5	<i>MES</i> .....	32
<b>5</b>	<b>RÉSULTATS ET DISCUSSION .....</b>	<b>33</b>
5.1	TRAITEMENT DES EAUX USEES DOMESTIQUES PAR BIOFILTRATION (BIOF).....	33
5.2	TRAITEMENT DES EAUX RÉSIDUAIRES CORRESPONDANT AU SCÉNARIO -1 .....	34
5.2.1	<i>Suivi du pH</i> .....	34
5.2.2	<i>Suivi de la turbidité</i> .....	36
5.2.3	<i>Suivi des MES</i> .....	36
5.2.4	<i>Suivi de la DCO</i> .....	37
5.3	TRAITEMENT DES EAUX RÉSIDUAIRES CORRESPONDANT AU SCÉNARIO 2 .....	39
5.3.1	<i>Suivi du pH</i> .....	39
5.3.2	<i>Suivi de la turbidité</i> .....	39
5.3.3	<i>Suivi de la matière en suspension</i> .....	40
5.3.4	<i>Suivi de la DCO</i> .....	41
5.4	TRAITEMENT DES EAUX RÉSIDUAIRES CORRESPONDANT AU SCÉNARIO 3 .....	42

5.4.1	<i>Suivi du pH</i> .....	42
5.4.2	<i>Suivi de la turbidité</i> .....	43
5.4.3	<i>Suivi des MES</i> .....	44
5.4.4	<i>Suivi de la DCO</i> .....	45
5.5	ÉVALUATION DES PERFORMANCES ÉPURATOIRES DU BIOFILTRE LORS DU TRAITEMENT DES EAUX USÉES DOMESTIQUES SANS AJOUT DE SUBSTANCES BIOGÉNIQUES (SCÉNARIO 4) .....	46
5.5.1	<i>Évolution du pH</i> .....	46
5.5.2	<i>Évolution de la turbidité</i> .....	47
5.5.3	<i>Évolution des MES</i> .....	48
5.5.4	<i>Évolution microbiologique</i> .....	50
5.6	COUPLAGE DU BIOFILTRATION (BIOF) ET ÉLECTROCOAGULATION (EC).....	51
5.7	CONCENTRATION EN SOLIDES TOTAUX.....	52
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS</b> .....	<b>57</b>
6.1	CONCLUSIONS.....	57
6.2	RECOMMANDATIONS POUR LES TRAVAUX FUTURS .....	58
<b>5.</b>	<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	<b>59</b>



## LISTE DES FIGURES

FIGURE 1	SITE ET POINT D'ÉCHANTILLONNAGE DES EAUX USÉES MUNICIPALES DE LA VILLE DE QUÉBEC ..	23
FIGURE 2	COQUE DE NOIX DE COCO ET COQUE SELON LA DIRECTION DE L'AGRICULTURE DE POLYNÉSIE FRANÇAISE .....	26
FIGURE 3	SCHÉMA DU GARNISSAGE INTÉRIEUR DE LA BIOFILTRATION.....	27
FIGURE 4	CROQUIS DE L'INSTALLATION DE LA BIOFILTRATION .....	28
FIGURE 5	DISPOSITIF D'ELECTROCOAGULATION.....	29
FIGURE 6	VARIATION PH LORS DU SCENARIO 1 .....	35
FIGURE 7	VARIATION DE LA TURBIDITE LORS DU SCENARIO 1 .....	36
FIGURE 8	VARIATION DE MES LORS DU SCENARIO 1 .....	37
FIGURE 9	VARIATION DE LA DCO LORS DU SCENARIO 1 .....	38
FIGURE 10	VARIATION DU PH LORS DU SCENARIO 2 (50% ED + 50% EUB) .....	39
FIGURE 11	VARIATION DE LA TURBIDITE LORS DU SCENARIO 2 (50% ED + 50% EUB) .....	40
FIGURE 12	VARIATION DE MES LORS DU SCENARIO 2 (50% ED + 50% EUB) .....	41
FIGURE 13	VARIATION DE LA DCO LORS DU SCENARIO 2 (50% ED + 50% EUB).....	42
FIGURE 14	VARIATION DU PH LORS DU SCENARIO 3 (25% ED + 75% EUB) .....	43
FIGURE 15	VARIATION DE LA TURBIDITE LORS DU SCENARIO 3 (25% ED + 75% EUB) .....	44
FIGURE 16	VARIATION DE MES LORS DU SCENARIO 3 (25% ED + 75% EUB) .....	45
FIGURE 17	VARIATION DE LA DCO LORS DU SCENARIO 3 (25% ED + 75% EUB).....	46
FIGURE 18	VARIATION DU PH LORS DU SCENARIO 3 (0% ED + 100% EUB) .....	47
FIGURE 19	VARIATION DE LA TURBIDITE LORS DU SCENARIO 4 (0% ED + 100% EUB) .....	48
FIGURE 20	VARIATION DE MES LORS DU SCENARIO 4 (0% ED + 100% EUB) .....	48
FIGURE 21	VARIATION DE LA DCO LORS DU SCENARIO 4 (0% ED + 100% EUB).....	49
FIGURE 22	VARIATION DE L'AZOTE AMMONIACAL AU COURS DU TEMPS A L'ENTREE ET A LA SORTIE DU BIOFILTRE .....	49



## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1	COMPOSITION MOYENNE D'UNE EAU DOMESTIQUE .....	3
TABLEAU 2	COMPOSÉS ORGANIQUES ET INORGANIQUES .....	4
TABLEAU 3	CARACTÉRISATION DES EAUX USÉES DOMESTIQUES BASÉE SUR LA LITTÉRATURE .....	6
TABLEAU 4	CONCENTRATIONS DE MICROORGANISMES PRÉSENTS DANS LES EUD .....	8
TABLEAU 5	NORMES DE REJET - EFFLUENT DU SYSTÈME DE TRAITEMENT .....	10
TABLEAU 6	CARACTERISTIQUES INITIALES DES EAUX USEES DOMESTIQUES (EUD) .....	24
TABLEAU 7	DEMARCHE EXPERIMENTALE DES TRAVAUX DU SCENARIO (BIOF-EC) .....	30
TABLEAU 8	DESCRIPTION DES QUATRE SCENARIOS UTILISES DURANT L'OPERATION .....	34
TABLEAU 9	RESULTATS MICROBIOLOGIQUES AVANT ET APRES LA BIOFILTRATION .....	51
TABLEAU 10	TRAITEMENT PAR ELECTROCOAGULATION DE L'EFFLUENT ISSU DE LA BIOFILTRATION : [TURBIDITE] = 2,70 UTN; [P <sub>T</sub> ] = 1.83 MG/L; [PH] = 7,75 .....	52
TABLEAU 11	QUANTITÉ DE BOUES (G/L) GÉNÉRÉES AU COURS DES OPÉRATIONS.....	53
TABLEAU 12	VARIATION DES NITRATES (MGL <sup>-1</sup> ) .....	54
TABLEAU 13	VARIATION DE MES (MG/L).....	54
TABLEAU 14	VARIATION DE PHOSPHORE (P <sub>T</sub> ) (MG/L) .....	55



## LISTE DES ABRÉVIATIONS

BIOF	Biofiltration
CNRC	Conseil national de la recherche du Canada
DCO	Demande chimique en oxygène
EC	Électrocoagulation
ECS	Électrocoagulation solaire
ED	Eau dopée
ERD	Eau résiduaire domestique
EU	Eau usée
EUB	Eau usée brute
EUD	Eau usée domestique
I	Intensité en ampère
MES	Matières en suspension
pH	Potentiel hydrogène
t	Temps en seconde ou en heure
U	Tension en volts
UTN	Unité de turbidité néphélométrique
V	Volume en m <sup>3</sup>

# 1 INTRODUCTION

---

L'augmentation croissante des zones d'habitation dispersées et des agglomérations à population variable (lotissement de résidences secondaires, terrains de camping, hôtels, stations touristiques, villages vacances, centres commerciaux, etc.) non connectées à des systèmes centralisés de traitement d'effluent pose un défi croissant [1].

Ce phénomène est aggravé par le manque d'infrastructures communautaires de traitement d'effluents dans les îles caribéennes, notamment en Haïti et à Cuba. Face à cette situation, les gestionnaires et les scientifiques sont contraints de mettre en place de petites installations d'assainissement autonome des eaux résiduaires domestiques [1].

En Haïti et à Cuba, 100% des habitations dispersées ne sont pas connectées à un système centralisé de traitement des eaux résiduaires. L'accès des Haïtiens à l'eau potable et à l'assainissement des eaux est parmi les plus faibles de la région Amérique latine et Caraïbes [2]. Les eaux résiduaires domestiques (ERD) sont directement rejetées dans les systèmes d'évacuation des eaux urbaines [2]. Dans les grandes villes, les eaux de vannes (WC) ne sont traitées que par les bassins anaérobies domestiques, puis rejetées dans ces mêmes réseaux d'évacuation.

Dans ce contexte, les petites installations d'assainissement autonome sont souvent nécessaires dans les îles des Caraïbes pour le traitement des effluents. Ces installations, souvent rudimentaires, se caractérisent par l'absence d'infrastructures appropriées pour satisfaire pleinement les normes de rejet, lesquelles deviennent de plus en plus strictes [3]. Divers procédés physiques, physico-chimiques, chimiques et biologiques sont actuellement à l'étude et leur couplage est fréquemment envisagé [4-7].

Les recherches récentes s'orientent vers le développement d'unités simples, peu coûteuses, compactes, portatives et à large spectre de dépollution, adaptées au traitement des eaux résiduaires des petites et moyennes collectivités, ainsi qu'à l'assainissement autonome d'habitats et de bâtiments qui ne sont pas desservis par des infrastructures communautaires ou centralisées. Dans cette optique, les procédés électrochimiques présentent un intérêt particulier. Leur atout réside dans leur caractère non polluant, leur facilité d'automatisation ainsi que leur capacité à agir à deux niveaux sur les polluants (effets direct et indirect du courant électrique). Ces procédés occupent peu d'espace (faible emprise au sol) et constituent une alternative pertinente pour réduire l'utilisation de réactifs chimiques.

Par ailleurs, les systèmes de biofiltration sur support filtrant peuvent être avantageusement couplés aux systèmes électrolytiques pour assurer la dégradation biologique des composés organiques, inorganiques et azotés présents dans les eaux résiduaires domestiques (ERD) [8].

Ce procédé biologique, dans lequel les bactéries jouent un rôle central, est très efficace pour éliminer la demande biologique en oxygène ( $DBO_5$ ), les matières en suspension (MES) et l'azote total Kjeldahl (NTK), à condition que l'effluent contienne des composés biodégradables et non toxiques [9-13]. En revanche, certains composés organiques potentiellement toxiques ou réfractaires (ex. composés phénoliques, résidus médicamenteux, etc.) peuvent être retrouvés dans ces eaux et perturber le bon fonctionnement du procédé de biofiltration.

Dans le cadre de ces travaux de recherche, nous envisageons d'exploiter le potentiel exceptionnel d'une technologie de biofiltration sur support organique (BIOF), à partir de biomasses naturelles disponibles en Haïti et à Cuba, couplée à un procédé d'électrocoagulation solaire (ECS), afin d'apporter une solution efficace au traitement des eaux résiduaires domestiques, tout en générant des retombées socio-économiques positives pour ces deux pays.

Notre équipe de recherche interinstitutionnelle s'intéresse en particulier à des biofiltres naturels, tels que des fibres ligneuses de noix de coco, bagasse de canne à sucre et des racines végétales, abondants dans les îles Caraïbes mais très peu exploités. Ces ressources peuvent être valorisées comme supports biologiques (permettant la fixation des bactéries ou décomposeurs) pour le traitement des ERD.

Le but ultime est de développer des systèmes intégrés, efficaces, portatifs, écologiques (sans ajout de produits chimiques) et accessibles pour la dépollution des ERD par voie électrolytique et/ou par biofiltration à base de biofiltres naturels.

## 2 REVUE DE LITTÉRATURE

---

### 2.1 Eaux usées domestiques (EUD) : Origines et caractéristiques

Les eaux domestiques résultent de divers usages courants au sein des foyers. Elles englobent les eaux grises ainsi que les eaux de vannes. Les **eaux grises** proviennent des installations ménagères et sanitaires (baignoires, douches, lavabos, éviers, et machines à laver). Ces eaux sont remplies de savons, de détergents, de graisses de cuisine, et de phosphates issus de certains produits lessiviers. Les **eaux noires**, quant à elles, découlent des toilettes et des urinoirs. Les eaux résiduaires domestiques (ERD) peuvent être regroupées en deux grands groupes: les eaux de vannes issues d'installation sanitaires et les eaux ménagères constituées des eaux de cuisines, des eaux de lessives/vaisselle, des eaux issues des salles de bains, des eaux de nettoyage des planchers, etc. Le Tableau 1 présente la composition moyenne d'une eau dite domestique qui n'existe qu'à proximité immédiate de logement: maisons isolées, lotissements ou immeubles d'habitations.

Tableau 1 : Composition moyenne d'une eau domestique

Origine	Volume (%)	DCO (%)	MES (%)	Bactéries (UFC/100 mL)	Références
Cuisines	13,8	19,3	7,1	-	[14] et [15]
Lessives, vaisselles	31,2	34,3	26,2	-	[14] et [15]
Bains	31,4	12,6	11,7	-	[14] et [15]
Eaux de vannes	23,6	33,8	55	10 <sup>8</sup> à 10 <sup>10</sup>	[14] et [16]

### 2.1.1 Matières organiques

La charge de la pollution organique est déterminée à l'aide de la mesure des paramètres suivants : DCO, DBO et COT [17] (Tableau 2). La DCO représente la quantité d'oxygène nécessaire pour l'oxydation de la matière organique en matière minérale. La DBO, quant à elle, est une mesure de la quantité d'oxygène nécessaire aux micro-organismes pour dégrader les composés organiques biodégradables [18]. Pour sa part, le COT quantifie directement la teneur en carbone des composés organiques présents dans l'eau. Des concentrations de DCO allant jusqu'à 244 mg O<sub>2</sub>/L peuvent être décelées dans les eaux usées domestiques, alors que des concentrations de DBO<sub>5</sub> se situant entre 136 et 333 mg O<sub>2</sub>/L ont été mesurées.

Plusieurs composés contribuent à la DCO. On retrouve les composés organiques biodégradables, composés organiques non biodégradables et les composés inorganiques oxydables.

**Tableau 2 : Composés organiques et inorganiques**

<b>Composés organiques biodégradables</b>	<b>Composés organiques non biodégradables</b>	<b>Composés inorganiques oxydables</b>
Protéines	Certains hydrocarbures	Soufre
Glucides	Complexes composés aromatiques	Sulfite
Lipides	Polymères synthétiques	Fer ferreux (Fe (II))
Acides organiques simples		Nitrite

Référence : Mouhamed et Kallel [17].

### 2.1.2 Contaminants inorganiques et traces métalliques

Certains métaux en trace tels que le fer (Fe), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le plomb (Pb), le manganèse (Mn), le mercure (Hg), le nickel (Ni) et le zinc (Zn) peuvent être retrouvés dans les eaux domestiques. En contrepartie, les risques reliés à la présence des métaux dans l'eau et dans les sols ont été bien étudiés par plusieurs auteurs [19-20]. Il est ainsi essentiel de réduire la présence de ces différents contaminants et d'éviter toute possibilité d'accumulation par les animaux, les plantes et les humains. Les rejets domestiques constituent une source très importante de la présence des métaux dans les eaux usées [19]. Les matières fécales contribuent de la charge en Cd, Zn, Cr et Ni dans les EUD. Les produits pharmaceutiques, les produits de nettoyage, les produits de soins corporels et les liquides résiduels constituent aussi une autre source principale des métaux dans les EUD [19].

Il existe un certain nombre de métaux qui est considéré comme constituants oligoéléments métalliques à la composition de l'eau à savoir, le cuivre (Cu), le chrome (Cr), le manganèse (Mn), le fer (Fe), le sodium (Na), le nickel (Ni) et le zinc (Zn) [21]. Mais la présence de ces métaux à des concentrations élevées constitue un risque imminent pour la santé humaine, pour les espèces vivantes et pour l'environnement [22].

Les métaux retrouvés dans les EUD (**Error! Reference source not found.**3) proviennent principalement de deux sources : les matières fécales et les produits d'usage courant. La contribution des matières fécales à la charge totale en métaux varie selon l'élément considéré [23]. Par exemple, elles représentent environ 40-60% du zinc (Zn) et du cuivre (Cu), 30-50% du nickel (Ni), et 20-40% du cadmium (Cd) et du plomb (Pb) dans les EUD. Les autres sources majeures de métaux incluent les produits de soins personnels, les détergents, les produits pharmaceutiques et les produits d'entretien domestiques [24].

**Tableau 3 : Caractérisation des eaux usées domestiques basée sur la littérature**

Paramètres	EUD-1	EUD-2	EUD-3	ERD-4	ERD-5	ERD-6	EUD-7
pH	7,28	6,7-7,5	7,05	7,35	7,1	7,25	8,7
Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	-	-	3502	3485,4	2630	6670	12240
Turbidité (UTN)	81	-	-	454	-	-	-
MES	342	25-1148	793	559	275	271	77
COD (mg/L)	144	148-472	1053	1120	514	260	144
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	266,3	135-480	5,43	433,9	280	121,25	64
Huile et graisse (mg/L)	3,77	2-163	22,41				
N-NH <sub>4</sub> (mg/L)	-	0,1-259	-	-	11,76	13,12	1,67
P-PO <sub>4</sub> (mg/L)	1,9	0,4-1,3			5,43		0,14
P <sub>t</sub> (mg/L)	-	3-12	2506	-	10	-	-
Ca (mg/L)					100		
Mg (mg/L)					54,7		
Na (mg/L)	77				339,3	3560	
K (mg/L)	25,6				22,8		
Cl (mg/L)	416,4				541		3673
Pb (mg/L)	-	-	-	-	-	-	0,87
Zn (mg/L)	0,06	-	-	-	-	-	0,16
Coliformes totaux (UFC/100 mL)	-	2,6 x 10 <sup>2</sup> - 1,3 x 10 <sup>4</sup>	-	-	-	-	-
Coliformes fécaux (UFC/100mL)	-	-	-	-	-	-	-
Références :	Dash, A. K. et al. (2013). Page 5 [25].	Wulan, D. R. et al., (2022). Page 8. [26].	Gbekley, E. H. et al. (2023), page 8. [27].	Idrissi, Y. A. et al. (2015). Page 3. [28].	El Halouani, H. et al. (2002). Page 3. [29].	Amiri, K. et al. (2017). Page 107. [30].	Mouni, L. et al. (2009). Page 6. [31].

Les eaux usées domestiques sont constituées de différents éléments tels que les eaux grises provenant de la cuisine et de la salle de bain, les eaux noires provenant des toilettes et les particules insolubles telles que les fibres de linge et les déchets alimentaires. Ces eaux contiennent également des polluants tels que les hydrocarbures, les métaux lourds et les pesticides [32]. La température de ces eaux peut varier en fonction des activités journalières et des saisons [33-34]. En outre, la qualité de ces eaux peut être influencée par l'environnement, notamment par la présence de terres arables, d'espaces verts ou de zones boisées. Les habitants des zones rurales peuvent également avoir un impact sur la qualité des eaux usées, par exemple en utilisant des produits chimiques pour le ménage. Les déchets alimentaires peuvent également enrichir ces eaux en azote. Les eaux grises peuvent contenir des médicaments et des produits

cosmétiques [35]. Les eaux noires contiennent également des composés organiques volatils. Enfin, les particules insolubles peuvent colmater les tuyauteries [36].

Les activités des habitants de la zone peuvent également être une source importante de pollution des eaux usées. Par exemple, l'utilisation de produits chimiques pour le ménage peut libérer des composés toxiques dans les eaux. En outre, les déchets alimentaires peuvent enrichir l'eau en nitrate. Les odeurs nauséabondes des eaux domestiques peuvent provenir des eaux de toilette.

Les aspects hydrologiques du terrain peuvent affecter la pollution des eaux usées, tels qu'un terrain imperméable. Les épisodes de précipitations peuvent faciliter la dilution des eaux usées [37-38].

Les eaux usées domestiques peuvent également être influencées par l'environnement, notamment par la présence de terres arables, d'espaces verts ou de zones boisées. Les terres arables peuvent favoriser la percolation des eaux dans le sol, tandis que les espaces verts peuvent absorber les eaux. Les zones boisées peuvent également influencer la qualité des eaux en retenant les particules en suspension. Les eaux noires peuvent être polluées par des miasmes toxiques. Les particules insolubles peuvent provenir des champs défrichés et des espaces verts. Les eaux usées peuvent être contaminées par les déchets toxiques des bâtiments industriels et des routes. Les zones rurales sont souvent moins touchées par la pollution des eaux usées que les zones urbaines. Les eaux usées des zones urbaines sont plus riches en polluants que celles des zones rurales. Les améliorations des infrastructures d'assainissement pourraient réduire la pollution des eaux usées [39].

La compréhension des éléments constituant des eaux usées est essentielle pour œuvrer efficacement à la réduction de la pollution des eaux usées domestiques. En comprenant les activités des habitants et l'environnement, nous pouvons identifier les principales sources de pollutions et prendre les mesures appropriées pour améliorer la qualité des eaux usées. Il est essentiel de prendre en compte les aspects nationaux, locaux, ruraux et urbains.

### 2.1.3 Huiles et graisses (H&G)

Les huiles et graisses (H&G) présentes dans les eaux usées domestiques (EUD) proviennent principalement des opérations de lavage des viandes et des poissons. À l'issue de ces activités, des résidus d'H&G se retrouvent dans les effluents domestiques [40]. La concentration des H&G dans les EUD est généralement de l'ordre de 30 mg/L [41].

### 2.1.4 Matières solides

L'origine des matières solides retrouvées dans les EUD est due aux déjections humaines, aux résidus alimentaires, à l'utilisation des produits de soin et d'hygiène personnels ainsi qu'aux produits d'entretien ménager. [42]. Metcalf & Eddy classent les solides retrouvés dans les EUD en trois catégories, respectivement, les matières en suspension (MES), les matières dissoutes, et les matières colloïdales. La concentration des MES dans les EUD varie entre 100 et 350 mg/L [42].

### 2.1.5 Organismes pathogènes

Les EUD contiennent une panoplie d'organismes pathogènes. On retrouve, principalement, des bactéries, des virus, des protozoaires et des helminthes. Quant aux virus, on retrouve notamment le rotavirus et le virus de l'hépatite [43-44] (Tableau 4).

Tableau 4 : Concentrations de microorganismes présents dans les EUD

Type de microorganismes	Valeurs minimales	Valeurs maximales
<i>Escherichia coli</i>	10 <sup>6</sup>	5x10 <sup>8</sup>
Coliformes	10 <sup>11</sup>	10 <sup>13</sup>
<i>Clostridium perfringens</i>	10 <sup>3</sup>	5x10 <sup>4</sup>
Streptocoques fécaux	10 <sup>6</sup>	10 <sup>8</sup>
<i>Salmonella</i>	50	300
<i>Campylobacter</i>	5x10 <sup>3</sup>	10 <sup>5</sup>
<i>Listeria</i>	5x10 <sup>2</sup>	10 <sup>4</sup>
<i>Staphylococcus aureus</i>	5x10 <sup>3</sup>	10 <sup>5</sup>
Coliphages	10 <sup>4</sup>	5x10 <sup>5</sup>
<i>Giardia</i>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>
Vers ronds	5	20
Entérovirus	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>
Rotavirus	20	100

Référence : Henze et Comeau (2008), [45].

## **2.2 Normes sur le traitement des eaux usées des résidences au Québec**

La gestion des eaux usées domestiques en Haïti présente des défis importants. Le pays ne dispose pas de réglementation spécifique concernant le rejet de ces eaux. Dans les zones rurales, la situation est particulièrement préoccupante : les eaux usées sont généralement déversées dans l'environnement sans traitement préalable [46]. L'utilisation de fosses septiques pour les eaux noires est peu répandue parmi les ménages haïtiens [47].

Face à cette absence de cadre réglementaire local, le projet actuel s'appuie sur les normes en vigueur dans la province du Québec, au Canada. Ce choix est motivé par le fait que les expériences pilotes de laboratoire associées à ce projet sont menées au Québec, offrant ainsi un cadre de référence pour l'évaluation des résultats et la définition des objectifs de traitement.

Le Règlement sur l'évacuation et le traitement des eaux usées des résidences isolées au Québec (Q-2, r.8) établit des directives claires pour le traitement des eaux usées domestiques. Selon ce règlement, les eaux usées, les eaux ménagères et les eaux de cabinet d'aisances doivent être dirigées vers un système de traitement approprié, qui peut être un système de traitement primaire, secondaire, secondaire avancé ou tertiaire. L'effluent issu d'un système de traitement primaire doit être acheminé vers un élément épurateur ou, en fonction des caractéristiques spécifiques du site, vers un système de traitement secondaire ou un filtre à sable classique.

De plus, l'effluent d'un filtre à sable classique ou d'un système de traitement secondaire avancé doit être dirigé vers un système de traitement tertiaire ou un champ de polissage si les normes l'exigent. Les systèmes de traitement tertiaire incluent généralement des processus de déphosphatation, de désinfection, ou une combinaison des deux.

Enfin, il est essentiel que l'effluent final respecte les normes maximales de rejet établies par la norme NQ 3680-910 du Bureau de normalisation du Québec (BNQ, 2012) décrites au Tableau 5.

**Tableau 5 : Normes de rejet - Effluent du système de traitement**

Catégorie de performance	Concentration maximale dans l'effluent			
	MES (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	CF (UFC/100 mL) <sup>(b)</sup>	P <sub>tot</sub> (mg/L)
Trait. primaire	100	-	-	-
Trait. secondaire	30	25	-	-
Trait. secondaire avancé	15	15	50 000	-
Trait. tertiaire avec déphosphatation <sup>(a)</sup>	15	15	50 000	1
Trait. tertiaire avec désinfection	15	15	200	-
Trait. tertiaire avec déphosphatation et désinfection	15	15	200	1

(a) Pour que la performance soit considérée comme atteinte, pas plus de 20% des résultats sur une période de 12 mois, pour un paramètre donné, ne doit excéder la performance visée. Si moins de 10 résultats sont disponibles, un seul dépassement sera toléré.

(b) Les concentrations maximales en CF s'appliquent après réactivation, le cas échéant.

Référence : Ministère de l'environnement du Québec, [48].

## 2.3 Gestion et traitement des eaux résiduaires domestiques

Le traitement des eaux usées domestiques peut être effectué selon deux approches distinctes : l'assainissement collectif (AC) et l'assainissement non collectif (ANC).

L'assainissement collectif concerne les habitations connectées à un réseau public de collecte des eaux usées. Dans ce système, les eaux usées sont acheminées vers une station d'épuration centralisée pour y être traitée avant leur rejet dans l'environnement.

En revanche, l'assainissement non collectif, également appelé assainissement individuel ou autonome, s'applique aux habitations qui ne sont pas raccordées à un réseau public d'égouts. Dans ce cas, le traitement des eaux usées se fait sur place, généralement au moyen d'installations individuelles telles que des fosses septiques suivies de systèmes d'épandage ou de filtration. Le choix entre ces deux approches dépend souvent de la densité de population, de la topographie locale et des ressources disponibles pour l'infrastructure d'assainissement.

### 2.3.1 Assainissement individuel et autonome – Traitement par fosse septique

Les fosses septiques sont des systèmes de traitement des eaux usées couramment utilisés dans les petites collectivités. Leur fonction principale est d'assurer un traitement primaire des eaux

résiduaire par un processus de séparation : les matières solides se déposent au fond et se décomposent en boues, tandis que les graisses et les huiles flottent à la surface. L'eau qui en résulte est partiellement épurée avant sa sortie [49].

Au-delà de ce rôle primaire, les fosses septiques remplissent plusieurs objectifs environnementaux et sanitaires importants :

- Elles contribuent à réduire la pollution environnementale.
- Elles aident à préserver la qualité des eaux souterraines.
- Elles permettent de diminuer les risques sanitaires liés aux eaux usées non traitées.
- Elles sont particulièrement adaptées aux besoins des petites populations.
- Elles participent à la durabilité environnementale en offrant une solution de traitement des eaux usées à l'échelle locale.

### **2.3.2 Assainissement des petites et moyennes collectivités - Traitement primaire et biologique**

Le traitement des eaux usées comprend généralement deux étapes principales : le traitement primaire et le traitement biologique. Le traitement primaire est un processus physico-chimique qui vise à éliminer les matières en suspension. Dans cette étape, les eaux usées sont introduites dans un bassin de décantation où les particules solides se déposent naturellement. Pour améliorer l'efficacité de ce processus, des produits chimiques peuvent être ajoutés pour favoriser la formation de floccs, facilitant ainsi leur sédimentation et leur retrait subséquent. Le traitement biologique, qui suit le traitement primaire, utilise des micro-organismes pour dégrader la pollution organique. Il existe deux types de traitement biologique :

- Le traitement aérobie : Ce processus nécessite la présence d'oxygène pour que les bactéries épuratrices puissent décomposer les polluants. Les fosses d'aisance et les lagunes sont des exemples de systèmes aérobies.
- Le traitement anaérobie : Contrairement au traitement aérobie, ce processus se déroule dans un environnement dépourvu d'oxygène.

### 2.3.2.1 Traitement par le procédé d'électrocoagulation (EC)

L'électrocoagulation (EC) est un procédé électrochimique dérivé de la coagulation chimique traditionnelle, qui utilise un courant électrique pour traiter les eaux usées. Contrairement à la coagulation chimique, qui nécessite l'ajout de réactifs externes, l'EC génère des coagulants *in situ* à partir d'électrodes sacrificielles en fer ou en aluminium. Ce processus complexe permet d'agglomérer les particules colloïdales et les matières en suspension par divers mécanismes, tels que la compression de la double couche électrique et l'adsorption sur les hydroxydes métalliques formés [50]. En plus de la coagulation, l'électrocoagulation intègre d'autres phénomènes comme la précipitation et la flottation, agissant de manière synergique pour éliminer efficacement les polluants organiques et inorganiques des eaux usées [51-52].

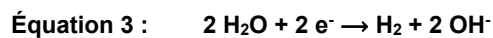
#### 2.3.2.1.1 Mécanismes de formation des hydroxydes

L'application d'un courant électrique dans un réacteur d'électrocoagulation (EC) composé d'une anode en fer ou en aluminium et d'une cathode enclenche des réactions. La dissolution des électrodes en fer ou en aluminium à l'anode génère des cations tels que  $\text{Al}^{3+}$  et  $\text{Fe}^{2+}$  pour former des hydroxydes de fer ou d'aluminium.

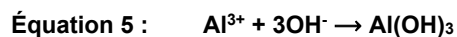
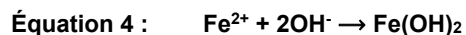
#### Réactions anodiques



#### Réaction cathodique



#### Réactions au sein de la solution



Selon le pH du milieu, les ions de fer et d'aluminium peuvent générer différentes espèces coagulantes de charge positive par hydrolyse. Pour les ions  $\text{Al}^{3+}$ , l'hydrolyse peut entraîner la

formation d'espèces telles que  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ ,  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_5^{2+}$  et  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_4^{2+}$ . De plus, lors de l'utilisation d'électrodes en fer, il est important de noter que la production d'ions ferreux ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ou ferriques ( $\text{Fe}^{3+}$ ) peut également se produire. En fonction du pH, ces ions peuvent former des espèces monomériques comme  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  ainsi que des complexes polymériques tels que  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ ,  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})^{2+}$ ,  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O})_8(\text{OH})_{24}^+$  et  $\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O})_6(\text{OH})_{44}^+$  [53].

#### 2.3.2.1.2 Facteurs influençant le procédé d'électrocoagulation

L'efficacité du procédé d'électrocoagulation (EC) peut être influencée par plusieurs paramètres, notamment : i) la densité de courant, ii) la quantité de charge, iii) le pH initial de l'effluent.

##### **Effet de la densité de courant sur le procédé**

La densité de courant est un paramètre clé pour l'électrocoagulation (EC), car elle influence la dissolution des électrodes en fer ou en aluminium et affecte les coûts du procédé. Des études montrent qu'une densité de courant plus élevée améliore le taux d'élimination de la turbidité et des polluants, tout en réduisant le temps de traitement [53]. Elle est également proportionnelle à la cinétique des réactions électrochimiques à la surface de l'électrode, avec une dissolution accrue des électrodes à des pH acides ou neutres, favorisant ainsi la production de résidus métalliques bénéfiques pour l'élimination des polluants [49].

##### **Effet de la quantité de charge**

La quantité de charge, ou quantité d'électricité, est calculée en multipliant l'intensité appliquée par le temps de traitement, puis en divisant le résultat par le volume traité. Cette relation est exprimée par l'équation suivante :

**Équation 6 :**  $Q = I \times t / V$

- Q est la quantité de charge (Coulombs),
- I est l'intensité appliquée (en ampère),
- t est le temps de traitement (en heure),
- V est le volume traité (en litre).

Ce paramètre est crucial, car il permet de contrôler la quantité de coagulants générés pour déstabiliser les suspensions colloïdales. Sanni [51] a démontré que le même taux d'élimination

du phosphore total peut être atteint en appliquant une quantité de charge identique, même à différentes densités de courant. En se basant sur la loi de Faraday, on peut observer que les paramètres susceptibles de varier sont uniquement l'intensité et le temps, les autres paramètres restants constants. Par conséquent, il est possible de réduire le temps de traitement en augmentant la densité de courant tout en maintenant la même quantité de charge [49].

### **Effet du pH initial de l'effluent**

Le pH initial est un paramètre crucial dans le traitement par électrocoagulation (EC). Il influence la conductivité de la solution, la dissolution des électrodes, le potentiel zêta et les espèces de fer formées. Le pH initial affecte également la formation des bulles d'hydrogène à la cathode [54]. Différents agrégats d'aluminium et de fer se forment en fonction du pH, les plus efficaces étant dans des conditions acides, neutres et légèrement alcalines. En milieu acide, le pH augmente rapidement, tandis qu'en milieu basique, il diminue. Il est recommandé d'appliquer l'EC à des pH proches de la neutralité pour une meilleure élimination des polluants [49-51].

### **2.3.2.2 Traitement par le procédé de la biofiltration**

Dans les systèmes de traitement pour l'assainissement non collectif, plusieurs méthodes peuvent être utilisées : les filières dites « traditionnelles » et les nouvelles filières. Ces nouvelles filières font l'objet d'une évaluation de leurs capacités d'épuration ainsi que des risques qu'elles peuvent représenter pour la santé et l'environnement. Certaines d'entre elles ont obtenu une approbation officielle, permettant leur mise sur le marché.

Les procédés ayant été évalués et approuvés peuvent être regroupés en trois grandes catégories:

Les filtres compacts, également appelés massifs filtrants, opèrent sur une base biologique en utilisant un milieu poreux pour la filtration. Ces filières sont des cultures bactériennes fixées non immergées, tout comme les filières traditionnelles [55].

Les matériaux utilisés pour le recouvrement peuvent être de diverses origines : minérale comme la zéolithe ou la laine de roche, organique comme la tourbe ou les copeaux de coco, ou synthétique comme les géotextiles. Les paragraphes suivants exposent plusieurs méthodes de traitement compact comme : microstations d'épuration préfabriquées, filtres à disques biologiques (bidisques), systèmes SBR (Sequencing Bath Reactor), Bio-réacteurs à membrane (MBR). Les matériaux employés sont sélectionnés en fonction de leur grande aptitude à le développement de la biomasse. La biomasse épuratrice se forme dans les porosités entre et au sein des matériaux [56-57].

Le biofilm est formé sur un support fin, qui favorise l'exposition de la biomasse à l'oxygène et à l'eau usée. Cela oblige les micro-organismes qui composent la biomasse à développer des mécanismes de Survie et de croissance, favorisant ainsi la décomposition des polluants. Les micro-organismes présents dans la biomasse aérobie décomposent les polluants solubles biodégradables, ce qui conduit à la production de gaz et la réduction de la charge polluante de l'eau usée. Ce processus est efficace pour l'élimination à la fois des polluants organiques et des composés azotés [58].

La biofiltration aérobie sur des supports de fibre de coco et de coque et l'électrocoagulation sont de nouveaux procédés d'épuration des eaux usées domestiques au Québec. Le traitement secondaire permet d'enlever la charge organique biodégradable des matières en suspension. La biofiltration aérobie sur des supports de fibre de coco et de coque et l'électrocoagulation sont de nouveaux procédés d'épuration des eaux usées domestiques au Québec [59].

### **2.3.2.3 *Traitement décentralisé combinant les procédés d'électrocoagulation et de biofiltration***

Sachant que les EUD peuvent contenir des polluants (composés organiques persistants, phosphore, métaux toxiques, etc.) susceptibles d'échapper au traitement par biofiltration (BIOF), il est prévu d'étudier l'intégration du procédé ECS comme traitement de polissage en aval du procédé BIOF. L'objectif de cette deuxième partie du projet est d'évaluer l'impact du procédé BIOF sur les performances épuratoires du procédé ECS, utilisé comme traitement complémentaire pour la déphosphatation, la désinfection et l'élimination de certains polluants organiques et inorganiques réfractaires présents dans les ERD.

Les travaux liés à l'intégration du procédé EC comme traitement de polissage en aval du procédé BIOF seront réalisés à partir de l'unité de BIOF décrite précédemment. Dans un premier temps, cette unité sera utilisée seule pour le traitement des ER. Les conditions de fonctionnement optimales définies lors de l'Activité 1 seront à priori appliquées. Toutefois, en raison de la complexité des ERD, des études d'adaptation spécifiques pourraient s'avérer nécessaires.

La performance du procédé BIOF sera évaluée sur la base des mêmes paramètres que ceux suivis lors de l'Activité 1 : P<sub>tot</sub>, P-PO<sub>4</sub>, N-NH<sub>4</sub>, NNTK, NO<sub>3</sub>, alcalinité, DBO<sub>5</sub>, COD, Coliformes fécaux, MES, ST, pH, Conductivité, Turbidité etc. Une fois les meilleures conditions de traitement établies, une quantité suffisante d'effluents traités par le procédé BIOF sera collectée (environ 100L) pour alimenter l'unité ECS. Les conditions de traitement optimales déterminées lors de

l'activité-1c seront à priori appliquées pour cette étape traitement tertiaire. Durant le traitement ECS, certains paramètres opératoires (tels que la densité de courant et le temps de rétention hydraulique) pourront être ajustés afin d'optimiser le procédé pour les ERD prétraitées par biofiltration.

En fonction des résultats obtenus lors du traitement séquentiel (BIOF suivi d'ECS), une étude sera menée sur le couplage direct des deux procédés (BIOF/ECS) en mode d'opération continue. Cette démarche permettra d'analyser l'influence de certains paramètres opératoires du BIOF, ainsi que celle de composés relargués (comme les substances extracellulaires ou polysaccharides), sur les performances épuratoires du procédé ECS (Activité 2c). L'étude du couplage direct offrira également une rétroaction utile pour ajuster le fonctionnement du BIOF, notamment par l'établissement de corrélations pertinentes entre les performances de l'électrocoagulation et celles de la biofiltration.

Dans un second scénario expérimental, un taux d'élimination de la DCO ( $37 \pm 2\%$ ) a été obtenu pour une concentration initiale de  $1\,522 \text{ mg O}_2/\text{L}$ . Des abattements notables ont également été enregistrés pour la turbidité ( $82 \pm 9\%$ ), la couleur vraie ( $60 \pm 12\%$ ), le zinc ( $95 \pm 3\%$ ) et le phosphore total ( $82 \pm 5\%$ ) avec des concentrations initiales respectives de  $178 \pm 54 \text{ UTN}$ ,  $1\,620 \pm 42 \text{ UCV}$ ,  $1,46 \pm 0,06 \text{ mg/L}$ ,  $4,89 \pm 0,36 \text{ mg P-PO}_4/\text{L}$ . La biofiltration, quant à elle, a permis un taux d'élimination de 99% de de l'azote ammoniacal pour une concentration initiale moyenne de  $595 \pm 50 \text{ mg N/L}$ . En revanche,  $42 \pm 7\%$  d'élimination de la DCO résiduelle a été atteint.

## 3 HYPOTHÈSES ET OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

---

### 3.1 Description des hypothèses de travail

Nous proposons dans le cadre de cette étude de coupler le procédé électrolytique d'électrocoagulation solaire (ECS) avec le procédé de biofiltration (BIOF) sur un support organique afin de soumettre les eaux résiduaires domestiques (ERD) à des traitements complémentaires et plus poussés avant tout rejet dans le milieu récepteur. La biofiltration permet de réduire la présence de composés réagissant avec l'électrocoagulation pour ainsi focaliser les forces sur les composés inorganiques et organiques persistants (métaux toxiques, phosphore, phénol hydrocarbures, etc.).

Il convient de souligner que l'objectif de ce projet n'est pas d'éliminer complètement la matière organique par le seul traitement biologique (biofiltration), mais plutôt d'optimiser le traitement des ERD en combinant les deux procédés (BIOF et ECS) de manière complémentaire. Lorsque le procédé BIOF est placé en amont de l'ECS, une fraction de la matière organique peut être éliminée à l'aide des nutriments disponibles (notamment le phosphore et l'azote) naturellement présents dans les eaux usées domestiques.

En revanche, si le procédé BIOF est placé en aval de l'ECS, l'effluent issu de l'électrocoagulation pourra être appauvri en phosphore et limiter ainsi l'efficacité du traitement biologique subséquent. Il est toutefois possible d'ajuster les paramètres du traitement ECS afin de conserver un résiduel en phosphore suffisant pour éviter toute carence lors de l'étape de biofiltration.

En résumé, les deux configurations (BIOF/ECS et ECS/BIOF) seront étudiées en fonction de la disponibilité du phosphore dans les eaux usées à traiter. Par ailleurs, les incertitudes liées au couplage de ces deux technologies (BIOF et ECS) devront être levées. L'étude de ce couplage visera à fournir une rétroaction nécessaire à l'établissement de corrélations pertinentes entre les performances épuratoires du procédé BIOF et celles du procédé ECS. Il est important de noter que l'application du procédé ECS induit une augmentation du pH de l'effluent, pouvant affecter négativement les performances épuratoires du traitement subséquent par le procédé BIOF. De plus, certaines substances (acides humiques, substances extracellulaires) peuvent être relarguées lors du traitement par BIOF, et ces composés peuvent à leur tour interférer avec la dissolution anodique lors du traitement subséquent par le procédé ECS.

## **3.2 Formulation des objectifs scientifiques**

L'objectif global de ce projet est de développer des procédés hybrides mettant en synergie les techniques d'électrocoagulation solaire (**ECS**) et de biofiltration sur support organique (**BIOF**) de manière à respecter les objectifs environnementaux de rejet. Cette approche constitue l'une des méthodes de traitement visant à réduire l'emploi de réactifs chimiques qui conduisent très souvent à une augmentation de la salinité de l'effluent traité ou à une augmentation du volume de boues générées. De façon plus spécifique, ce projet de recherche vise les quatre objectifs principaux suivants :

- 1)** le premier est de développer des unités électrolytiques portatives (sans ajout de produits chimiques) et capables de clarifier les ERD (élimination des matière en suspension, de la turbidité, et autres type de composés organique et inorganique);
- 2)** Le second est de concevoir et tester des biofiltres naturels d'origine organique à base des biomasse locale et d'autres substances abondantes dans les îles des caraïbes mais très peu exploitées (fibres ligneuses de noix de coco, bagasse de canne à sucre et racines végétales, etc.). Par la suite, des essais seront effectués afin de réduire les composés organiques, azotés, phosphorés et microbiens des ERD. Ces nouveaux matériaux bioadsorbants seront intégrés dans des bioréacteurs sous forme de colonne dans le but de mettre au point des procédés hautement efficaces;
- 3)** Le troisième objectif est de mettre en synergie les techniques électrolytiques (ECS) (objectif 1) et les propriétés de biofiltration (BIOF) des nouveaux matériaux de biofiltres (objectif 2) pour accroître la capacité de dépollution des ERD;
- 4)** Le quatrième objectif est de développer une approche intégrée utilisant des sources d'énergies vertes et renouvelables (ex. énergie solaire) associées aux technologies environnementales proposées.

## **3.3 Méthodes et choix techniques**

### **3.3.1 Étude du procédé ECS en amont du procédé BIOF**

Certains polluants tels que les huiles et les graisses (H&G) et autres polluants toxiques comme : métaux lourds, composés organiques toxiques, résidus pharmaceutiques et toxiques, micro-polluants émergents, éléments pathogènes retrouvés dans les ERD peuvent compromettre le bon fonctionnement du procédé BIOF. Cette partie du projet vise à appliquer le procédé ECS

comme prétraitement des ERD afin de préserver l'efficacité du procédé BIOF vis-à-vis de composés susceptibles de limiter l'activité bactérienne [60].

La première phase des travaux (**Activité-1a**) consistera en la caractérisation physicochimique et microbiologique des ERD afin d'identifier de façon précise les différents contaminants (organiques, inorganiques et microbiens), ainsi que leur teneur initiale. Les échantillons d'ERD seront prélevés à partir d'une fosse septique de résidences isolées qui seront définies en accord avec les partenaires Haïtien et Cubain.

La deuxième phase des travaux (**Activité-1b**) consistera à concevoir et construire le réacteur ECS de forme parallélépipédique et de dimensions 12 cm (largeur) x 12 cm (longueur) x 19 cm (profondeur) comprenant huit électrodes parallèles planes et rectangulaires en aluminium ou en acier doux. Ce réacteur sera alimenté par un système photovoltaïque (ex. panneaux solaires) et cela dans la perspective d'une utilisation dans les îles des Caraïbes qui bénéficient d'un ensoleillement de plus de 6 à 8 heures par jour. Une telle approche permettra d'exploiter les conditions climatiques de la région (régions très ensoleillées) pour développer l'utilisation des panneaux solaires, lesquels serviront à alimenter l'unité électrolytique. Des ferrailles récupérées (exemptes de chrome et de nickel) seront utilisées comme électrodes sacrificielles (anodes), à condition qu'elles soient principalement composées de fer ou d'aluminium. Cette activité inclut également la caractérisation de la cellule ECS quant à sa capacité de génération de coagulants.

Une fois le réacteur construit, les premiers essais de décontamination électrolytique (**Activité 1c**) seront réalisés pour identifier l'électrode sacrificielle la plus efficace (Fe ou Al), sous des conditions standards : densité de courant de 10 mA/cm<sup>2</sup>, température de 20°C, temps de traitement < 30 minutes.

Un plan d'expériences à trois facteurs (densité de courant (5 à 20 mA/cm<sup>2</sup>), temps de traitement (10 à 30 min) et température (5 à 20°C)) de type plan factoriel puis plan central composite sera utilisé (**Activité-1d**). Les performances du procédé seront évaluées sur la base de l'abattement de la turbidité, des paramètres organiques (COD, DCO et DBO5) et inorganiques (P-PO4 et N-NH4). Les boues métalliques issues du procédé ECS seront également évaluées. Des analyses seront effectuées sur les boues métalliques déshydratées afin d'évaluer la teneur (%) des éléments suivants : carbone (%), azote (%), soufre (%), P (g/kg), Fe (g/kg) et Al (g/kg).

Une fois les meilleures conditions de prétraitement déterminées, un volume d'environ 100 L d'effluents traités par ECS seront collectés et utilisés pour alimenter une unité de BIOF de laboratoire (**Activité-1e**). Cette unité de BIOF sera constituée d'une colonne en plexiglas ou en

PVC d'une hauteur de 200 cm et d'un diamètre intérieur de 10 cm. Le volume de la colonne sera de 20 L. Le rapport  $DBO_5/N/P$  des ERD y sera évalué, en visant un ratio optimal C/N/P de 100/5/1. Si besoin, des ajustements en azote ou en phosphore seront effectués.

En fonctionnement normal, la colonne contiendra environ 10 L de liquide et sera remplie d'un matériau poreux organique (fibres de coco) servant de biofiltre. Une période de démarrage de 30 jours permettra de développer la biomasse bactérienne. Selon les caractéristiques initiales des ERD, cette période pourra être prolongée de 2 à 3 mois.

Les principaux paramètres opératoires à optimiser pour le procédé BIOF seront les suivants :

- 1) la composition des mélanges de biofiltres ;
- 2) le degré de compaction des bio-adsorbants ;
- 3) la charge hydraulique appliquée (temps de contact) ;
- 4) la durée d'utilisation du biofiltre avant son remplacement ou de régénération. Une régénération à contre-courant sera testée périodiquement en fonction du colmatage.

En parallèle, des essais de tassement et de formation de canaux préférentiels seront menés pour anticiper les comportements à l'échelle réelle (**Activité 1f**). Des tests de régénération et une analyse technico-économique du procédé d'adsorption seront également réalisés.

Enfin, un couplage direct ECS/BIOF en mode continu sera étudié (**Activité 1g**), plus représentatif d'un système industriel. Cela permettra d'analyser l'influence des paramètres ECS (intensité, densité de courant, temps de rétention) sur les performances de la BIOF, et d'obtenir une rétroaction précieuse pour optimiser les deux procédés. Il convient de noter que l'ECS augmente le pH de l'effluent, ce qui peut nuire à l'efficacité de la BIOF. De plus, la présence d'hydroxydes métalliques résiduels pourrait perturber le fonctionnement de la biofiltration. Cette activité vise à résoudre les incertitudes liées à l'interaction des deux procédés dans cette configuration.

### **3.3.2 Étude du procédé ECS en aval du procédé BIOF**

Étant donné que les ERD peuvent contenir des polluants (composés organiques persistants, phosphore, métaux toxiques, etc.) qui peuvent échapper au traitement par biofiltration (BIOF), cette phase du projet propose d'appliquer le procédé ECS en aval du procédé BIOF comme traitement de polissage. L'objectif est d'évaluer l'influence du traitement biologique sur l'efficacité de l'ECS pour la déphosphatation, la désinfection et l'élimination de polluants organiques/inorganiques réfractaires.

Les essais (**Activité 2a**) commenceront par l'utilisation de l'unité BIOF (décrite précédemment) seule, dans les conditions standards définies à l'Activité 1. Des adaptations pourront être envisagées selon la complexité des ERD. Les performances seront évaluées à l'aide des mêmes paramètres que dans l'Activité 1 (P<sub>tot</sub>, P-PO<sub>4</sub>, N-NH<sub>4</sub>, NTK, NO<sub>3</sub>, alcalinité, DBO<sub>5</sub>, COD, coliformes fécaux, MES, ST, etc.).

Une fois les meilleures conditions définies, environ 100 L d'effluent traité par BIOF seront recueillis pour alimenter l'unité ECS (**Activité 2b**). Les conditions de traitement établies lors de l'Activité 1c seront initialement appliquées, avec possibilité d'ajuster certains paramètres (ex. densité de courant, temps de rétention hydraulique) pour adapter l'ECS à ce nouvel effluent.

Selon les résultats obtenus, un couplage direct BIOF/ECS en mode continu sera étudié (**Activité 2c**) afin d'observer l'influence de certains paramètres (ex. substances extracellulaires, polysaccharides) relargués par la biofiltration sur les performances de l'ECS. Cette étude vise aussi à ajuster les conditions de traitement du BIOF pour améliorer les synergies avec le procédé ECS.



## 4 MATÉRIEL ET MÉTHODES

### 4.1 Échantillonnage et caractérisation des EUD

Les eaux usées domestiques (EUD) utilisées dans cette étude proviennent de la Station d'épuration Est de la Ville de Québec. Elles ont été prélevées à la sortie du décanteur primaire (**Error! Reference source not found.**). Par la suite, les échantillons ont été entreposés à une température de 4°C. Après avoir été soumises à une caractérisation physicochimique, les eaux usées domestiques ont été traitées d'abord par biofiltration, suivie d'une électrocoagulation. Les principales caractéristiques initiales des effluents sont résumées (Tableau 6).

Les eaux usées domestiques (EUD) utilisées dans cette étude proviennent de la Station d'épuration Est de la Ville de Québec. Elles ont été prélevées à la sortie du décanteur primaire (Figure 1). Par la suite, les échantillons ont été entreposés à une température de 4°C. Après avoir été soumises à une caractérisation physicochimique, les eaux usées domestiques ont été traitées d'abord par biofiltration, suivie d'une électrocoagulation. Les principales caractéristiques initiales des effluents sont résumées au Tableau 6.

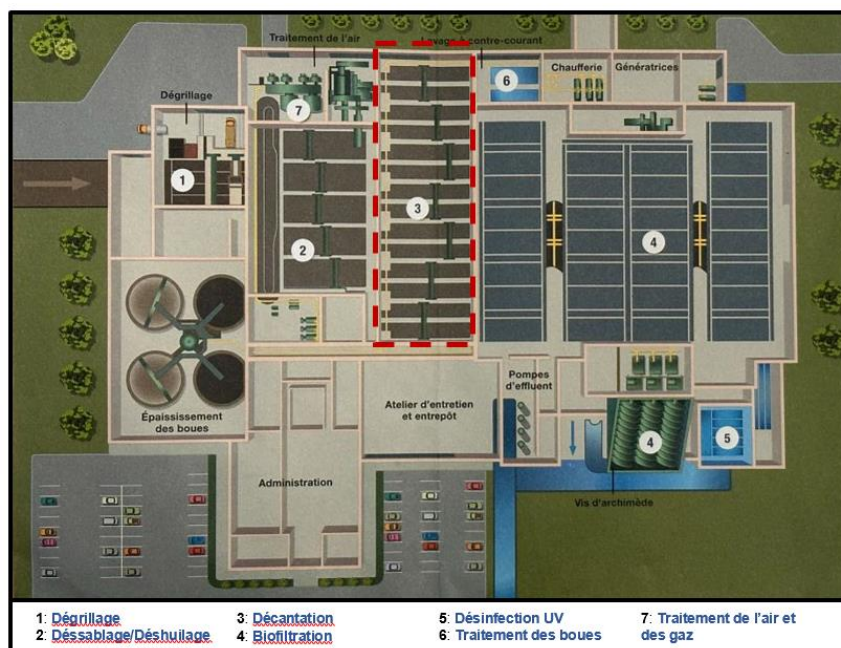


Figure 1 : Site et point d'échantillonnage des eaux usées municipales de la Ville de Québec

**Tableau 6 : Caractéristiques initiales des eaux usées domestiques (EUD)**

<b>Paramètres</b>	<b>Valeurs</b>
pH	7,04 ± 0,67
Conductivité (µS/cm)	1 931 ± 64
Turbidité (UTN)	311 ± 74
DCO (mg/L)	971 ± 170
MES (mg/L)	6 380 ± 1 613
N-NH <sub>4</sub> (mg/L)	44,8 ± 6,2
COT (mg/L)	4,7 ± 0,6
Na (mg/L)	92,0 ± 0,8
Cl (mg/L)	135 ± 2
SO <sub>4</sub> (mg/L)	52,0 ± 1,1
N-NO <sub>3</sub> (mg/L)	50,4 ± 3,0
P-PO <sub>4</sub> (mg/L)	2,4 ± 0,1
Ca (mg/L)	59,0 ± 1,5
Mg (mg/L)	9,0 ± 0,1
K (mg/L)	14,0 ± 0,1
S (mg/L)	32,0 ± 1,9
P (mg/L)	1,83 ± 0,01
Na (mg/L)	152 ± 1
Cu (mg/L)	0,002 ± 0,001
Al (mg/L)	0,82 ± 0,02
Fe (mg/L)	2,0 ± 0,1
Caféine (µg/L)	5,0 ± 0,2
Carbamazépine (µg/L)	0,4 ± 0,1
Ibuprofène (µg/L)	3,9 ± 0,5

Les tests de laboratoire ont été menés à des températures comprises entre 23,2 °C à 26,9 °C. La température des échantillons collectés à la station d'épuration (STEP) se situaient entre 10 et 11,5°C.

#### **4.2 Coque de la noix et fibres de coco**

La fibre de coco et la coque concassée en morceaux de 1 cm de diamètre sont des résidus organiques pouvant être utilisés dans les systèmes de biofiltration pour le traitement des eaux usées domestiques. Leur efficacité repose sur leurs propriétés physiques qui favorisent la fixation des bactéries. Ces matériaux, dérivés généralement dérivés de la noix de coco, sont des alternatives écologiques et renouvelables aux supports de filtration traditionnels tels que les plastiques.

### 4.2.1 Fibre de coco

La fibre de coco, également appelée "coir", est un matériau végétal léger et perméable provenant de l'enveloppe extérieure des noix de coco. Elle peut être avantageusement utilisée en biofiltration en raison de sa capacité à retenir l'humidité et à fournir une surface idéale pour l'adhésion et la colonisation des microorganismes, notamment les bactéries nitrifiantes et dénitrifiantes [61-63]. Ces microorganismes sont essentiels aux processus de traitement biologique, tels que la dégradation de la matière organique et la réduction des charges en azote (nitrification et dénitrification).

Sur le plan technique, la fibre de coco présente une haute porosité, ce qui permet une bonne circulation de l'eau et une oxygénation optimale pour les micro-organismes aérobiques. Elle possède également une capacité d'échange cationique (CEC) modérée, lui permettant d'adsorber certains ions, comme l'ammonium, contribuant ainsi à la réduction des polluants présents dans l'eau [61-62-63].

### 4.2.2 Coque concassée

La coque concassée, réduite en morceaux d'environ 1 centimètre de diamètre, est un autre matériau dérivé de la noix de coco. Une fois broyée, elle présente une surface rugueuse idéale pour la colonisation des biofilms [49-64]. Ce matériau offre une forte résistance mécanique et chimique, ce qui lui permet de maintenir sa structure et sa stabilité sur le long terme, même en présence de substances corrosives ou d'effluents acides ou basiques.

En biofiltration, les morceaux de coque sont principalement utilisés comme support physique dans les lits filtrants. Leur taille uniforme permet une répartition homogène des effluents, optimisant ainsi les processus de filtration par contact et biofilm.

En somme, les deux matériaux, fibre de coco et coque concassée, jouent un rôle complémentaire dans la biofiltration des eaux usées domestiques (Figure 2). Lorsqu'ils sont utilisés dans un filtre biologique, comme un lit filtrant ou un biofiltre à flux descendant, ils favorisent plusieurs processus clés du traitement des eaux usées : 1) **Filtration physique** : Les matériaux retiennent les particules solides présentes dans les eaux usées, comme les matières en suspension et les solides colloïdaux, permettant leur élimination par simple passage de l'eau à travers le filtre; 2) **Traitement biologique** : Grâce à la colonisation de biofilms (communautés microbiennes) sur les surfaces rugueuses de la fibre et de la coque, ces matériaux facilitent la dégradation biologique de la matière organique dissoute, y compris les matières organiques complexes et les polluants azotés (comme l'ammonium); 3) **Nitrification et dénitrification** : Les microorganismes

présents dans les biofilms favorisent la nitrification (transformation de l'ammonium en nitrite puis en nitrate) et la dénitrification (réduction des nitrates en azote gazeux), contribuant ainsi à la réduction des concentrations d'azote dans les effluents traités; 4) **Amélioration de la qualité de l'effluent** : En agissant comme support pour les microorganismes et en contribuant à l'adsorption des polluants, ces matériaux aident à réduire la demande biologique en oxygène (DBO) et la demande chimique en oxygène (DCO), deux indicateurs importants de la qualité de l'eau.



Figure 2 : Coque de noix de coco et coque selon la Direction de l'Agriculture de Polynésie Française

### 4.3 Montage et caractéristiques des dispositifs expérimentaux

#### 4.3.1 Unité de biofiltration

À l'échelle du laboratoire, notre unité de biofiltration (BIOF) est constituée d'une colonne en plexiglas de hauteur de 73,3 cm, d'un volume utile de 2,98 L et d'un diamètre intérieur de 7,2 cm.

La colonne est remplie d'un garnissage poreux organique (Figure 3), composé d'un assemblage de quatre couches de fibres de coco et des coques. La 1<sup>ère</sup> couche est composée des coques des noix de coco pour faciliter le passage des eaux usées. Ces coques favorisent les échanges liquides/gazeux essentielles pour l'assainissement des eaux usées. Les 2<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> couche sont composées d'un mélange de 80% de fibres de coco et de 20% des coques. Entre les deux, nous avons placé une 3<sup>ème</sup> couche de coques.

Un espace de 7 cm a été ménagé pour permettre l'entrée et la diffusion de l'air humidifié, protégé par un grillage. De plus, une cavité de 16,8 cm de hauteur est aménagée pour faciliter la diffusion et l'évacuation de l'air, située dans l'orifice prévu au sommet du cap en PVC.

L'unité BIOF fonctionne en mode continu avec un volume utile de 2,98 L.

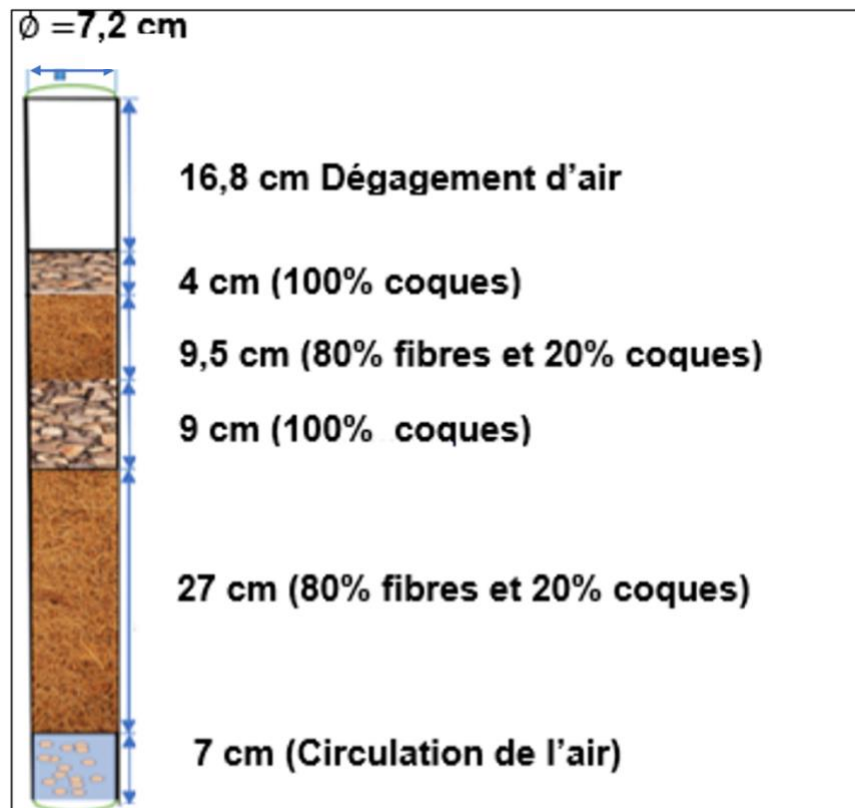


Figure 3 : Schéma du garnissage intérieur de la biofiltration

La Figure 4 schématise les composantes externes liés à la colonne BIOF. Pour acheminer l'affluent, une pompe péristaltique (*Masterflex Console Drive, Cole-Parmer Instrument Co, Canada*) a été utilisée. La colonne a été aérée par injection ascendante d'air comprimé à partir de sa base. L'air et les eaux usées à traiter circulent en contre - courant. Le débit d'air est initialement mesuré à l'aide d'un débitmètre à flotteur (*Cole-Parmer Valved Acrylic Flowmeter, 0 - 20 LPM*), puis humidifié par immersion dans un ballon d'eau avant d'être introduit dans la colonne. Cette étape vise à éviter un assèchement excessif de la colonne par l'injection d'un air très sec. Le débit d'air est maintenu à 0,5 L/min, ce qui correspond à une vitesse superficielle d'environ 0,03 m<sup>3</sup>/h dans la colonne vide. La chaudière d'alimentation de l'affluent est placée dans

une chambre froide à une température entre 5 °C et 7 °C afin de limiter la biodégradation des EUD.

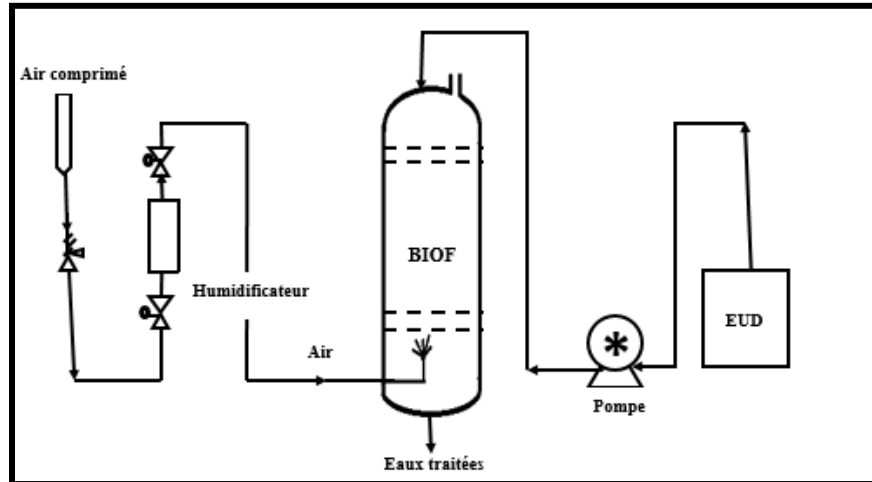


Figure 4 : Croquis de l'installation de la biofiltration

#### 4.3.2 Unité d'électrocoagulation

L'application de l'électrocoagulation (EC) est réalisée dans un réacteur en plexiglas de 3,6 cm de largeur, 11,3 cm de longueur et 12,7 cm de hauteur (Figure 5). Les électrodes utilisées au pour le traitement sont en acier doux, d'une épaisseur de 0,1 cm et d'une surface 109 cm<sup>2</sup>. Le réacteur comprend deux électrodes disposées en parallèle, à une distance de 1cm. L'agitation est assurée par un agitateur magnétique placé au fond du réacteur.



**Figure 5 : Dispositif d'électrocoagulation**

Différentes intensités de courant et temps de traitement sont expérimentés. L'intensité du courant est imposée à l'aide d'un générateur de courant de type (JESVERTY SPS-3010N 0-30V 0-10A).

#### **4.4 Techniques expérimentales**

Nos premiers travaux ont porté sur la caractérisation physicochimique des EUD afin d'évaluer la charge organique et inorganique des effluents. Cette étape est cruciale car elle permet de suivre la performance de notre unité de traitement.

Notre filière de traitement combine deux procédés, à savoir la biofiltration (BIOF) et l'électrocoagulation (EC). Dans notre étude, nous avons testé le couplage (BIOF-EC) dans le but d'assurer une dégradation complète de la matière organique par la BIOF, tout en évaluant son efficacité sur les résidus médicamenteux. Le procédé EC, appliqué en aval, est utilisé pour éliminer le phosphore résiduel.

La Figure 6 présente les différentes activités liées au couplage (BIOF-EC) réalisées au laboratoire.

L'efficacité de la dégradation de la matière organique est établie en suivant au quotidien les paramètres suivants : DCO,  $\text{NH}_4$ , MES, turbidité, conductivité, pH, CBZ et caféine.

Dans l'optique de développer la biomasse, une période de démarrage de 30 jours a été appliquée. L'eau brute a été dopée avec du glucose ( $C_6H_{12}O_6$ ), du sulfate d'ammonium ( $(NH_4)_2SO_4$ ) et du phosphate dipotassique ( $K_2HPO_4$ ) afin d'atteindre le ratio C/N/P : 100/10/1.

Une fois la colonne BIOF en fonctionnement optimal, les EUD biofiltrées sont acheminées vers l'unité EC pour la réalisation des expériences. Au cours de celles-ci, plusieurs paramètres ont été testés, notamment : l'intensité de courant (0.7 à 2.8 A/cm<sup>2</sup>) et le temps de traitement (5 à 30 min). Les indicateurs de performance d'EC sont évalués à travers le suivi des paramètres suivants : DCO, conductivité, pH, PO<sub>4</sub> et MES.

**Tableau 7 : Démarche expérimentale des travaux du scénario (BIOF-EC)**

<p align="center"><b>Étape 1</b> <b>Développement de la biomasse et acclimatation de BIOF</b></p>	<p align="center"><b>Biofiltration des eaux brutes (sans ajout de réactifs)</b> <b>Étape 2</b> <b>Biofiltration des EUD brutes</b></p>	<p align="center"><b>Étape 3</b> <b>Électrocoagulation des eaux biofiltrées</b></p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilisation des EUD brutes comme inoculum.</li> <li>• Suivi de la teneur du NH<sub>4</sub>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dopage des EUD</li> <li>• Suivi des teneurs de la DCO, du NH<sub>4</sub>, de la CBZ et de la caféine (CAF).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Études des paramètres influents : densité de courant, temps de traitement</li> <li>• Paramètres suivis : DCO, NH<sub>4</sub>, pH, Résidus métalliques et métaux</li> </ul>

## **4.5 Méthodes analytiques**

### **4.5.1 pH, conductivité, turbidité**

Le pH a été mesuré par un pH-mètre (*Accumet excel XL25 - pH/mV/Temp/Ion meter, Fisher Scientific Co*) équipé d'une électrode Cole-Palmer à double jonction (référence Ag/AgCl).

La conductivité a été mesurée par un conductimètre Mettler-Toledo AG S230 B233205440. Avant chaque usage quotidien, les appareils sont calibrés en utilisant des solutions d'étalonnage adaptées. Un turbidimètre Formazin (0-4000 UTN) a servi à déterminer la turbidité en UTN (Unité de Turbidité Néphélométrique) après un calibrage avec des standards de formazine.

### **4.5.2 Demande chimique en oxygène**

La DCO a été estimée en utilisant la *Méthode d'Analyse (MA.315-DCO 1.0)* du Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). Le principe de cette méthode se base sur l'oxydation de la matière organique présente dans l'échantillon dans un milieu fortement acide à une température d'environ 150° pendant 2 h.

À la suite de cette réaction, l'échantillon change de couleur. Cette coloration est proportionnelle à la quantité de la matière organique. La lecture de l'absorbance (Abs) à une longueur d'onde de 600 nm est effectuée. L'absorbance est en fonction de la DCO, soit  $Abs = f(DCO)$  exprimée en mg d'O<sub>2</sub>/L.

### **4.5.3 Azote ammoniacal (NH<sub>4</sub>) et orthophosphate (PO<sub>4</sub>)**

La mesure de l'azote ammoniacal (NH<sub>4</sub>) et l'ortho-phosphate (PO<sub>4</sub>) sont réalisées à l'aide de méthodes colorimétriques, respectivement, *QuikChem® Method 10-107-06-2-B* et *QuikChem® Method 10-115-01-1-B (LACHAT Instruments)*.

### **4.5.4 Analyse des métaux**

Pour mesurer la concentration des métaux la *Méthode d'Analyse (MA. 200 - Mét. 1.2)* du Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec (CEAEQ) qui a recours à la spectrométrie de masse à source ionisante au plasma d'argon a été utilisée.

Dans un premier temps, les échantillons ont été filtrés sur un filtre (Whatman 934AH), ensuite ils sont acidifiés avec de l'acide nitrique (0,2%) et conservés à 40 °C jusqu'au moment de l'analyse.

#### 4.5.5 MES

L'analyse expérimentale de MES est effectuée en se basant sur *la Méthode d'Analyse (MA. 115 – S.S. 1.2)* certifiée par le CEAEQ.

Avant de mesurer les MES, il faut peser le filtre (Whatman 934AH) dans une coupelle en aluminium vide ( $m_1$ ). Par la suite, filtré sous vide 20 mL d'échantillon. Après filtration, le résidu est séché à 103-105 °C pendant 24 h, refroidi dans un dessiccateur pendant au moins 4 h et pesé à nouveau ( $m_2$ ).

La concentration de MES est exprimée en mg/L et est calculée comme suit :

Équation 7 :  $MES = (m_2 - m_1) / V$

- V est le volume d'échantillon filtré.

## 5 RÉSULTATS ET DISCUSSION

---

### 5.1 Traitement des eaux usées domestiques par biofiltration (BIOF)

La première partie des travaux a consisté à soumettre des eaux usées domestiques (EUD) au traitement par BIOF seule. Les analyses initiales des effluents issus de la station d'épuration relèvent un ratio DBO/DCO de 2,33, supérieur à 0,5 [65], ce qui indique que l'effluent est biodégradable, à condition d'un traitement adéquat. Ce résultat justifie l'utilisation de la biofiltration comme première étape du traitement.

Les caractéristiques initiales des EUD montrent un ratio C/N/P de l'eau brute de 57/3/1,8, ce qui n'est pas optimal pour la croissance bactérienne impliquée dans le processus de dégradation des composés organiques. Pour favoriser cette croissance bactérienne au sein du biofiltre, les EUD ont été dopées en nutriments (N et P) ainsi qu'en matière organique (glucose) afin d'atteindre un ratio C/N/P de 100/10/1. L'azote a été ajouté aux EUD sous de forme sulfate d'ammonium ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) et le phosphore sous forme de dihydrogénophosphate de potassium (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>).

Quatre scénarios ont été définis pour l'alimentation du biofiltre, chacun avec des objectifs ciblés (Tableau 8). Des proportions variées d'eaux usées domestiques dopées (EUD-D) et non dopées (EUD-ND) ont été mélangées. Les EUD-D ont été ajustées au ratio optimal C/N/P de 100/10/1, tandis qu'aucun nutriment n'a été ajouté aux EUD-ND. Ainsi, les mélanges ont été réalisés selon les rapports EUD-D/EUD-ND suivants (ratio en termes de % (v/v)) : 100/0; 50/50; 25/75 et 0/100.

La première partie des travaux a consisté à soumettre des eaux usées domestiques (EUD) au traitement par BIOF seule. Les analyses initiales des effluents issus de la station d'épuration relèvent un ratio DBO/DCO de 2,33, supérieur à 0,5 [62], ce qui indique que l'effluent est biodégradable, à condition d'un traitement adéquat. Ce résultat justifie l'utilisation de la biofiltration comme première étape du traitement.

Les caractéristiques initiales des EUD montrent un ratio C/N/P de l'eau brute de 57/3/1,8, ce qui n'est pas optimal pour la croissance bactérienne impliquée dans le processus de dégradation des composés organiques. Pour favoriser cette croissance bactérienne au sein du biofiltre, les EUD ont été dopées en nutriments (N et P) ainsi qu'en matière organique (glucose) afin d'atteindre un ratio C/N/P de 100/10/1. L'azote a été ajouté aux EUD sous de forme sulfate d'ammonium ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) et le phosphore sous forme de dihydrogénophosphate de potassium (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>).

Quatre scénarios ont été définis pour l'alimentation du biofiltre, chacun avec des objectifs ciblés (Tableau 8). Des proportions variées d'eaux usées domestiques dopées (EUD-D) et non dopées (EUD-ND) ont été mélangées. Les EUD-D ont été ajustées au ratio optimal C/N/P de 100/10/1, tandis qu'aucun nutriment n'a été ajouté aux EUD-ND. Ainsi, les mélanges ont été réalisés selon les rapports EUD-D/EUD-ND suivants (ratio en termes de % (v/v)) : 100/0; 50/50; 25/75 et 0/100.

**Tableau 8 : Description des quatre scénarios utilisés durant l'opération**

Scénarios	Description	Objectifs
1	100%(v/v) EUD-D + 0%(v/v) EUD-ND	Développement de la biomasse et évaluation de l'efficacité
2	50%(v/v) EUD-D + 50%(v/v) EUD-ND	Acclimatation et évaluation de l'efficacité
3	25%(v/v) EUD-D +75%(v/v) EUD-ND	Acclimatation et évaluation de l'efficacité
4	0%(v/v) EUD-D dopée + 100%(v/v) EUD-ND	Traitement et évaluation de l'efficacité

Une période de six jours a été maintenue pour chaque scénario. Le débit d'alimentation a été maintenu à  $1,2 \pm 0,1$  L/jr, correspondant à une charge hydraulique de  $0,29 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{jr}$ .

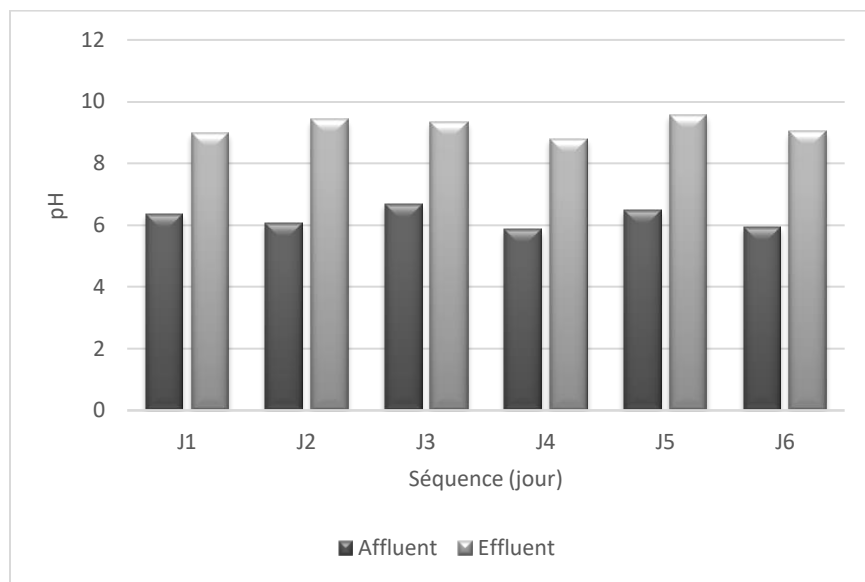
Pour maintenir les conditions optimales pour la croissance microbienne, nous avons procédé à un ajustement contrôlé de la composition des EUD. L'objectif était d'atteindre le ratio C/N/P de 100/10/1, considéré comme optimal pour le traitement biologique. Ce ratio favorise une activité microbienne équilibrée et efficace dans le processus de biodégradation.

La phase d'acclimatation du biofiltre s'est étendue sur une période de 21 jours. Durant cette phase, le biofiltre a été alimenté progressivement avec un mélange d'azote et glucose en proportion dans l'EUD dopées, afin de permettre à la biomasse microbienne de s'adapter aux conditions opérationnelles et aux caractéristiques des effluents à traiter.

## **5.2 Traitement des eaux résiduaires correspondant au scénario -1**

### **5.2.1 Suivi du pH**

La Figure 6 présente la variation du pH au cours du scénario 1. Nous constatons une tendance marquée : l'affluent présente un pH légèrement acide, avec une moyenne d'environ 6, tandis que l'effluent montre un pH nettement basique (moyenne d'environ 9). Cette augmentation d'environ 3 unités entre l'entrée et la sortie du biofiltre suggère plusieurs phénomènes potentiels : d'une part une activité de nitrification au sein du biofiltre, d'autre part le dégazage du  $\text{CO}_2$  dissous lors du passage de l'eau, ce qui pourrait contribuer à cette élévation du pH [66].



**Figure 6 :** Variation pH lors du scénario 1

### 5.2.2 Suivi de la turbidité

La Figure 7 illustre la variation de la turbidité lors du scénario 1. L'affluent présente une turbidité élevée et variable, oscillant entre 149 et 266 UTN, avec une moyenne d'environ 187 UTN. En comparaison, l'effluent montre une turbidité considérablement réduite, généralement comprise entre 3 et 6 UTN, à l'exception d'une valeur atypique de 9 UTN. Cette réduction significative, d'environ 98% en moyenne, témoigne de l'efficacité du biofiltre dans l'élimination des matières en suspension et des particules colloïdales.

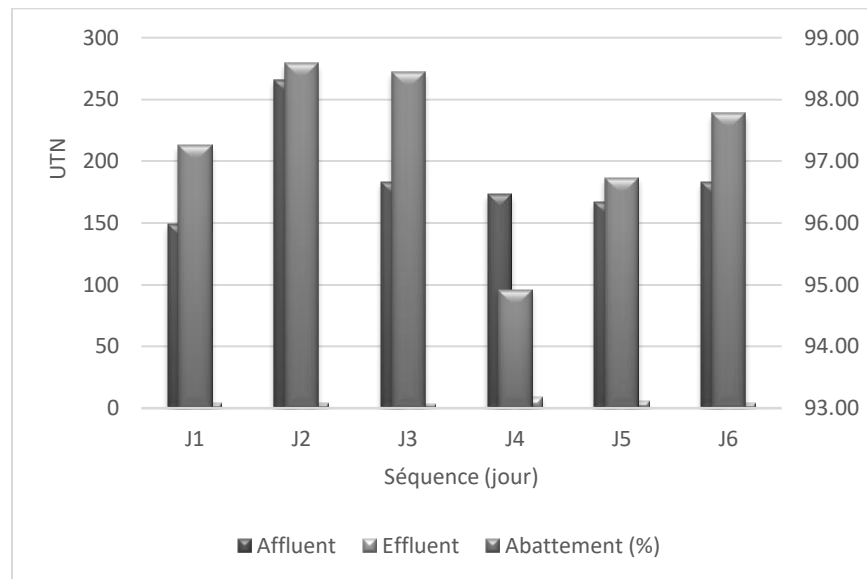


Figure 7 : Variation de la turbidité lors du scénario 1

### 5.2.3 Suivi des MES

La Figure 8 montre que l'affluent (à l'entrée du biofiltre) présente des concentrations de MES variables, oscillant entre 5 et 8 g/L, avec une moyenne d'environ 5 g/L. L'effluent, quant à lui, affiche des valeurs de MES relativement faibles, comprises entre 0,011 et 0,012 g/L, avec une moyenne d'environ 0,0115 g/L. Cette différence se traduit par un taux d'élimination moyen des MES d'environ 99%, démontrant la performance du biofiltre pour la clarification des eaux résiduaires.

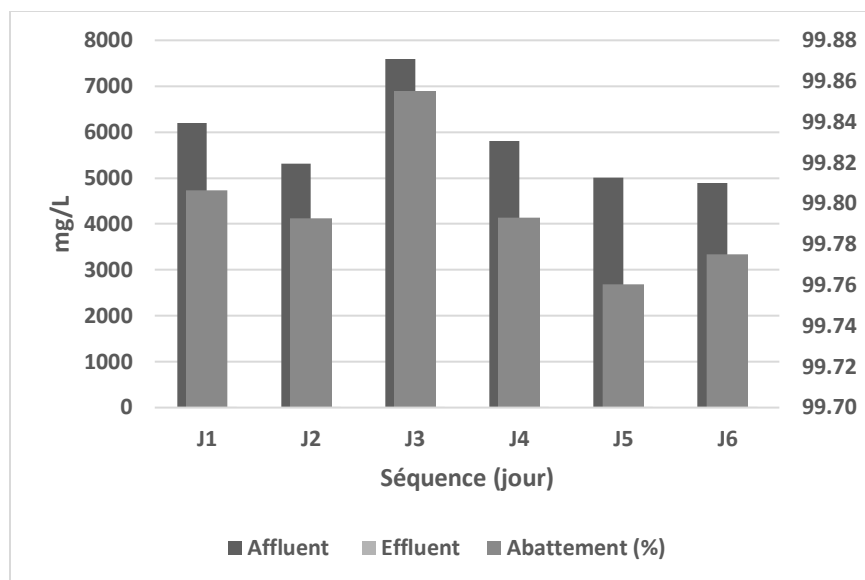
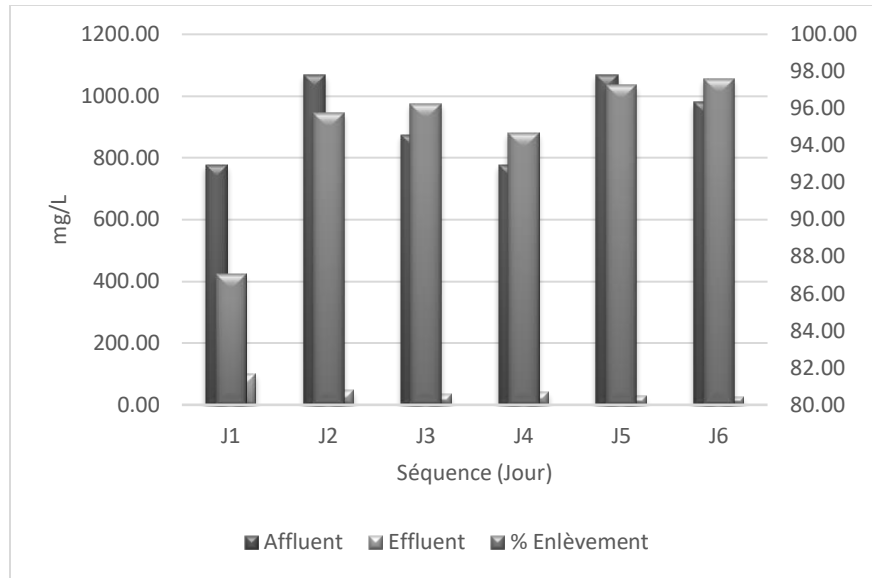


Figure 8 : Variation de MES lors du scénario 1

#### 5.2.4 Suivi de la DCO

La Figure 9 met en évidence l'efficacité du biofiltre en matière de réduction de la DCO. L'affluent présente des concentrations initiales de DCO variant de 612 à 1 077 mg/L, avec une moyenne d'environ 863 mg/L. En sortie du biofiltre, les valeurs résiduelles se situent entre 31 et 42 mg/L, avec une moyenne d'environ 37 mg/L. Cela représente un taux d'élimination de 95%.

Cette performance indique une élimination efficace de la DCO soluble par l'activité microbienne au sein du biofiltre. Par ailleurs, la DCO particulaire et colloïdale (environ 35% de la DCO totale), semble également avoir été éliminée efficacement grâce aux mécanismes conjoints de filtration et de biodégradation. Cette hypothèse est soutenue par la corrélation observée avec l'élimination des MES comme illustré dans la Figure 8.



**Figure 9 :** Variation de la DCO lors du scénario 1

Le biofiltre démontre une efficacité de traitement des eaux dopées, avec une capacité remarquable à éliminer les matières en suspension, réduire la turbidité et traiter la matière organique. Cependant, l'augmentation significative du pH nécessite une attention particulière pour assurer la conformité aux normes de rejet et optimiser le processus global de traitement.

## 5.3 Traitement des eaux résiduaires correspondant au scénario 2

### 5.3.1 Suivi du pH

La **Error! Reference source not found.**10 illustre l'évolution du pH durant le scénario 3. Une tendance significative est observée : l'affluent et l'effluent présentent un comportement identique du scénario 1.

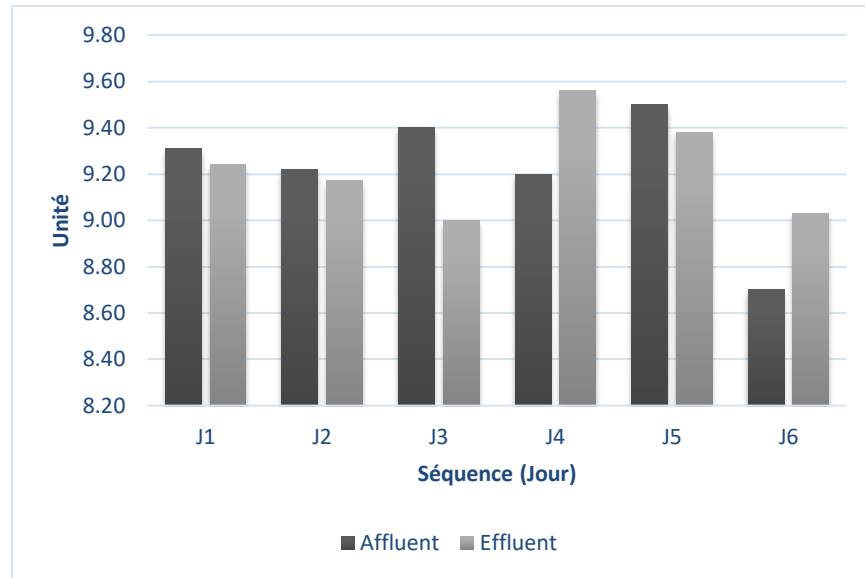
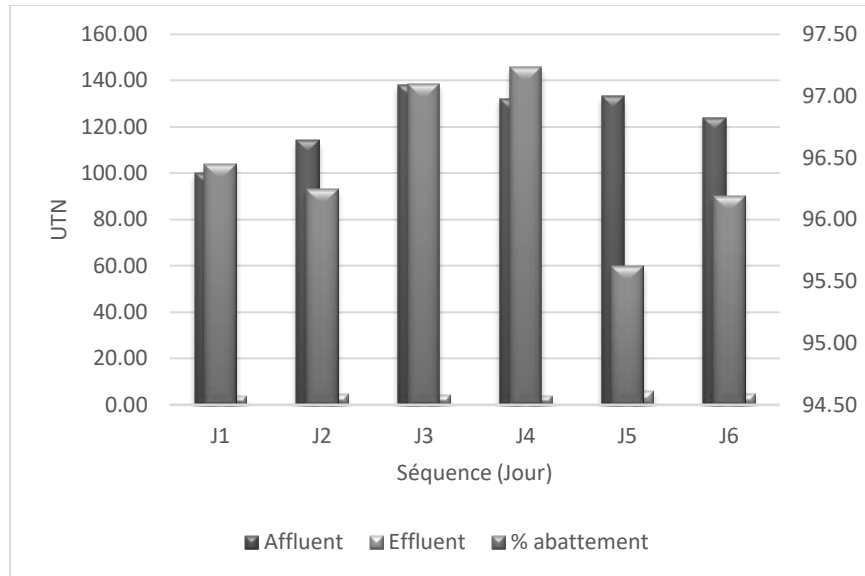


Figure 10 : Variation du pH lors du scénario 2 (50% ED + 50% EUB)

### 5.3.2 Suivi de la turbidité

La Figure 11 présente l'évolution de la turbidité lors de l'application du scénario 3 (2 ou 3). L'affluent présente une turbidité se situant entre 100 et 138 UTN, avec une moyenne d'environ 123 UTN. En revanche, l'effluent affiche une turbidité nettement réduite comprise entre 4 et 6 UTN. Cette diminution substantielle représentant un abattement moyen d'environ 97%, témoignant de l'efficacité du biofiltre pour l'élimination des matières en suspension et des particules colloïdales.



**Figure 11 :** Variation de la turbidité lors du scénario 2 (50% ED + 50% EUB)

### 5.3.3 Suivi de la matière en suspension

Comme le montre la Figure 12, l'affluent présente des concentrations de matières en suspension (MES) variables, fluctuant entre 4 et 8 g/L, avec une moyenne d'environ 6 g/L. En revanche, l'effluent présente des valeurs de MES relativement faibles et constantes, se situant entre 0,011 et 0,015 g/L, avec une moyenne d'environ 0,013 g/L. Cette disparité marquée se traduit par un taux moyen d'élimination de MES d'environ 99,8%, témoignant ainsi de l'efficacité du biofiltre pour l'enlèvement de MES.

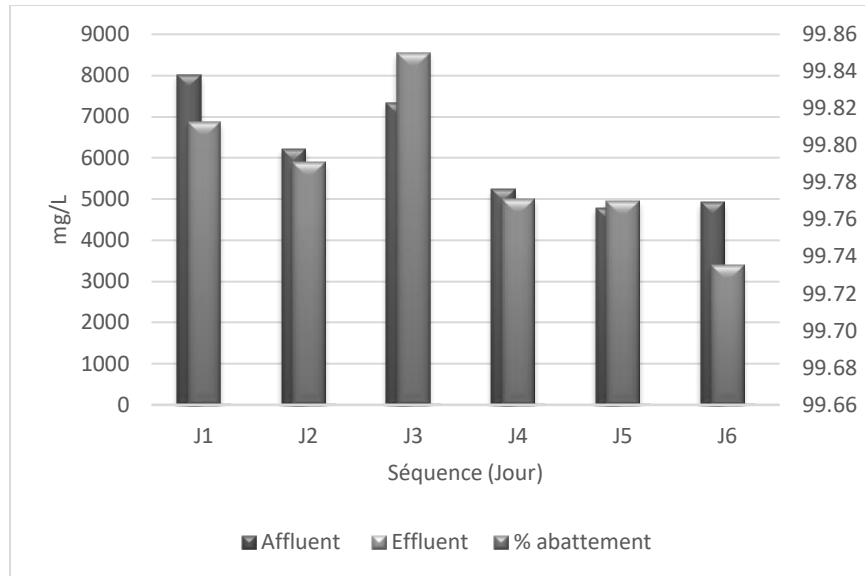


Figure 12 : Variation de MES lors du scénario 2 (50% ED + 50% EUB)

### 5.3.4 Suivi de la DCO

Les résultats relatifs au scénario 2 (50% ED + 50% EUB) sont présentés dans la Figure 13. L'affluent alimentant le biofiltre présente des concentrations en DCO variables se situant entre 293 et 504 mg/L, avec une moyenne de 333 mg/L. En comparaison, l'effluent (à la sortie du biofiltre) montre des valeurs de DCO significativement réduites, variant entre 27 et 59 mg/L, avec une moyenne d'environ 41 mg/L. Le taux d'élimination atteint 86%, principalement attribuable aux bactéries fixées sur le support du biofiltre, responsables de la biodégradation de la matière organique.

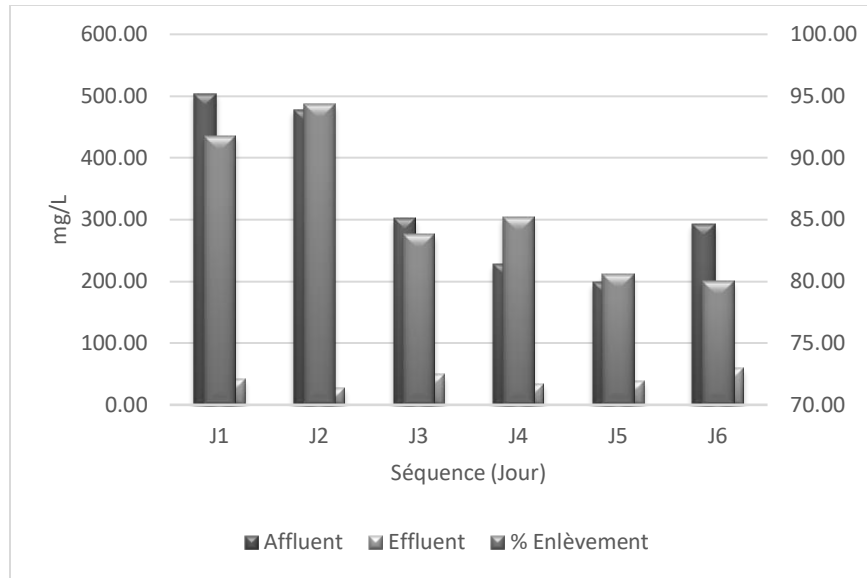


Figure 13 : Variation de la DCO lors du scénario 2 (50% ED + 50% EUB)

## 5.4 Traitement des eaux résiduaires correspondant au scénario 3

### 5.4.1 Suivi du pH

La Figure 14 montre que le pH est resté quasiment stable entre l'affluent et l'effluent. Une légère augmentation du pH a été observée aux jours J2 et J5, tandis qu'une légère diminution a été enregistrée aux jours J1, J3, J4 et J6, avec des variations un peu plus marquées aux jours J5 et J6.

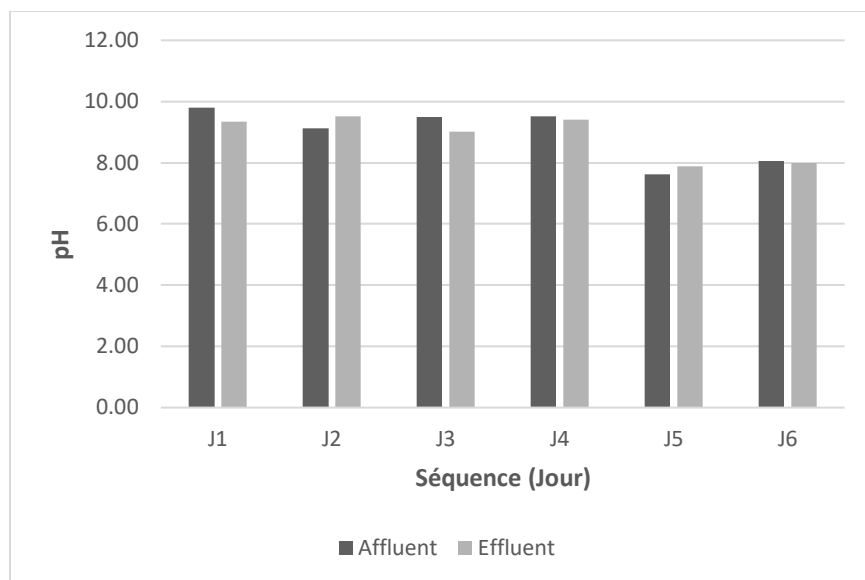


Figure 14 : Variation du pH lors du scénario 3 (25% ED + 75% EUB)

#### 5.4.2 Suivi de la turbidité

L'analyse des données de turbidité sur une période de six jours (Figure 15) révèle une performance constante du système de traitement. L'affluent présente une turbidité variante entre 69 et 162 UTN, alors qu'à la sortie du biofiltre, l'effluent affiche des valeurs résiduelles de turbidité relativement faibles comprises entre 3 et 7 UTN. Les taux d'élimination observés varient de 92% à 97%, indiquant une bonne capacité de traitement malgré les variations de la qualité de l'eau brute, cela témoigne de la robustesse et de la résilience du biofiltre.

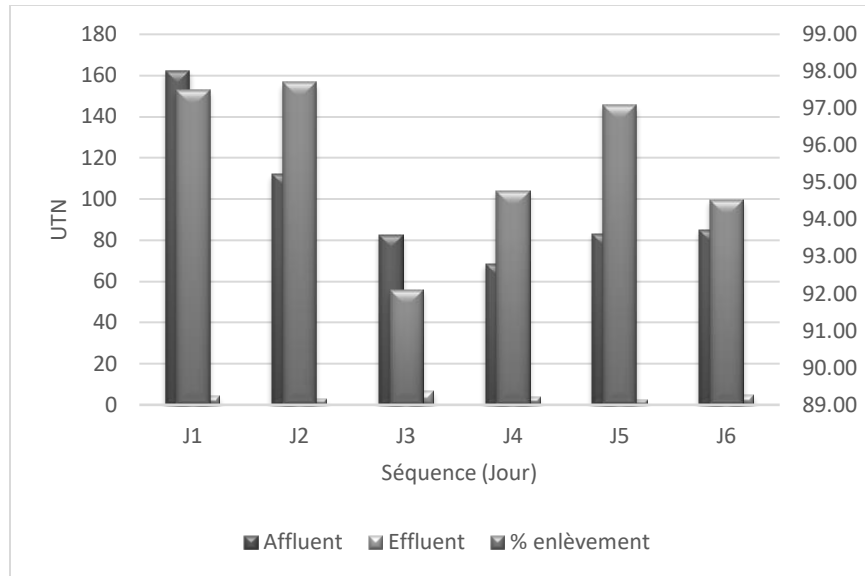


Figure 15 : Variation de la turbidité lors du scénario 3 (25% ED + 75% EUB)

### 5.4.3 Suivi des MES

L'affluent présente des concentrations de MES variant de 5 à 8 g/L (Figure 16). En revanche, l'effluent montre une constance remarquable, avec des concentrations de MES quasi-nulles. Cette différence marquée se traduit par un enlèvement total des MES, soulignant l'efficacité du biofiltre dans la filtration des eaux résiduaires issues d'un mélange 25% (v/v) EUD-dopée et 75%(v/v) EUD-brute.

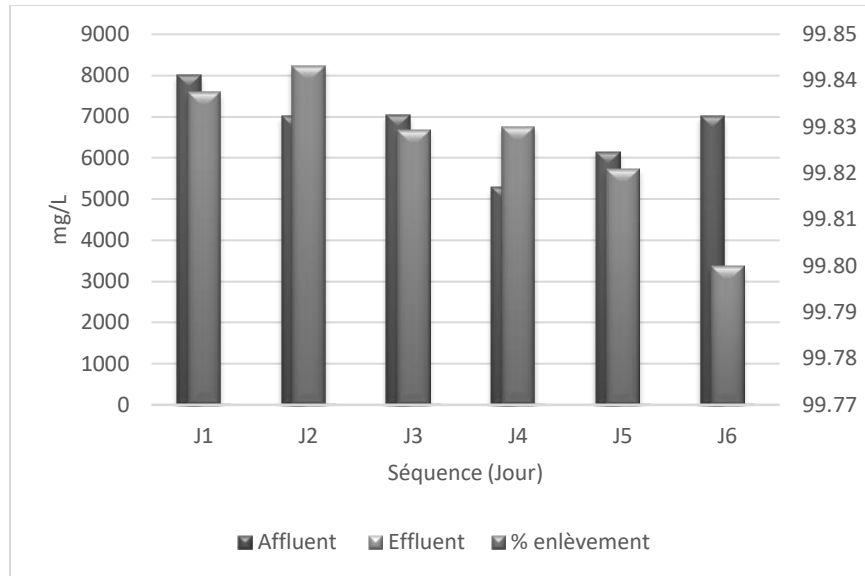


Figure 16 : Variation de MES lors du scénario 3 (25% ED + 75% EUB)

#### 5.4.4 Suivi de la DCO

L'analyse des résultats de la Figure 17, pour le scénario 3 sur six jours, révèle une performance globalement satisfaisante du système de traitement pour l'élimination de la DCO. L'affluent présente des concentrations de DCO fluctuantes (de 115 à 310 mg/L), tandis que l'effluent maintient des niveaux relativement stables (entre 27 et 43 mg/L). Les taux d'élimination varient de 70% à 89%, avec une efficacité particulièrement élevée durant les quatre premiers jours (>85%). Une baisse notable de l'efficacité est observée aux deux derniers jours (~70%), ce qui peut être attribué à une réduction de la charge organique entrante, ou à une variation de la nature de la matière organique, affectant ainsi l'activité microbienne du biofiltre.

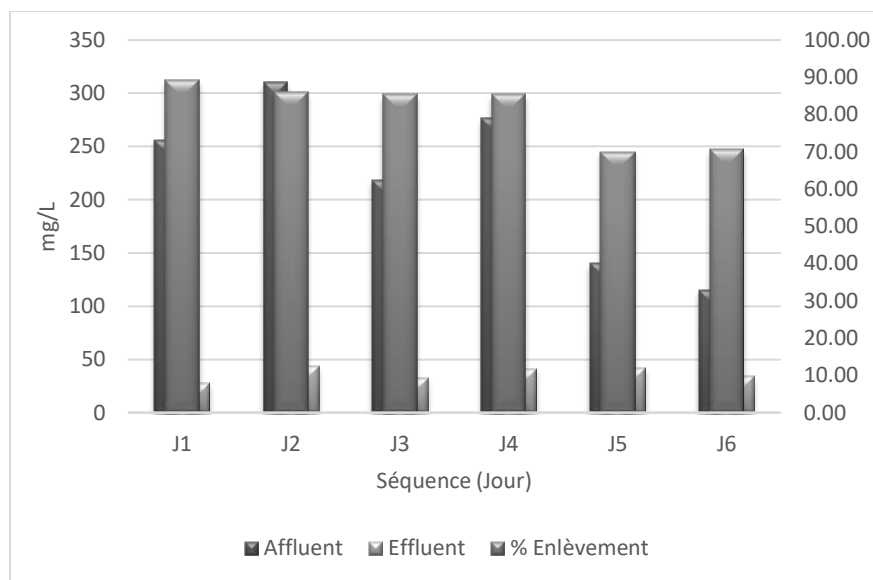


Figure 17 : Variation de la DCO lors du scénario 3 (25% ED + 75% EUB)

## 5.5 Évaluation des performances épuratoires du biofiltre lors du traitement des eaux usées domestiques sans ajout de substances biogéniques (scénario 4)

L'évaluation des performances épuratoires du biofiltre a été réalisée par une analyse comparative des concentrations de divers polluants, mesurées à l'entrée et à la sortie du dispositif. Les résultats exposés dans cette section illustrent l'évolution temporelle des concentrations en matière organique (DCO), en matières en suspension (MES) et en azote total (TN) observées aux points d'entrée et de sortie du biofiltre.

### 5.5.1 Évolution du pH

Les valeurs moyennes de pH des eaux usées brutes (à l'entrée et à la sortie) sont presque neutres. Ils sont respectivement de  $7,76 \pm 0,21$  et  $7,78 \pm 0,15$  (Figure 18). Ces valeurs restent proches de la neutralité et se situent dans les limites acceptables pour le rejet des eaux résiduaires dans le milieu naturel ( $5,5 < \text{pH} < 8,5$ ).

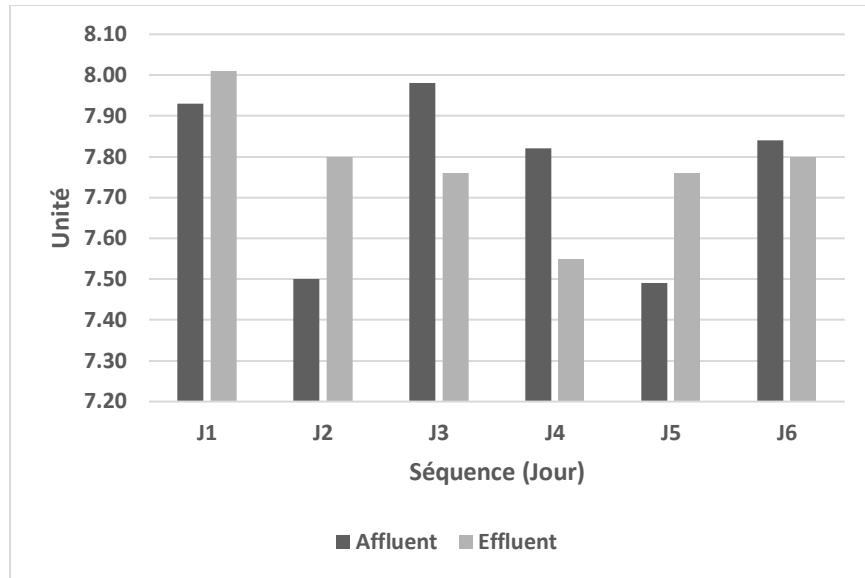


Figure 18 : Variation du pH lors du scénario 3 (0% ED + 100% EUB)

### 5.5.2 Évolution de la turbidité

Les turbidités mesurées à l'entrée et à la sortie du BIOF sont respectivement de  $83 \pm 8$  et  $5,0 \pm 0,7$  UTN (Figure 19). Le niveau de turbidité à la sortie respecte la recommandation de qualité pour les eaux traitées, inférieure à 5 UTN [51].

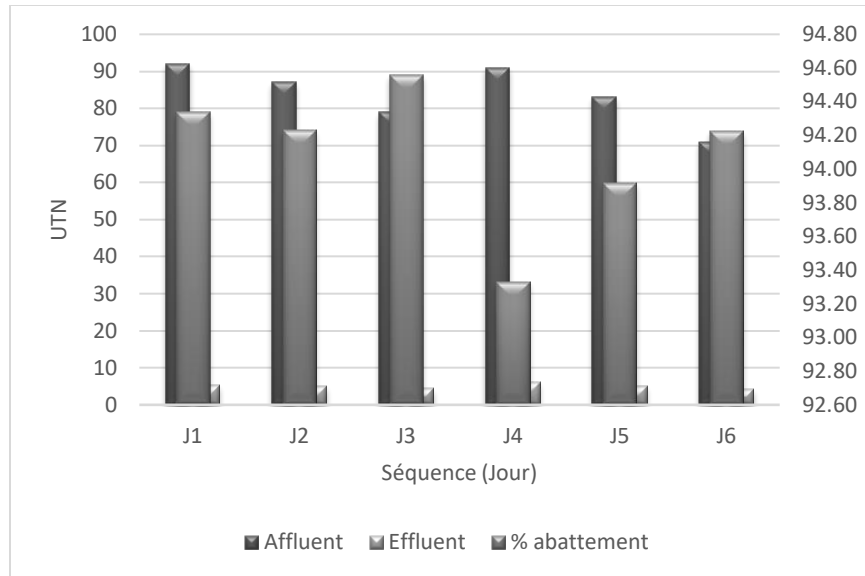


Figure 19 : Variation de la turbidité lors du scénario 4 (0% ED + 100% EUB)

### 5.5.3 Évolution des MES

Les concentrations moyennes des matières en suspension (MES) à l'entrée et à la sortie du BIOF sont respectivement de  $6\,385 \pm 1\,613$  et  $14,0 \pm 3,7$  mg/L (Figure 20). En se référant à la norme, la concentration résiduelle respecte la limite de rejet de 25 mg/L dans le milieu naturel [88].

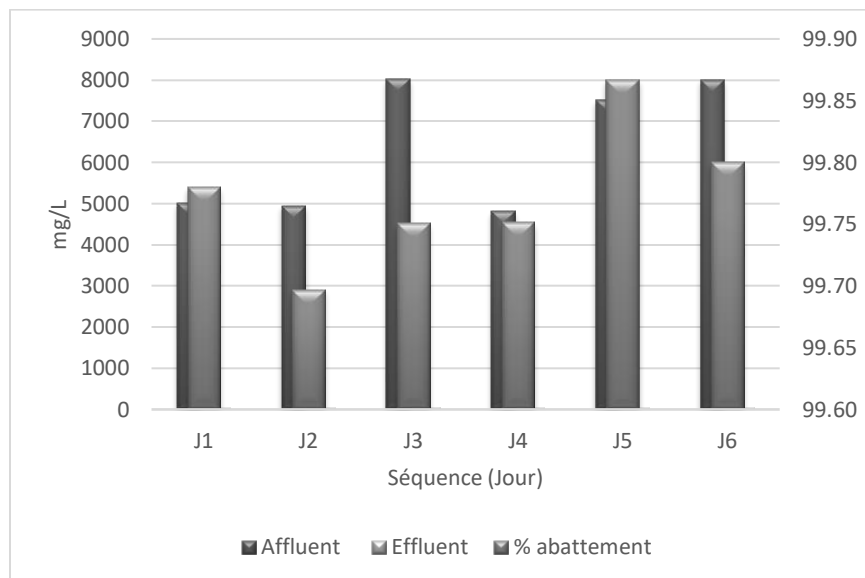


Figure 20 : Variation de MES lors du scénario 4 (0% ED + 100% EUB)

### 5.5.3.1 Évolution de la DCO

Les concentrations résiduelles de DCO à l'entrée et à la sortie du BIOF (Figure 21) sont respectivement de  $57 \pm 10$  mg/L à l'entrée et  $14 \pm 2$  mg/L à la sortie du biofiltre.

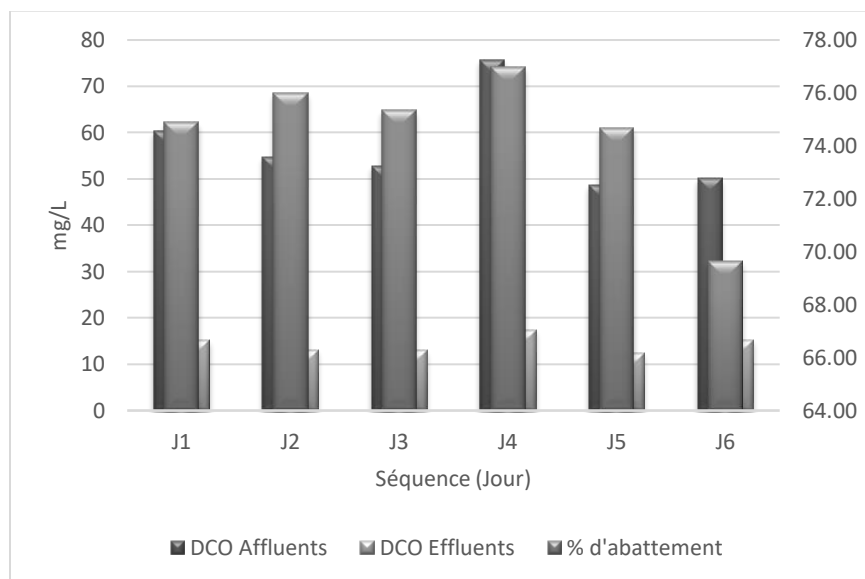


Figure 21 : Variation de la DCO lors du scénario 4 (0% ED + 100% EUB)

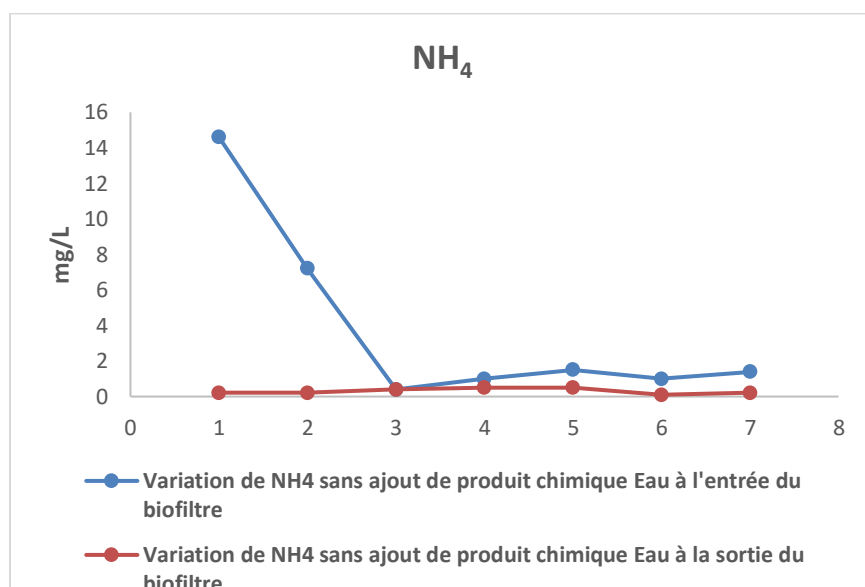


Figure 22 : Variation de l'azote ammoniacal au cours du temps à l'entrée et à la sortie du biofiltre

Les concentrations de  $\text{NH}_4$  à l'entrée du biofiltre varient entre 15 et 0,3 mg/L (Figure 22). À la sortie, les concentrations sont généralement inférieures 1 mg/L, et quasiment nulles aux 1<sup>er</sup>, 2<sup>ème</sup>, 6<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> jour de traitement. La nitrification est confirmée notamment les 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> jours, où les concentrations d'ammonium à l'entrée (15 et 7 mg  $\text{NH}_4/\text{L}$ ), sont réduites à des niveaux nuls à la sortie. La nitrification est assurée par des bactéries nitrifiantes aérobies (*Nitrosomonas* et *Nitrobacter*) qui convertissent  $\text{NH}_4^+$  en  $\text{NO}_2^-$  puis en  $\text{NO}_3^-$  en présence d'oxygène en présence d'oxygène [49-59-60].

Dans ce procédé de biofiltration aérobie, l'azote est éliminé et transformé selon quatre mécanismes principaux : 1) adsorption du cation  $\text{NH}_4^+$  sur le support filtrant, 2) assimilation biologique par les bactéries et les champignons pour produire de la biomasse, 3) volatilisation de  $\text{NH}_4^+$  en  $\text{NH}_3$  gazeux (lorsque le pH est supérieur à 7) par le haut du biofiltre, et 4) nitrification suivie de dénitrification effectuées par des bactéries spécialisées [61].

Le scénario 4 montre une bonne stabilité du pH entre l'affluent et l'effluent avec de légères fluctuations. Il présente cependant une plus grande variabilité dans l'abattement de la DCO par rapport aux scénarios précédents. Malgré cela, les performances restent excellentes en termes d'élimination des MES et de la turbidité, démontrant la robustesse du système.

#### 5.5.4 Évolution microbiologique

Les analyses microbiologiques ont porté sur la quantification des coliformes totaux et des coliformes thermotolérants (coliformes fécaux). La biofiltration a permis une élimination significative de ces indicateurs microbiens (Tableau 9).

- Avant traitement :
  - Coliformes fécaux : 60 000 UFC/100 mL;
  - Coliformes totaux : 800 000 UFC/100 mL.
- Après traitement :
  - Coliformes fécaux : 27 UFC/100 mL, soit un abattement de 3,3 unités logarithmiques;
  - Coliformes totaux : 3 300 UFC/100 mL, soit un abattement de 2,4 unités logarithmiques.

Ces résultats confirment l'efficacité du biofiltre dans la réduction de la charge microbiologique, rendant les eaux traitées conformes aux exigences sanitaires pour certains usages non potables.

**Tableau 9 : Résultats microbiologiques avant et après la biofiltration**

<b>Paramètres</b>	<b>Eau brute (UFC/100 mL)</b>	<b>Eau filtrée (UFC/100 mL)</b>	<b>Abattement (%)</b>
Coliformes totaux	800 000	3 300	99,59
Coliformes fécaux	60 000	27	99,96

La biofiltration se démontre être très performant dans l'élimination des germes microbiens.

### **5.6 Couplage du biofiltration (BIOF) et électrocoagulation (EC).**

Le couplage BIOF et EC constitue une avancée dans le domaine du traitement des eaux usées. La biofiltration, utilisée en première étape, permet une élimination des matières organiques grâce à l'action des microorganismes. Ce traitement biologique prépare efficacement les effluents pour les étapes de purification ultérieure.

En complément, l'électrocoagulation se révèle particulièrement efficace pour la précipitation des métaux lourds, l'élimination des phosphates et la clarification de l'eau. En appliquant un courant électrique sur des électrodes en fer, ce procédé provoque la coagulation des particules en suspension, facilitant leur sédimentation et leur élimination subséquente.

Les deux techniques sont donc complémentaires : la biofiltration assure un prétraitement biologique, tandis que l'électrocoagulation offre une purification physico-chimique supplémentaire. Ce couplage permet ainsi d'obtenir une eau répondant aux exigences environnementales et sanitaires, tout en optimisant l'efficacité énergétique et en réduisant les coûts opérationnels.

Le Tableau 10 présente les caractéristiques de l'effluent électrocoagulé après un traitement par biofiltration. Ce tableau résume les conditions expérimentales des essais d'électrocoagulation ainsi que les principaux résultats obtenus. Les pH finaux mesurés se situent entre 8,35 et 8,69, tandis que les tensions moyennes aux bornes des électrodes se situent entre 4,20 et 10,4 V. La consommation énergétique oscille entre 0,17 et 4,95 kWh/m<sup>3</sup>.

La concentration initiale en phosphore total (P<sub>t</sub>) dans l'effluent avant électrocoagulation était de 1,83 mg/L. L'application du procédé permet d'atteindre des concentrations résiduelles de P<sub>t</sub> allant de 0,07 mg/L à des concentrations en dessous de la limite de détection (0,02 mg/L), soit des taux d'élimination de phosphore supérieurs à 99%. Un temps de traitement de 5 min est suffisant pour

atteindre des concentrations résiduelles de  $P_t$  aussi faible que 0,04 mg/L. Les phosphates sont éliminés par coprécipitation avec les ions de ferreux ou ferriques selon les équations suivantes :

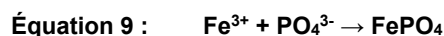
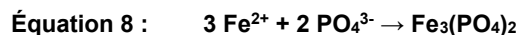


Tableau 10 : Traitement par électrocoagulation de l'effluent issu de la biofiltration : [Turbidité] = 2,70 UTN;  $[P_t] = 1.83 \text{ mg/L}$ ;  $[\text{pH}] = 7,75$

Paramètres	Temps électrolyse 5 min			Temps électrolyse 10 min			Temps électrolyse 20 min		
	0,2A	0,5A	0,7A	0,2A	0,5A	0,7A	0,2A	0,5A	0,7A
pH final	8,35	8,27	8,62	8,18	9,27	8,65	8,69	9,32	8,25
Tension (Volt) :	5,13	6,67	7,03	4,76	5,85	7,84	4,19	5,45	10,4
Volume traité (L) :	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Énergie (kWh/m <sup>3</sup> ) @ \$0,092 CAN/kWh	0,17	0,56	0,83	0,32	0,99	1,87	0,57	1,85	4,95
$P_t$ (mg/L) :	0,15	0,06	0,04	0,07	0,04	<LD	0,03	<LD	<LD
Abatt. $P_t$ (%) :	91,8	96,8	97,8	96,2	97,8	>98,9	98,4	>98,9	>98,9
Turbidité (UTN) :	0,37	0,41	0,43	0,42	0,39	0,72	0,59	0,58	0,65
Abatt. turb. (%) :	86,3	84,9	84,1	84,4	85,5	73,3	78,1	78,6	75,9

LD : limite de détection (0,02 mg/L).

La turbidité résiduelle a également été évaluée. L'électrocoagulation permet d'obtenir des turbidités comprises entre 0,37 et 0,65 UTN, comparées à une valeur initiale de 2,70 UTN.

## 5.7 Concentration en solides totaux

L'électrocoagulation utilisant des électrodes en fer génère des quantités notables de boues, résultant principalement de la précipitation des contaminants présents dans les eaux usées. Ces boues sont constituées de particules coagulées et floculées, issues de l'oxydation anodique du fer, formant des hydroxydes de fer qui adsorbent les impuretés. La quantité de boues générées dépend de plusieurs paramètres, tels que l'intensité du courant électrique appliqué, la durée du traitement, et la concentration initiale des polluants (Tableau 11). Typiquement, des intensités de 0,2 à 0,7 A et des temps de traitement variant entre 5 et 20 min produisent des volumes de boues proportionnels aux charges de contaminants éliminés.

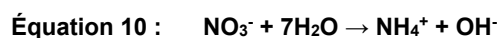
Ces boues, riches en métaux et autres substances adsorbées, nécessitent une gestion adéquate pour éviter des impacts environnementaux secondaires. Une maîtrise rigoureuse des conditions opératoires permet donc de contrôler à la fois l'efficacité du procédé et la quantité de boues générées, optimisant ainsi le processus global de traitement des eaux usées, [66].

**Tableau 11 : Quantité de boues (g/L) générées au cours des opérations**

Temps d'électrolyse								
5 min			10 min			20 min		
0,2A	0,5A	0,7A	0,2A	0,5A	0,7A	0,2A	0,5A	0,7A
1,03	1,17	1,18	1,09	1,27	1,37	1,47	2,25	2,29

### Nitrates

La réduction électrochimique des nitrates en ammonium lors de l'ÉC peut se résumer selon l'équation suivante :



Au cours de l'électrocoagulation, des réactions redox surviennent, entraînant une réduction partielle ou totale des nitrates (Tableau 12). Cette élimination, induite par le passage du courant, est d'autant plus efficace que l'intensité et la durée de l'électrolyse sont élevées. Ce phénomène s'accompagne de la libération d'hydrogène à la cathode en milieu aqueux [67-68]. Dans nos essais, nous avons réussi à éliminer plus de 75% des nitrates présents. L'électrocoagulation s'est révélée être une méthode efficace pour l'enlèvement de ces éléments nocifs. L'augmentation de l'énergie électrique et de la durée de traitement entraînent une production accrue de cations métalliques et d'ions hydroxydes, conformément à la loi de Faraday [69]. Par conséquent, la quantité d'hydroxydes de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  générée dans le milieu aqueux s'accroît [70]. Cette situation pourrait favoriser l'élimination des nitrates par adsorption ou par piégeage au cours de leur formation [71].

Tableau 12 : Variation des nitrates (mgL<sup>-1</sup>)

Eau Brute	Eau Dopée (25% EUD)	Eau Après BIOF	Temps de l'électrolyse								
			5 min			10 min			20 min		
			0,2A	0,5A	0,7A	0,2A	0,5A	0,7A	0,2A	0,5A	0,7A
0,06	0,08	174,7	53,2	50,1	46,7	50,6	47,4	47,6	47,2	42,2	45,6

### Matière en suspension après EC

L'électrocoagulation, technique de traitement des eaux usées de plus en plus prisée, se révèle être d'une efficacité remarquable pour l'abattement des matières en suspension (**Error! Reference source not found.**13). En effet, après mise en œuvre de ce procédé, nous avons constaté une réduction significative de ces particules, avec un taux d'abattement surpassant les 65% quoique déjà dans la marge après le BIOF.

Ce procédé consiste à faire passer un courant électrique à travers une cellule contenant l'eau à traiter. La réaction chimique qui en découle génère des précipités métalliques qui s'associent aux matières en suspension, facilitant ainsi leur séparation de l'eau.

L'ampleur de cette diminution, outrepassant les deux tiers, témoigne de l'efficacité de cette méthode pour assainir les eaux usées. Il est cependant impératif de noter que la réussite de ce procédé dépend de plusieurs facteurs, incluant la nature des électrodes utilisées, l'intensité du courant électrique appliqué, le pH de l'eau, et le temps de réaction.

Tableau 13 : Variation de MES (mg/L)

Eau Brute	Eau Dopée (25% EUD)	Eau Après BIOF	Temps de l'électrolyse								
			5 min			10 min			20 min		
			0,2A	0,5A	0,7A	0,2A	0,5A	0,7A	0,2A	0,5A	0,7A
6 385	6 745	14	6,0	5,2	3,6	5,2	5,2	4,8	4,0	2,8	4,8

### Phosphore

Une réduction significative de la concentration en phosphore total a également été constatée, avec un taux d'abattement supérieur à 98% (Tableau 14).

Le phosphore, couramment présent dans les eaux usées domestiques peut causer l'eutrophisation des plans d'eau. Par conséquent, son élimination efficace est l'un des objectifs principaux du traitement des eaux usées domestiques.

La technique d'électrocoagulation, qui consiste à appliquer un courant électrique à travers une cellule contenant l'eau à traiter, a doc permis de précipiter et séparer le phosphore de l'eau.

Cette réduction exceptionnelle du taux de phosphore total atteste de l'efficacité remarquable de l'électrocoagulations. Elle illustre la pertinence de cette technique pour le traitement des eaux usées domestiques, contribuant ainsi à la protection de l'environnement.

**Tableau 14 : Variation de phosphore (P<sub>t</sub>) (mg/L)**

Eau Brute	Eau Dopée (25% EUD)	Eau Après BIOF	Temps de l'électrolyse								
			5 min			10 min			20 min		
			0,2A	0,5A	0,7A	0,2A	0,5A	0,7A	0,2A	0,5A	0,7A
31,6	3,85	5,7	0,15	0,06	0,04	0,07	0,06	<0,02	0,03	0,02	<0,02



## 6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

---

### 6.1 Conclusions

Cette recherche a permis de concevoir et d'évaluer l'efficacité d'un procédé hybride combinant la biofiltration et l'électrocoagulation pour le traitement des eaux usées municipales ou domestiques contenant des polluants organique (DCO), inorganique ( $\text{NH}_4$  et Pt) et microbien (coliformes fécaux et totaux).

Deux unités de traitement ont été développées et testées :

- L'unité de biofiltration (BF) est constituée d'une colonne en PVC garnie de matériaux filtrants naturels (fibres et coques de noix de coco) servant de support à la biomasse épuratrice;
- L'unité d'électrocoagulation (EC) est une cellule parallélépipédique munie d'électrodes en acier doux.

Les essais réalisés avec l'unité de biofiltration ont mis en évidence les performances suivantes :

- Un taux moyen d'élimination de la DCO totale (DCOT) de  $75,4 \pm 20,0\%$ ;
- Un abattement moyen des matières en suspension (MES) de  $99,8 \pm 23,0\%$ ;
- Une réduction moyenne de la turbidité de  $94,0 \pm 8,8\%$ ;
- Une nitrification efficace, avec un taux d'élimination de l'azote ammoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) de  $86,8\% \pm 1,0\%$ , passant de  $44,8 \pm 6,2$  mg/L à l'entrée à  $5,90 \pm 0,10$  mg/L à la sortie.

Les tests menés sur l'unité d'électrocoagulation ont quant à eux montré :

- Un taux d'élimination du phosphore supérieur à 99%;
- Une capacité à éliminer simultanément plusieurs éléments comme : Aluminium (99,5%), Calcium (66,4%), Magnésium (95%), Soufre (99,0%), Cafeine (97,2%), Ibuprofène (99,4%).

En somme, cette étude démontre de manière rigoureuse et méthodique, l'efficacité du couplage biofiltration-électrocoagulation pour le traitement des eaux usées domestiques, en particulier dans des contextes isolés. Les résultats obtenus révèlent un abattement significatif de la demande chimique en oxygène (DCO) de plus de 75%, et une réduction quasi-totale des coliformes fécaux, atteignant 99,59% après la phase de biofiltration, mais également une

diminution substantielle du phosphore total, avoisinant les 98% grâce au processus d'électrocoagulation avec une intensité énergétique mesurée à 0,8 kWh/m<sup>3</sup>.

Ces performances illustrent la pertinence de ce couplage pour répondre aux exigences d'assainissement des habitats isolés. Elles ouvrent également la voie à de nouvelles recherches visant à optimiser et adapter ces procédés à différentes échelles et conditions d'exploitation, contribuant ainsi à la protection durable des ressources en eau.

## **6.2 Recommandations pour les travaux futurs**

Bien que les résultats soient très prometteurs, des travaux complémentaires sont nécessaires pour approfondir, valider et adapter ce procédé à différents contextes. Les recommandations suivantes sont proposées :

- Étudier l'impact de différentes charges hydrauliques, en testant des valeurs comprises entre 0,007 à 0,030 kg/m<sup>2</sup>/j, afin d'optimiser le fonctionnement du biofiltre;
- Réaliser des essais à long terme pour évaluer la stabilité, la durabilité et la robustesse du couplage BIOF-EC dans des conditions réelles;
- Tester diverses conditions opératoires en électrocoagulation, notamment différentes intensités de courant (0,3 à 1,5 A) et temps de traitement (5 à 20 minutes);
- Explorer l'utilisation d'autres types d'électrodes, telles que celles en fer (Fe) ou en magnésium (Mg), afin d'optimiser la performance et le coût du traitement;
- Évaluer l'efficacité du couplage BIOF-EC sur les micropolluants, notamment les résidus pharmaceutiques comme la carbamazépine (CBZ);
- Intégrer des systèmes d'alimentation solaire pour l'électrocoagulations, en vue de réduire la consommation énergétique et améliorer la durabilité du procédé;
- Réaliser des essais à plus de grande échelle afin de valider la performance du système sur des volumes d'eau plus importants et dans des conditions variées.

## 5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1]. Crites R., Tchobanoglous G. (1998) *Small and decentralized wastewater management systems*. WCB/McGraw-Hill, Boston, MA, 21 pages.
- [2]. Organisation Mondiale de la Santé (2013) *GLAAS 2012: analyse et évaluation mondiales de l'ONU-Eau sur l'assainissement et l'eau potable, le défi: l'extension et le maintien des services*. Organisation Mondiale de la Santé.
- [3]. Mortula M.M. (2006) *Phosphorus removal from small-scale wastewater applications using alum sludge*. Thèse de doctorat, Université Dalhousie, Halifax, NÉ, Canada, 197 pages.
- [4]. Dia O., Drogui P., Buelna G., Dubé R. (2016) Coupling biofiltration process and electrocoagulation using magnesium-based anode for the treatment of landfill leachate. *Journal of Environmental Management* 181, 477-483.
- [5]. Mann R.A. (1990) Phosphorus removal by constructed wetlands: substratum adsorption. Dans: *Constructed wetlands in water pollution control*. Pergamon Press, pp. 97-105.
- [6]. Mostafazadeh A.K., Benguit A.T., Carabin A., Drogui P., Brien E. (2019) Development of combined membrane filtration, electrochemical technologies, and adsorption processes for treatment and reuse of laundry wastewater and removal of nonylphenol ethoxylates as surfactants. *Journal of Water Process Engineering* 28 (Avril), 277-292.
- [7]. Drogui P., Tran N. (2010) *Evaluation of an electrocoagulation pilot unit combined with filtration processes for dephosphatation and treatment of municipal and industrial effluent*. Rapport de recherche et développement No. R1201, INRS, Centre Eau Terre Environnement, Québec, QC, Canada.
- [8]. Dia O., Drogui P., Buelna G., Dubé R. (2018) Hybrid process, electrocoagulation biofiltration for landfill leachate treatment. *Waste Management* 75 (Mai), 391-399.
- [9]. Garzon-Zuniga M., Lessard P., Buelna G. (2005) Nitrogen elimination mechanisms in an aerated peat biofilter treating and pig manure. *Environmental Technology* 26, 361-371.

- [10]. Buelna G., Dubé R., Turgeon R. (2008) Pig manure treatment by organic bed biofiltration. *Desalination* 231, 297-304.
- [11]. Garzon-Zuniga M., Lessard P., Buelna G. (2005) Nitrogen elimination mechanisms in an aerated peat biofilter treating and pig manure. *Environmental Technology* 26, 361-371.
- [12]. Lafrance C., Lessard P., Buelna G. (1996) Évaluation de la filtration sur tourbe et compost pour le traitement de l'effluent d'une usine de compostage de résidus verts. *Canadian Journal of Civil Engineering* 23, 1041-1050.
- [13]. Evens E., Paul V. (2002) Gestion intégrée de l'eau en Haïti. Actes du Colloque International réalisé à Port-au-Prince, Hal-02470062, (pp. 156-158, 183, 185, 188, 202, 203, 207, 219, 235).
- [14]. Blanic R., Benneton, J.P. (1989) Caractérisation d'effluents d'assainissement individuel et essai de matériels d'assainissement autonome. TSM. *Techniques sciences méthodes, génie urbain génie rural* 11, 573-584.
- [15]. Rouhart J. (1986) L'épuration des eaux usées domestiques. *Tribune du CEBEDEAU* 39(513-514), 1-54.
- [16]. Cuyper K., Loutz S. (1992) Les caractéristiques des eaux usées domestiques: le traitement individuel vu par les professionnels de la construction. *Les filières traditionnelles d'assainissement individuel. La Tribune de l'eau* 45(560), 7-19.
- [17] Mouhamed E.S., Kallel, P.M. (2023) *Traitement des eaux usées*. Rapport de projet de fin d'année, Université de Sfax, Tunisie, 51 pages.
- [18]. Berbia I., Maarif I. (2023) *Conception d'une station d'épuration pour la zone industrielle de Bounoura-Ghardaïa*. Thèse de doctorat, Université Kasdi-Merbah, Ouargla, Algérie.
- [19]. Daghri R. (2010) *Développement d'un procédé hybride d'oxydation électrolytique et d'électrocoagulation pour le traitement des eaux usées non connectées à des infrastructures communautaires*. Thèse de doctorat, INRS, Centre Eau Terre Environnement, Québec, QC, Canada.
- [20]. Gandois L. (2009) *Dynamique et bilan des éléments traces métalliques (ETM) dans des écosystèmes forestiers français. Modélisation, spéciation et charges*

- critiques*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III, Toulouse, France.
- [21]. El Mrissani S. (2023) *Dynamique des éléments traces métalliques et des terres rares dans les phases dissoutes et sédimentaires du bassin versant du Sebou (Maroc)*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, Université Ibn Tofail, Faculté des sciences de Kénitra, Kénitra, Maroc.
- [22]. Dupont, J. (2023) *Le souffle polymétallique de la fonderie Horne: caractérisation des dépôts atmosphériques à l'aide d'approches passives et de biosurveillance*. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal, Montréal, QC, Canada.
- [23]. Medjahed G., Mechti S. (2024) *Contribution à l'étude de la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau de source de Sebain–Wilaya de Tiaret*. Thèse de doctorat, Université ibn khaldoun-Tiaret, Tiaret, Algérie.
- [24]. Maurice N. (2022) *Les zones de rejet végétalisées de grande taille : Observation et modélisation*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, Nancy, France.
- [25]. Dash, A. K. (2013). Characterization of domestic wastewater at Bhubaneswar, Odisha, India. *Development*, 25, 27.
- [26]. Widyarani, Wulan, D. R., Hamidah, U., Komarulzaman, A., Rosmalina, R. T., & Sintawardani, N. (2022). Domestic wastewater in Indonesia: generation, characteristics and treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(22), 32397-32414.
- [27]. Gbekley, E. H., Komi, K., Houedakor, K. Z., Poli, S., Kpoezou, K., Adjalo, D. K., ... & Adjoussi, P. (2023). The physico-chemical and bacteriological characterization of domestic wastewater in Adétikopé (Togo, West Africa). *Sustainability*, 15(18), 13787.
- [28]. Idrissi, Y. A., Alemad, A., Aboubaker, S., Daifi, H., Elkharrim, K., & Belghyti, D. (2015). Caractérisation physico-chimique des eaux usées de la ville d'Azilal-Maroc-/[Physico-chemical characterization of wastewater from Azilal city-Morocco-]. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 11(3), 556.

- [29]. Abouelouafa, M., El Halouani, H., Kharboua, M., & Berrichi, A. (2002). Caractérisation physico-chimique et bactériologique des eaux usées brutes de la ville d'Oujda: canal principal et Oued Bounaïm. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 22(3), 143-15.
- [30]. Amiri, K. (2017). Caractérisation des eaux usées des rejets domestiques de la ville de Touggourt (Algérie). *Journal Algérien des Régions Arides*, 12(2), 10108.
- [31]. Mouni, L., Merabet, D., Arkoub, H., & Moussaceb, K. (2009). Etude et caractérisation physico-chimique des eaux de l'oued Soummam (Algérie). *Sécheresse*, 20(4), 360-366.
- [32]. Breton A. (2013) *Potentialité de la biomasse végétale pour le traitement des eaux usées domestiques: Développement d'un procédé de biofiltration pour l'assainissement non collectif*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, Toulouse, France.
- [33]. Maisons-Alfort (2015) *Analyse des risques sanitaires liés à la réutilisation d'eaux grises pour des usages domestiques*. Agence Nationale de la Sécurité Sanitaire Alimentation Environnement Travail, 4 pages.
- [34]. Daghrir R. (2021) Procédés électrolytiques hybrides pour le traitement et le recyclage des eaux grises. *Vecteur Environnement* 54(3), 40-44.
- [35]. Hassine K., Hamza R. (2004) *Les risques liés aux éléments biologiques et minéraux des eaux usées urbaines*. Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Ile de France, Saint-Denis, France.
- [36]. Saoud A., Khediri F.S. (2020) *Traitement et recyclage des eaux usées de la commune de Tipaza*. Thèse de doctorat, Université Larbi Tebessi, Tébessa, Algérie.
- [37]. Karima L., Fatma Zohra M. (2024) *Synthèse bibliographique de traitement des eaux usées par des microalgae dans le sud algérien*. Université Kasdi-Merbah, Ouargla, Algérie.

- [38]. Renou S. (2006) *Analyse de cycle de vie appliquée aux systèmes de traitement des eaux usées*. Institut National Polytechnique de Lorraine, Thèse de doctorat, Nancy, France, 258 pages.
- [39]. Lamoureux, C. (2007) *Design écologique pour le traitement des eaux usées dans les petites collectivités nordiques et isolées: le cas d'une communauté crie de la région de la Baie James*. Mémoire de maîtrise, Université de Montréal, Montréal, QC, Canada, 240 pages.
- [40]. Younes, Y. (2024) *Réutilisation des eaux usées épurées: Cas de la STEP de Temacine*. Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbax, Ouargla, Algérie.
- [41]. Environnement et lutte contre les changements climatiques (Q-2. R. 32) (2019) Info matières dangereuses résiduelles.  
<https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/en/document/cr/Q-2,%20r.%2032/20190613?langCont=fr>
- [42]. Daghbir R. (2010) *Développement d'un procédé hybride d'oxydation électrolytique et d'électrocoagulation pour le traitement des eaux usées non connectées à des infrastructures communautaires*. Thèse de doctorat, INRS, Centre Eau Terre Environnement, Québec, QC, Canada. Répétition de la référence 17 ???.
- [43]. Institut National de Santé Publique du Québec (2008) *Portrait québécois et évaluation du risque à la santé de la réutilisation des eaux usées domestiques traitées pour l'irrigation de grandes surfaces gazonnées*. INSPQ, Québec, QC, Canada, 5 pages.
- [44]. Alnasouri M. (2010) *Étude du développement de biofilms dans des réacteurs de traitement d'eau*. Thèse de doctorat, RP2E - Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie des Ressources, Procédés, Produits, Environnement, Université de Nancy, France, 179 pages.
- [45]. Volcke, E. I., Solon, K., Comeau, Y., & Henze, M. (2020). Wastewater characteristics. *Biological wastewater treatment: principles, modelling and design*, 2nd edn. IWA publishing, London, 77-110.

- [45]. Sow, A. (2018) La problématique de la gestion des eaux usées domestiques dans la commune de Bignona: le cas des quartiers de Bassène et Manguiline. Mémoire de Master II, Université Assane Seck de Ziguinchor(UASZ), Sénégal.
- [47]. USAID (2021) Expérience en assainissement en Haïti. [https://pdf.usaid.gov/pdf\\_docs/PA00ZG6C.pdf](https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PA00ZG6C.pdf).
- [48]. Environnement, lutte contre les changements climatiques, faune et parcs du Québec (2023). Exigences générales pour les projets de traitement d'eaux usées d'origine domestique, p 3.
- [49]. El Amri H. (2024) *Traitement de stabilisation et de conditionnement électrolytique des boues de fosses septiques*. Mémoire de maîtrise, INRS, Centre Eau Terre Environnement, Québec, QC, Canada.
- [50]. Dia O., Drogui P., Dubé R., Buelna G. (2016) Utilisation des procédés électrochimiques et leurs combinaisons avec les procédés biologiques pour le traitement des lixiviats de sites d'enfouissement sanitaires-revue de littérature. *Revue des Sciences de l'Eau* 29(1), 63-89.
- [51]. Sanni I.B.O. (2018) *Combinaison des procédés d'électrocoagulation et d'électro-oxydation pour le traitement des eaux usées résiduelles issues des opérations de nettoyage de cuves industrielles*. Mémoire de maîtrise, INRS, Centre Eau Terre Environnement, Québec, QC, Canada.
- [52]. Narayanan N.V., Ganesan M. (2009) Use of adsorption using granular activated carbon (GAC) for the enhancement of removal of chromium from synthetic wastewater by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials* 161(1), 575-580.
- [53]. Brouard N. (1992) *Enlèvement des matières en suspension et évolution des pertes de charge en biofiltration des eaux usées domestiques: Application sur lit ruissellant*. Mémoire de maîtrise, INRS, Centre Eau Terre Environnement, Québec, QC, Canada.
- [54]. Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and purification Technology*, 38(1), 11-41.

- [55]. Bove P. (2018) *Neutralisation d'un effluent de filtre à scories pour l'épuration des eaux usées*. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique, Montréal, QC, Canada.
- [56]. Diallo M.K. (2011) *Infiltration-percolation sur sable et sur fibre de coco, filtres plantes et épuration d'eaux usées domestiques à dominance agroalimentaire sous climat tropical sec: cas des eaux résiduaires urbaines de Ouagadougou, Burkina Faso*. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard-Lyon I; Université Joseph Ki-Zerbo, Ouagadougou, Burkina Faso.
- [57]. Aiache Nassima Z.S. (2017) *Matériaux innovants: propriétés et utilisation*. Mémoire de maîtrise, Université 8 mai 1945, Guelma, Algérie.
- [58]. Khaled J.B. (2016) *Couplage de la dénitrification autotrophe sur soufre aux systèmes de traitement biologique des eaux usées domestiques applicables au secteur de l'assainissement décentralisé*. Thèse de doctorat, INRS, Centre Eau Terre Environnement, Québec, QC, Canada.
- [59]. Djafer A. (2014) *Traitement biologique des eaux usées. Étude statique et dynamique*. Thèse de doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem, Algérie.
- [60]. Frat L. (2020) *Caractérisation des eaux usées d'un réseau d'assainissement pour un diagnostic des pollutions en amont des stations d'épuration: de l'analyse physico-chimique au développement d'un nouveau bioessai toxicologique*. Thèse de doctorat, Institut agronomique, vétérinaire et forestier de France, Paris, France.
- [61]. Premier Tech Aqua (2023) *Filtres à fragments de coco pour le petit collectif*. Premier Tech Eau et Environnement, Version 2, 7 pages.  
[https://www.premiertechaqua.com/sites/ptwe/files/prospace/ECOFLO\\_La-filtration-par-fragments-de-coco.pdf](https://www.premiertechaqua.com/sites/ptwe/files/prospace/ECOFLO_La-filtration-par-fragments-de-coco.pdf).
- [62]. Kone M., Comte G., Somé M., Zongo I., Joly P. (2015) Performances comparées du sable et du substrat de coco en traitement d'eaux résiduaires urbaines. *Scientific Study and Research: Chemistry and Chemical Engineering Biotechnology Food Industry* 16(1), 1-12.

- [63]. Pichon R. (2023) *Exploration des composants actifs de la noix de coco (Cocos nucifera) «Tumu ha'ari» en tant qu'agent thérapeutique potentiel: évaluation de leurs propriétés pharmaceutiques et de leur impact sur la société humaine*. Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille, France.
- [64]. Turcotte V. (2009) *Utilisation d'écaillés de cacao comme matériau support pour la biofiltration d'effluents agroalimentaires*. Mémoire de maîtrise, INRS, Centre Eau Terre Environnement, Québec, QC, Canada.
- [65]. Dubé R. (1996) *Traitement du lisier de porc par biofiltration aérée et passive sur milieu organique*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, QC, Canada.
- [66]. Moundji, S. (2024). Recyclage des déchets: un enjeu stratégique du développement durable et leur impact sur le milieu naturel.
- [68]. Kabdaşlı I., Arslan-Alaton I., Ölmez-Hancı T., Tünay O. (2012) Electrocoagulation applications for industrial wastewaters: a critical review. *Environmental Technology Reviews* 1, 2–45, <https://doi.org/10.1080/21622515.2012.715390>.
- [68]. Moussa D.T., El-Naas M.H., Nasser M., Al-Marri M.J. (2017) A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: potentials and challenges. *Journal of Environmental Management* 186, 24–41, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.032>.
- [69]. Rezaee A., Hossini H., Masoumbeigi H., Soltani R.D.C. (2011) Simultaneous removal of hexavalent chromium and nitrate from wastewater using electrocoagulation method. *International Journal of Environmental Science Development* 2, 294–298, <https://doi.org/10.7763/ijesd.2011.v2.140>.
- [70]. El-Shazly A.H., Al-Zahrani A.A., Al-Shahrani S.S. (2011) Improvement of NO<sub>3</sub>-removal from wastewater by using batch electrocoagulation unit with vertical monopolar aluminum electrodes. *International Journal of Electrochemical Science* 6, 4141–4149.
- [71]. Amarine M., Lekhlif B., Sinan M., El Rharras A., Echaabi J. (2020) Treatment of nitrate-rich groundwater using electrocoagulation with aluminum anodes.

Groundwater Sustainable Development 11, 100371,  
<https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100371>.