



Département de Génie de l'Eau

Rapport de soutenance

En vue de l'obtention du diplôme
de Master Professionnel en :
Génie de l'eau

Thème :

Traitement des lixiviats par le procédé d'électrocoagulation

Réalisé par :

M^{elle} HADDAR Yasmine

Encadré par :

M^{me} SIFOUN Naima

MCB/Institut de Technologie, Bouira

Soutenu devant le jury :

Examinatrice : M^{me} HAMZAOUI Sara

MCB/Institut de Technologie, Bouira

Présidente de jury : M^{me} DAIRI Nassima

MCB/Institut de Technologie, Bouira

Remerciements

Avant tout je remercier **ALLAH** tout puissant d'avoir donné la force et le courage pour surmonter toutes les difficultés rencontrées durant cette année.

J'exprimerai profonde gratitude à **Madame SIFOUN** pour son encadrement, sa patience, sa gentillesse et son confiance tout au long de la réalisation de ce modeste travail, ainsi que ses précieux conseils et son soutien qu'elle m'a donné.

Mes remerciements vont également aux membres de jury d'avoir acceptés de participer à nos jurys.

Mes remerciements vont également à **Madame HOURIA** pour son aide pratique et son soutien morale, ses encouragements, ainsi sa grande patience.

Mes remerciements s'adressent également à tous nos professeurs de **l'Institut de Technologie, de Bouira** pour leurs générosités.

Un merci spécial à ma famille et amis pour leurs encouragements.

Enfin, je remercier toutes les personnes de près ou de loin qui ont contribué à la réalisation de ce projet de fin d'études, que ce soit à travers des conseils ou par leurs présences.

Dédicaces

Merci à notre bon Dieu, notre guide, notre force, notre bonheur, et la raison de notre existante. C'est lui qui nous a fait comprendre le but de cette vie, et qui nous a donné le pouvoir d'apprécier les choses. Merci d'être là dans les moments les plus difficiles.

A mon cher père,

Merci d'être là pour moi, de m'avoir montré le chemin, de croire en moi et de m'encourager à faire de mon mieux. Ce travail est le résultat de l'esprit de sacrifice dont vous avez fait preuve, de l'encouragement et le soutien. Que Dieu vous préserve pour moi et vous protège de tout mal.

À ma chère maman

Celle qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation et de ses dévouements, Merci pour Ton amour inconditionnel, ta force et ton soutien celle qui m'as toujours encouragée à poursuivre mes rêves. Qu'ALLAH te protège et te donne la santé, le bonheur et longue vie.

Sœurs et frère

Je tiens aussi à remercier mes sœurs ; **Ibtissam** et **Ryma**, mon petit frère **Ahmed**, qui sont mon bonheur, Je vous aime de plus profond de mon cœur. Que Dieu veille sur vous.

A mes cousines d'amour chacune a son nom ; aucun langage ne saurait exprimer mon respect et ma considération pour votre soutien et encouragement. Que Dieu vous garde et vous procure santé et bonheur.

A mes très chères copines : Melyssa et **Sarah**; vous êtes pour moi des sœurs du cœur, plus que des amies. Merci pour votre positivité, votre soutien et votre aide dans les moments durs. Je vous souhaite un avenir plein de joie et de prospérité.

A tous les étudiants et toutes les employées de l'institut de technologie Bouira, ainsi que celles et ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réussite de mes études.

Résumé

Résumé

Une analyse approfondie des propriétés des lixiviats met en évidence leur fort potentiel de pollution et les risques associés pour l'environnement et la santé publique. Dans ce contexte, l'adoption de technologies telles que l'électrocoagulation basées sur des processus électrochimiques avancés est devenue une solution efficace pour l'élimination des polluants tels que les métaux lourds et les matières organiques. Ce travail présente une synthèse bibliographique sur les propriétés et risques environnementaux des lixiviats de décharge publique, ainsi les différents travaux réalisés pour leur traitement en s'accentuant sur le traitement par électrocoagulation.

Mots clés : Décharge publique, lixiviat, prévention de l'environnement, électrocoagulation.

Abstract

A comprehensive analysis of leachate properties highlights their high pollution potential and the associated risks to the environment and public health. In this context, the adoption of technologies such as electrocoagulation, based on advanced electrochemical processes, has emerged as an effective solution for the removal of pollutants such as heavy metals and organic matter. This work presents a bibliographic review of the properties and environmental risks of public landfill leachates, as well as various studies conducted on their treatment, with a focus on electrocoagulation treatment.

Keywords: Public landfill, leachate, environmental protection, electrocoagulation.

ملخص

تحليل متعمق لخصائص العصارة يُبرز إمكاناتها العالية للتلوث والمخاطر المرتبطة بها على البيئة والصحة العامة. في هذا السياق، أصبح اعتماد تقنيات مثل التخثير الكهربائي، القائمة على عمليات كهروكيميائية متقدمة، حلاً فعالاً لإزالة الملوثات مثل المعادن الثقيلة والمواد العضوية. يقدم هذا العمل مراجعة أدبية لخصائص ومخاطر العصارة الناتجة عن مكبات النفايات العامة على البيئة، بالإضافة إلى مختلف الدراسات التي أُجريت لمعالجتها، مع التركيز على المعالجة باستخدام التخثير الكهربائي.

الكلمات المفتاحية: مكب نفايات عام، عصارة، حماية البيئة، التخثير الكهربائي.

Table de matière

Introduction générale.....	1
I. Introduction.....	3
II. Généralités sur les lixiviats.....	3
II.1. Centre d'enfouissement technique (CET).....	3
II.1.1. Définition des lixiviats.....	4
II.1.2. Composition des lixiviats.....	5
II.1.3. Types des lixiviats.....	6
II.1.4. Répercussion des lixiviats sur l'environnement et la santé humaine.....	7
a. Pollution par les métaux lourds.....	7
b. Pollution par les microorganismes.....	7
c. Pollution hydrique.....	7
II.1.5. Paramètres influant sur les lixiviats.....	7
III. Conclusion.....	8
I. Introduction.....	9
II. Traitement des lixiviats de décharge d'Oued Smar, Alger.....	9
III. Traitement des Lixiviats à la décharge de Tlemcen.....	9
IV. Traitement de lixiviat de la décharge de Jebel Chakir.....	10
V. Traitement des lixiviats de CET de Corso.....	10
VI. Traitement par coagulation-floculation des lixiviats du CET d'Ouled Fayet.....	12
VII. Traitement des lixiviats du CET d'Ouled Fayet par la combinaison des Procédés : boues activée et oxydation Fenton.....	12
VIII. Etude des lixiviats générés des CET Khelil, BBA et Hamici.....	13
IX. Traitement de lixiviats de CET de Cantabria, Espagne.....	14
X. Décharge de Northwood, Royaume-Uni	
XI. Décharge de Hammarby Sjöstad, Stockholm, Suède.....	15
XII. Traitement des lixiviats de CET de Staouali.....	16

Table de matière

XIII. Conclusion.....	16
I. Introduction.....	17
II. Généralités sur l'électrocoagulation.....	17
II.1. Définition.....	17
II.2. Origine et développement de l'Électrocoagulation (EC).....	18
II.3. Mécanismes réactionnels de l'électrocoagulation.....	19
II.4. Principe d'électrocoagulation.....	20
II.5. Mode de connexion des électrodes.....	21
II.6. Passivation des électrodes.....	22
II.7. Facteurs influant l'électrocoagulation.....	23
II.7.1. Effet de la conductivité.....	23
II.7.2. Effet de la température.....	24
II.7.3. Effet du pH.....	24
II.7.4. Effet de la distance entre les électrodes.....	24
II.7.5. Effet de la densité du courant.....	25
II.7.6. Effet du temps d'électrolyse.....	25
a. Composition des électrodes.....	25
II.8. Applications variées de l'électrocoagulation en traitement des eaux.....	27
II.9. Bénéfices et désavantages.....	28
II.9.1. Bénéfices.....	Erreur ! Signet non défini.
II.9.2. Désavantages.....	29
III. Application de l'électrocoagulation pour le traitement des lixiviats.....	30
III.1. Traitement des lixiviats de la décharge publique contrôlée de la ville de FES (MAROC).....	30
III.3. Traitement des lixiviats du CET de Ouled Fayet.....	32
III.4. Traitement du lixiviat issu de la décharge publique d'Oued Samar.....	33
III.5. Traitement des lixiviats par les anodes hybrides.....	33
IV. Conclusion.....	34
Conclusion générale.....	35

Nomenclature

CET : Centre d'Enfouissement Technique

mg : Milligramme

L : Litre

cm : Centimètre

μ S : micro -siemens

pH : potentiel hydrogéné.

°C : degré Celsius

Cl : Chlore

CO₂ : Dioxyde de Carbone.

% : Pourcentage

FeCl₃ : Chlorure ferrique

Al₂(SO₄)₃ : Sulfate d'aluminium

Na₂SO₄ : Sulfate de sodium

NaCl : Chlorure de sodium

ml : Millilitre

trs : Tours

min : Minute

kg/m³ : Kilogramme par mètre cube

FeSO₄:Sulfate ferreux

EC : Électrocoagulation

TDS : Taux de solides dissous

TAC : Taux alcalimétrique complet

MES : Matières en suspensions

COT : Carbone organique total

DBO : Demande biologique en oxygène

DCO : Demande chimique en oxygène

ABS : Coloration liée à l'absorbance de l'effluent

Fe : Fer

Al : Aluminium

Nomenclature

H_2 : Hydrogène

DBO_5 : Demande biochimique en oxygène pendant cinq jours

Red : Réducteur

Ox : Oxydant

U : La tension thermodynamique (obtenue par la relation de Nernst)

R : La résistance de la cellule

I : L'intensité

U' : La tension à appliquer

S : Spéciaux

EC : Electrocoagulation

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1: Centre d'enfouissement techniques	4
Figure I.2: Lixiviat brut.....	5
Figure I.3: Lixiviat de bassin de décantation	5

Chapitre II

Figure II.1: Réacteur photochimique	10
Figure II.2: Dispositif de bioréacteur utilisé	11
Figure II.3: Installation de traitement biologique utilisé.....	13
Figure II.4: Évolution du rendement d'abattement de la DCO pour chaque CET.....	14
Figure II.5: Lixiviats après traitement par électro-fenton.....	15
Figure II.6: Lixiviat avant et après traitement.....	15

Chapitre III

Figure III.1: Schéma d'une cellule d'électro-coagulation (deux électrodes).....	21
Figure III.2: Trois modes de connexion distincts dans une cellule d'électrodialyse.....	22
Figure III.3: Dégradation des électrodes après traitement par l'électrocoagulation.....	24
Figure III.4: Plaques en aluminium pure	27
Figure III.5: Les floccs produits par l'EC.....	31
Figure III.6: Couleur des lixiviats avant et après EC.....	33
Figure III.7: Etat d'électrode avant et après EC	32
Figure III.8: Efficacité du traitement par EC	34
Figure III.9: Dispositif utilisé	35

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1: Classification des lixiviats selon l'âge de la décharge.....	6
--	---

Chapitre II

Tableau II.1: Caractéristiques de lixiviats avant et après le traitement	12
---	----

Chapitre III

Tableau III.1: Quelques exemples illustratifs sur le traitement par EC.....	18
--	----

Tableau III.2: Résultats de quelques études faites sur l'EC des lixiviats de CET.....	28
--	----

Tableau III.3: Concentrations des éléments métalliques dans le lixiviat brut et traité par électrocoagulation.....	31
---	----

Tableau III.4: Caractéristiques du lixiviat avant et après traitement.....	32
---	----

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

La gestion des lixiviats provenant des décharges publiques ou les centres d'enfouissement constitue un défi environnemental majeur en Algérie, tout comme dans de nombreux autres pays. Ces liquides troubles noirs, jaunes ou rouges, qui se forment lorsque l'eau percole à travers les déchets des décharges publique, sont chargés de polluants divers susceptibles de contaminer les sols et les ressources en eau et dégagent aussi une forte odeur probablement due aux substances azotées et soufrées présents d'origine dans les déchets municipaux [1].

La nécessité de traiter efficacement les lixiviats est donc essentielle pour prévenir les dommages environnementaux et protéger la santé publique. L'électrocoagulation est une nouvelle méthode de traitement des eaux usées. Au cours de cette dernière décennie, cette méthode a été appliquée pour le traitement de différents effluents industriels avec une efficacité remarquable. Le traitement des lixiviats est l'une des applications où cette technique a été utilisée dans le cadre d'une solution de traitement intégré, en réduisant plusieurs contaminants en un seul processus par coagulation, floculation et précipitation [2].

L'objectif principal de ce mémoire est de démontrer comment l'électrocoagulation peut être appliquée efficacement pour traiter les lixiviats, en utilisant des données empiriques et des études de cas pour illustrer son efficacité. Le mémoire est structuré en trois chapitres, offre une vue d'ensemble des défis spécifiques rencontrés en Algérie et des solutions potentielles pour une gestion durable des déchets.

Le premier chapitre introduit des généralités sur les lixiviats, en décrivant leur formation, leurs caractéristiques physico-chimiques et leur impact sur l'environnement. Cette section établit le contexte nécessaire pour comprendre l'importance critique d'une gestion efficace des lixiviats.

Le deuxième chapitre examine en détail les différentes méthodes de traitement des lixiviats disponibles, y compris les approches biologiques, physico-chimiques et mécaniques. L'accent est mis sur les technologies appropriées pour les conditions

spécifiques rencontrées dans les centres d'enfouissement, en évaluant leurs avantages et leurs limitations.

Le troisième chapitre se concentre sur la technique d'électrocoagulation, qui a le potentiel de répondre aux défis complexes posés par les lixiviats. Ce chapitre explore les fondements théoriques de l'électrocoagulation, ses mécanismes opérationnels, ainsi que les résultats pratiques des études obtenus dans ce contexte.

En terminant par une conclusion qui affirme l'efficacité de l'électrocoagulation pour le traitement des lixiviats et préservation de l'environnement.

CHAPITRE I : LES LIXIVIATS

I. Introduction

Les déchets ménagers et assimilés, en raison de leur volume important et de leur complexité biochimique, constituent un défi majeur pour la gestion environnementale. Parmi les méthodes courantes d'élimination, l'enfouissement technique occupe une place significative. Toutefois, cette pratique génère des effluents appelés lixiviats. Ces derniers, issus de la percolation de l'eau à travers les déchets, sont riches en polluants divers, présentant ainsi un risque majeur de contamination des sols et des nappes phréatiques.

Dans ce chapitre, nous aborderons les généralités relatives aux lixiviats des décharges publiques, en examinant leur origine, leurs caractéristiques, ainsi que les enjeux environnementaux qu'ils engendrent.

II. Généralités sur les lixiviats

II.1. Centre d'enfouissement technique (CET)

Un centre d'enfouissement est un lieu dédié à la gestion des déchets en les déposants sur sol ou dans des cavités, sans prévoir de récupération future [3]. Il se distingue en deux types principaux : les centres pour les déchets spéciaux et ceux pour les déchets ménagers. Les premiers concernent les déchets minéraux peu réactifs, tandis que les seconds traitent les déchets biologiquement dégradables [4].

Le but de ces centres est de réduire les impacts environnementaux tout en valorisant la production de biogaz généré [1].

Dans les centres d'enfouissement, les déchets sont disposés dans des compartiments, alternant avec des couches de terre. Une fois remplis, ces compartiments peuvent être utilisés pour des activités telles que la plantation d'arbres grâce au biogaz produit.

L'enfouissement des déchets reste la filière de traitement la moins coûteuse et la plus efficace pour l'élimination des grandes quantités des déchets.



Figure I.1: Centre d'enfouissement techniques

II.1.1. Définition des lixiviats

Les lixiviats émergent suite à la percolation des eaux pluviales et de ruissellement à travers les déchets confinés dans les sites d'enfouissement (Figures I.2 et I.3). Ce processus résulte de la dissolution des composés dérivés des déchets dans l'eau, conjointement avec l'entraînement mécanique des particules en suspension et des colloïdes [5].

La qualité des lixiviats dans une décharge dépend du temps qu'ils s'y trouvent ainsi que du type et de la quantité de déchets. Pour exemple, la qualité des lixiviats d'un pays développé ne sera pas la même que celui d'un pays en voie de développement car, dans les pays développés, il y a une gestion des déchets (recyclage) qui évite que les décharges ne soient pleines à craquer [6]. Toutefois, il convient de dire que la très grande majorité des pays en voie de développement comptent sur une bonne gestion des déchets [5].



Figure I.2 : Lixiviat brut



Figure I.3 : Lixiviat de bassin de décantation

II.1.2. Composition des lixiviats

La composition chimique et biochimique des lixiviats est hautement variable dans le temps et dans l'espace. Selon **Williams (2005)** et **Berthe (2006)**, les lixiviats issus de la plupart des décharges contiennent des concentrations de contaminants dépassant les normes de qualité pour les eaux de surface et les eaux potables, ce qui représente un risque environnemental important. Ces contaminants se divisent en quatre groupes principaux de polluants, à savoir [2] :

- La matière organique dissoute ;

- Des composés organiques anthropiques tels que les hydrocarbures aromatiques, les phénols et les composés aliphatiques chlorés, avec une concentration inférieure à 1 mg/l ;
- Des composés minéraux majeurs tels que le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), le potassium (K^+), le sodium (Na^+), l'ammonium (NH_4^+), le fer (Fe^{2+}) et le manganèse (Mn^{2+}) ;
- Des métaux lourds tels que le zinc (Zn), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le nickel (Ni) et le plomb (Pb), présents à des niveaux traces.

En plus, les lixiviats peuvent également renfermer divers micro-organismes pathogènes, comme les coliformes, les bactéries pathogènes [7].

II.1.3. Types des lixiviats

Il existe les types des lixiviats suivants [8 ;9] :

- a) Lixiviat jeune : La concentration en demande chimique en oxygène (DCO) est souvent très élevée, pouvant atteindre des valeurs extrêmes pouvant aller jusqu'à 80 000 mg O_2/L . En raison de cette forte charge organique biodégradable, un traitement biologique est généralement bien adapté pour ce type de lixiviat ;
- b) Lixiviat intermédiaire : C'est une phase intermédiaire entre le lixiviat jeune et le lixiviat stabilisé. Le pH tend à être neutre et DCO variant entre 3000 et 15000 mg O_2/l . Ce type de lixiviat est peu biodégradable, ce qui rend les traitements physico-chimiques préférables pour son traitement ;
- c) Lixiviat stabilisé : Il est également connu sous le nom de "lixiviat vieux". La concentration de DCO ne dépasse pas 2000 mg O_2/l , les acides carboxyliques et les métaux sont presque absents dans ces eaux [9].

Tableau I.1: Classification des lixiviats selon l'âge de la décharge

Type de lixiviat	Jeune	Intermédiaire	Stabilisé
Age des lixiviats	< 5 ans	5 - 10 ans	> 10 ans
pH	< 6,5	7	> 7,5
DCO (g/l)	> 20	3-15	< 2
Biodégradabilité (DBO_5/DCO)	Moyenne > 0,3	Assez faible 0,1-0,3	Très faible < 0,1

II.1.4. Répercussion des lixiviats sur l'environnement et la santé humaine

Lorsqu'ils sont déposés dans une décharge, les déchets subissent des processus de dégradation complexes résultant de réactions biologiques et physico-chimiques. L'eau qui s'infiltre à travers les déchets produits des lixiviats et du biogaz, chargés de substances organiques et minérales. Ces produits peuvent provoquer une pollution organique et métallique, en raison de la décomposition naturelle des déchets et des substances toxiques libérées par les matériaux anthropiques présents [10].

Les sites de décharges sont principalement confrontés à trois types de pollution : la pollution par les matières organiques et/ou minérales, la pollution par les métaux lourds, et la pollution par les microorganismes :

a. Pollution par les métaux lourds

Le transfert des métaux lourds des décharges vers les eaux souterraines implique la solubilisation à pH acide, la complexation par la matière organique [10], la précipitation à pH basique, la rétention des matières en suspension, l'adsorption des ions sur les particules du sol et les échanges d'ions [11].

b. Pollution par les microorganismes

L'utilisation d'eau contaminée par des lixiviats pathogènes a causé de nombreuses maladies hydriques, avec une intensification des problèmes et l'apparition de nouvelles maladies infectieuses au cours de la dernière décennie.

c. Pollution hydrique

Les hydrogéologues et les spécialistes de la qualité de l'eau sont de plus en plus préoccupés par le risque de pollution des eaux par les décharges. Les études indiquent que cette contamination affecte à la fois les eaux souterraines et de surface, influencée par le ruissellement des eaux de pluie et les interactions des lixiviats avec le sous-sol, notamment par les minéraux argileux et les métaux lourds [12].

II.1.5. Paramètres influant sur les lixiviats

Les paramètres influençant les lixiviats comprennent [13] :

- La composition des déchets : La nature des déchets (organique, inorganique, toxique, etc.) affecte la composition des lixiviats.

- La température : Des températures plus élevées peuvent augmenter la vitesse de dégradation des déchets et la production de lixiviats.
- Le pH : Le niveau de pH influence la solubilité des substances et la mobilité des métaux lourds.
- L’humidité : Une teneur élevée en eau dans les déchets augmente la production de lixiviats.
- Les conditions de dégradation : La présence ou l'absence d'oxygène (conditions aérobies ou anaérobies) affecte les processus biologiques et chimiques.
- La présence de métaux lourds et de polluants organiques : La concentration de ces substances dans les déchets peut influencer la toxicité et la composition chimique des lixiviats.
- La taille et compaction des déchets : Des déchets plus compactés peuvent réduire la perméabilité et affecter le débit des lixiviats.
- Le temps de résidence : La durée pendant laquelle les déchets restent dans la décharge peut affecter la quantité et la composition des lixiviats produits.
- Les interactions chimique et biologique : Les interactions entre différents composants chimiques et biologiques des déchets influencent les réactions et les produits formés dans les lixiviats.
- La gestion et conception des décharges : Les pratiques de gestion des déchets et la conception des systèmes de confinement influencent la génération et la collecte des lixiviats [14].

Ces paramètres doivent être surveillés et contrôlés pour minimiser l'impact environnemental des lixiviats [13].

III. Conclusion

La gestion des lixiviats issus des décharges est cruciale pour protéger l'environnement contre la pollution. Les lixiviats, en raison de leur composition complexe, nécessitent des méthodes de traitement spécifiques pour prévenir la contamination des sols et des eaux.

CHAPITRE II : TRAITEMENT DE LIXIVIATS

I. Introduction

La gestion des lixiviats est un défi croissant en raison de l'augmentation des volumes de déchets et de la complexité des composants hétérogène des lixiviats et leur forte charge polluante. Ce chapitre présente plusieurs études de cas réelles sur le traitement des lixiviats, en mettant en lumière les procédés utilisés, les résultats obtenus, et les défis rencontrés.

II. Traitement des lixiviats de décharge d'Oued Smar, Alger

AZOUZ [15] a fait une étude sur le traitement de lixiviat issus de la décharge d'Oued Smar par couplage oxydation avancée (POA)/Bioréacteur.

Les différents paramètres mesurés ont permis de déterminer les indicateurs de dégradation les plus pertinents. Le pH et le rapport DBO₅/DCO apparaissent comme de bons indicateurs de dégradation au sein du lixiviat, ainsi la DCO et la DBO₅, un prétraitement par acidification à pH de 5 avant traitement par le POA a été réalisé.

Le traitement par couplage des procédés d'oxydation avancée et du bioréacteur a démontré un excellent abattement de la charge polluante. En effet, la DCO initiale de 16500 mg O₂/l a été réduite à une DCO finale de 1000 mg O₂/l, atteignant ainsi un rendement de 94 %.

III. Traitement des lixiviats à la décharge de Tlemcen

BOUDJEMA [16] a étudié le traitement de lixiviats issus de la décharge de Tlemcen et le procédé utilisé est oxydation avancée avec utilisation combinée de l'ozone et du peroxyde d'hydrogène. Cette combinaison a permis de générer des radicaux hydroxyles 'HO' avec un taux de réduction de 75 % de composés réfractaires, et une amélioration de la qualité de l'effluent permettant son rejet dans les eaux de surface locales sans aucun risque environnemental.

Les résultats ont montré que l'oxydation avancée a démontré une grande efficacité pour traiter les contaminants difficiles à éliminer à Tlemcen, bien que son coût et sa complexité nécessitent une évaluation approfondie avant la mise en œuvre.

IV. Traitement de lixiviat de la décharge de Jebel Chakir

TRABELSI [17] a étudié le traitement des lixiviats de CET Jebel Chakir par les procédés d'oxydation avancée tel que le procédé photo-Fenton. L'échantillon de lixiviat a été prélevé à partir d'un bassin de stockage des lixiviats intermédiaires. Parmi les caractéristiques de lixiviat étudié : conductivité de 39,7 mS/cm, DCO de 10200 mg O₂/l et pH de 8,15.

Lixiviat de la décharge de Jebel Chakir ont été réalisées dans un photoréacteur (Figure II.1) de 1,4 l, équipé d'une lampe à basse pression de vapeur de mercure. Seulement un taux de minéralisation 62 % a été atteint.

Le procédé photo-Fenton permet d'atteindre un taux d'abattement relativement élevé de la matière organique. Cependant, l'utilisation de la lumière UV artificielle et l'ajout de réactifs [17].

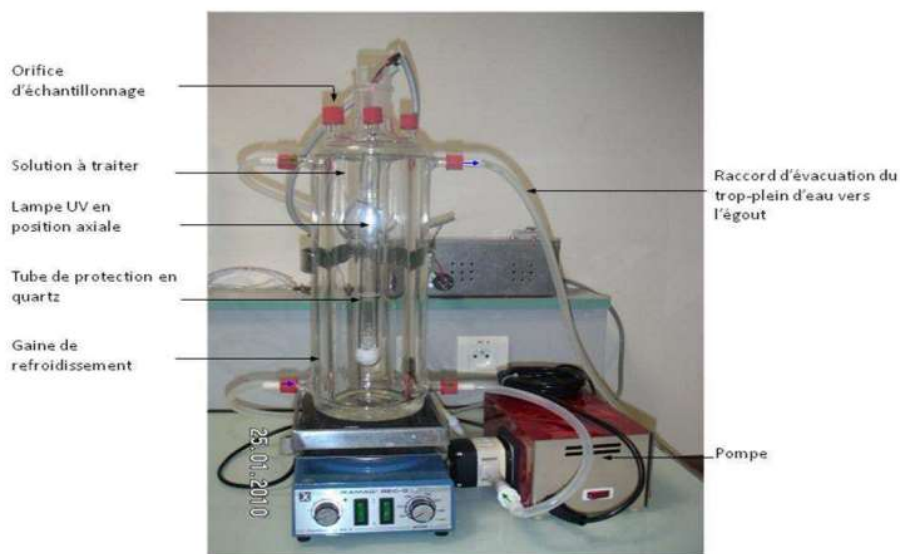


Figure II.1: Réacteur photochimique

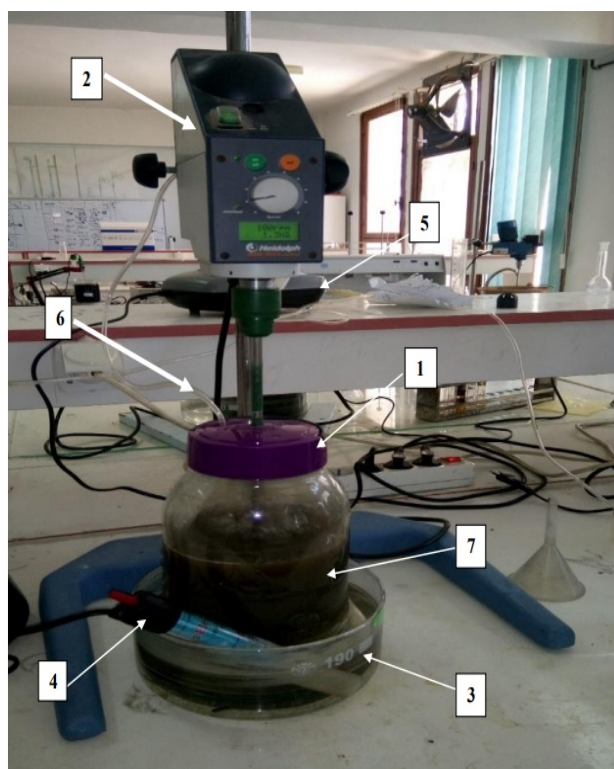
V. Traitement des lixiviats de CET de Corso

BOUDEHIR et BOURAS (2016) [18] ont étudié le traitement des lixiviats de CET de Corso par le procédé coagulation-floculation et traitement biologique dans un bioréacteur en mode batch avec traitements complémentaires (filtration à sable et adsorption sur charbon actif). L'échantillon de lixiviats est prélevé de bassin de casier.

Parmi les caractéristiques de lixiviats : DCO de 6000 mg O₂/l, MES de 400 mg/l et une turbidité de 500 NTU.

Pour les tests de coagulation-floculation par le jar-test, le volume traité est 500 ml de lixiviats. Les coagulants utilisés sont : chlorure ferrique FeCl₃ et sulfate d'aluminium Al₂(SO₄)₃.18H₂O, et l'alginate de sodium a été utilisé comme flocculant organique naturel.

Le bioréacteur utilisé est présenté par la figure II.2. La dégradation a été réalisée à une température égale de 30 °C.



- 1) Une enceinte ou récipient de volume
- 2) Un moteur mécanique qui permet l'a
- 3) Un cristallisateur (bain marie) ;
- 4) Une résistance chauffante ;
- 5) Une pompe aquarium (aération) ;
- 6) Un diffuseur d'air ;

Figure II.2: Dispositif de bioréacteur utilisé

Le traitement par coagulation-floculation a permis des taux d'abattement de la DCO de l'ordre de 94 %, mais la DCO reste supérieure à la norme de rejet qui est 120 mg O₂/l.

Pour le traitement biologique, le traitement a été réalisé avec une dilution (125 ml de lixiviats), et le traitement a été complété avec la filtration sur sable et l'adsorption afin de trouver une DCO inférieure à la norme de rejet. Mais l'inconvénient du traitement biologique est long, il peut durer jusqu'à 1 mois.

VI. Traitement par coagulation-floculation des lixiviats du CET d'Ouled Fayet

GHARSA [19] a étudiée le traitement des lixiviats du CET d'Ouled Fayet par le procédé de coagulation-floculation.

Ce procédé a permis de réduire la charge organique de 78,18 %, obtenant ainsi une DCO de 1220,4 mg d'O₂/l. Toutefois, l'effluent traité reste très acide et doit subir une régulation du pH avant d'être rejeté dans la nature. Le tableau II.1 récapitule les valeurs spécifiques avant et après le traitement.

Tableau II.1: Caractéristiques de lixiviats avant et après le traitement

Paramètres	Avant traitement	Après traitement
pH	5	4,79
DCO (mg O ₂ /l)	5593,22	1220,4
DBO ₅ (mg O ₂ /l)	75	0

VII. Traitement des lixiviats du CET d'Ouled Fayet par la combinaison des Procédés : boues activée et oxydation Fenton

Dans une autre étude, TABOUCOUNT [20] a testé le traitement des lixiviats jeune du CET d'Ouled Fayet par la combinaison des procédés : traitement biologique à boues activée et procédé Fenton (Figure II.3).

L'ajustement du pH de 800 ml de lixiviat à 3 en ajoutant de l'acide sulfurique pur. Avec une agitation de l'effluent à 300 trs/min, puis l'ajout d'un volume approprié de H₂O₂ à 30 % de pureté et de 1,11 de densité et dosage Fe²⁺ a été effectué par l'addition de la quantité nécessaire de FeSO₄ solide.



Figure II.3: Installation de traitement biologique utilisé

Les résultats montrent des rendements élevés pour l'abattement de la DCO, atteignant 46 % avec le traitement par boue activée. Le procédé Fenton, offre également de bons résultats, avec un abattement de 35 %. En combinant ces deux traitements, une nette diminution de la pollution a été observée, aboutissant à un abattement final de la DCO de 62,90 %.

VIII. Etude des lixiviats générés par les CET Khelil, BBA et Hamici

TEFFAHI [21] a étudiée le traitement généré dans les CET des déchets de Khelil, Baba Ali (BBA) et Hamici par le procédé électro-Fenton,

Ce dernier permet d'obtenir un rendement élevé pour l'abattement de la DCO, avec des taux de 68, 65 et 60 % pour les CET de Khelil, Baba Ali et Hamici, respectivement, en plus d'améliorer la DBO_5 (Figure II.4).

Le rendement d'abattement de la DCO obtenu lors du traitement des lixiviats des trois CET est illustré par la figure II.4.

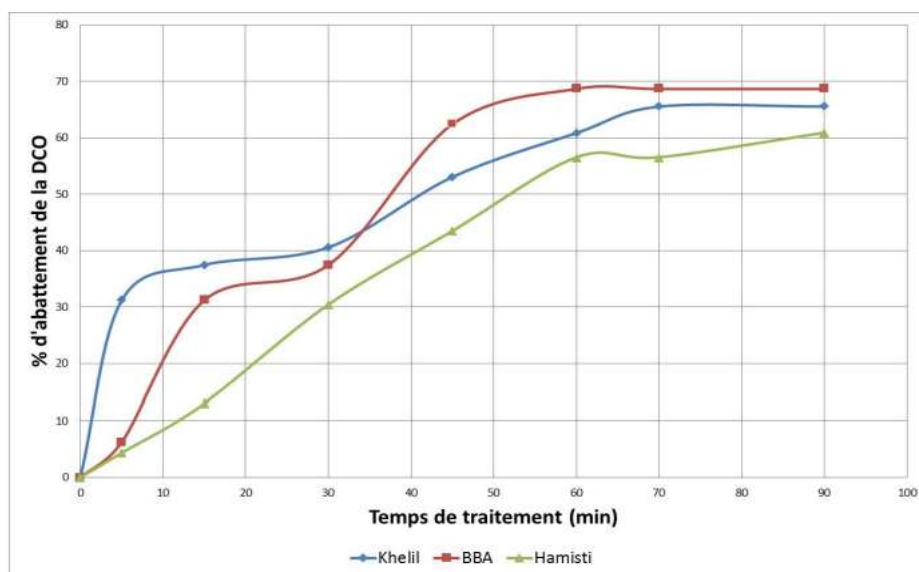


Figure II.4: Évolution du rendement d'abattement de la DCO pour chaque CET



Figure II.8: Lixiviats après traitement par électro-Fenton

IX. Traitement de lixiviats de CET de Cantabria, Espagne

RODRIGUEZ [22] ont étudié le traitement de lixiviat issu de la décharge de Cantabria en Espagne par le procédé d'osmose inverse. Les résultats ont montré une réduction plus de 95 % de la DBO₅ et la DCO avec une élimination presque complète des métaux lourds.

L'osmose inverse s'est révélée très efficace pour traiter les lixiviats, bien que des considérations financières et de gestion des résidus soient nécessaires pour sa mise en œuvre à long terme.



Figure II.6: Lixiviat avant et après traitement

X. Décharge de Northwood, Royaume-Uni

ALLEN [23] a étudié le traitement de lixiviats de la décharge de Northwood, Royaume-Uni par la combinaison de traitement aérobie et anaérobie. Les résultats montrent une réduction de 90 % de la DBO₅ et une élimination de la DCO ainsi une production de biogaz utilisé pour générer de l'électricité.

XI. Décharge de HammarbySjöstad, Stockholm, Suède

LUNDBERG [24] a fait une étude sur traitement des lixiviat issus de la décharge de HammarbySjöstad, Stockholm, Suède, par le procédé Oxydation Avancée avec l'utilisation de l'ozone et des rayons UV pour générer des radicaux hydroxyles, agents oxydants puissants.

Les résultats montrent une réduction jusqu'à 80 % des composés organiques et une amélioration de la qualité de l'eau qui permettant le rejet dans les eaux de surface locales.

L'oxydation avancée a démontré une grande efficacité pour traiter les contaminants difficiles à éliminer, bien que son coût et sa complexité nécessitent une évaluation approfondie avant la mise en œuvre.

XII. Traitement des lixiviats de CET de Staouali

Dans cette étude, AOUICHAT [25] a étudié le traitement de lixiviat fortement chargés de CET de Staouali par bioréacteur à membrane. Les principales caractéristiques du lixiviat sont : DCO de 10500 mg O₂/l, MES de 7370 mg/l, et DBO₅ de 5500 mg O₂/l.

Deux bioréacteurs ont été mis en place dans les mêmes conditions opératoires d'agitation, d'oxygénation et d'ajout de nutriments. Le premier bioréacteur, nommé Bio-boue, a étéensemencé avec des boues activées, Afin d'exclure l'influence des microorganismes déjà présents dans le lixiviat, un deuxième bioréacteur a été réalisé sans addition de boues activées, pour objectif de réactiver les microorganismes présents naturellement.

Pour atteindre les normes de rejets en milieu naturel. Ils ont couplé l'ultrafiltration au traitement par bioréacteur.

En effet les concentrations de la DCO obtenus sont de 500 et 600 mg O₂/l, reste supérieure à la norme de rejet qui est 120 mg O₂/l.

XIII. Conclusion

Les études de cas ont confirmé l'efficacité de divers procédés de traitement des lixiviats, bien que leur performance dépende fortement des caractéristiques des effluents et des objectifs de traitement. Une combinaison de techniques semble souvent nécessaire pour garantir des résultats satisfaisants. Il est recommandé d'adopter une approche intégrée, associant caractérisation régulière des lixiviats, optimisation des procédés, et valorisation des sous-produits pour réduire les coûts et limiter les impacts environnementaux.

***CHAPITRE III : TRAITEMENT DES
LIXIVIATS PAR ELECTROCOAGULATION***

I. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur le traitement des lixiviats par électrocoagulation, une méthode prometteuse pour la purification des eaux usées. La première partie présente les généralités sur l'électrocoagulation, couvrant les principes théoriques, les mécanismes de fonctionnement et les avantages de cette technique par rapport à d'autres méthodes de traitement. La deuxième partie est consacrée à l'analyse des résultats pratiques obtenus par divers chercheurs dans le traitement des lixiviats par électrocoagulation en examinant les données empiriques utilisés.

II. Généralités sur l'électrocoagulation

II.1. Définition

La technique d'électrocoagulation est une technique électrochimique utilisée pour le traitement des eaux. Elle implique la production sur place d'ions métalliques par la dissolution anodique d'électrodes métalliques telles que le fer ou l'aluminium, afin d'induire la coagulation et la floculation. Le courant électrique est utilisé pour contrôler précisément la quantité d'ions métalliques injectés [19].

Plusieurs études ont testé l'électrocoagulation en traitement des eaux et ont démontré son efficacité pour traiter un large éventail des effluents liquides. Le tableau III.1 présente quelques exemples illustratifs.

Tableau III.1: Quelques exemples illustratifs sur le traitement par EC[18]

Effluent	Rendement	Paramètres de polluants	Électrodes	Année
Eau chromée	78 à 99,6 % d'abattement des métaux lourds	Métaux lourds (As,Cr)	Al et Fe	2007
Effluents textiles	98 % abattement de turbidité et 77 % DCO	DCO, MES, COT, Turbidité	Al et Fe	2003
Effluent d'agro-industries	82 à 86 % d'abattement de DCO	DCO, Azote, germes pathogène, turbidité	Al et Fe	2008
Eaux usées phosphatées	100% d'abattement de phosphate avec l'aluminium	Phosphate	Al et Fe	2006
Eau de consommation	Fluorure réduit de 6 mg/l à moins de 1 mg/l	Fluorure	Al	2008

II.2. Origine et développement de l'électrocoagulation (EC)

L'électrocoagulation (EC) pour le traitement des eaux usées remonte à 1880, avec un brevet américain de Webster utilisant des électrodes en fer (Picard, 2000). La même année, une station d'épuration fut construite à Salford (Royaume-Uni) pour traiter des eaux urbaines contaminées. En 1909, Harris déposa un brevet amélioré utilisant des électrodes en fer et aluminium. Deux autres stations utilisant ce procédé furent construites aux États-Unis en 1912, mais leur activité cessa rapidement, principalement à cause du coût élevé, deux fois supérieur aux méthodes classiques.

Dans les années 1930-1940, des études approfondies furent menées. Stewart (1946) démontra que la coagulation électrochimique était plus rapide que les méthodes classiques. Bollina (1947), en s'appuyant sur ces travaux, conclut que l'EC était plus compétitive pour de petits dispositifs. Sadek (1970) et Baker et al. (1974) élargirent son application au

traitement des eaux industrielles et agricoles. Cependant, son utilisation déclina face à l'émergence de procédés plus simples et moins coûteux.

L'intérêt pour l'EC renaît dans les années 1980 grâce aux lois environnementales et aux avancées technologiques. Dans les années 1990, l'EC gagna en popularité, notamment en France, grâce à sa compétitivité économique et son efficacité dans divers secteurs comme le textile, l'agroalimentaire et les semi-conducteurs. Aujourd'hui, cette technologie continue d'évoluer en réponse aux besoins croissants de durabilité et d'efficacité.

L'électrocoagulation a gagné en importance grâce à son efficacité, souvent supérieure à celle des autres méthodes, pour éliminer diverses formes de pollution, comme le montrent les indicateurs suivants : DCO , DBO ,COT , MES , TDS , TAC : Les métaux lourds , ABS.

II.3. Mécanismes réactionnels de l'électrocoagulation

L'électrocoagulation est un processus qui engendre des réactions chimiques et physico-chimiques sous l'effet d'un courant électrique, se déroulant en trois phases successives :

1. Formation des coagulants par oxydation électrolytique de l'électrode consommable ;
2. Destabilisation des colloïdes : le processus par lequel les particules en suspension perdent leur stabilité et s'agglomèrent, facilitant leur élimination.
3. Agrégation des particules destabilisées.

Le mécanisme de destabilisation des colloïdes comprend les étapes suivantes :

- Compression de la double couche diffuse ;
- Neutralisation des charges des espèces ioniques présentes dans l'eau ;
- Formation de floes.

Un système d'électrocoagulation basique se compose d'une cathode et d'une anode (Figure III.1).

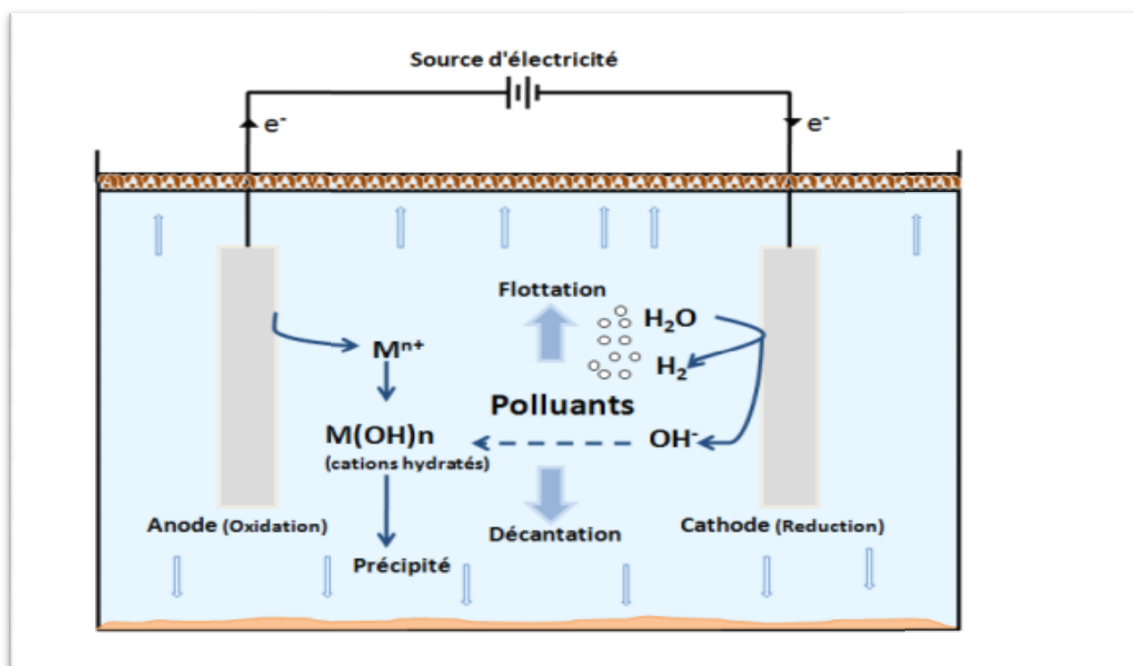


Figure III.1 : Schéma d'une cellule d'électro-coagulation (deux électrodes)

II.4. Principe d'électrocoagulation

L'EC est basée sur le principe de l'électrolyse, où des substances sont décomposées à l'aide de l'électricité. Ce processus perturbe les contaminants présents sous forme de suspension, d'émulsion ou dissous dans un milieu aqueux par l'application d'un courant électrique [18].

L'électrocoagulation est un processus complexe qui consiste à produire directement en solution les réactifs nécessaires par l'oxydation d'une électrode anodique sacrificielle. Ce procédé implique une interaction de nombreux phénomènes chimiques et physiques, et son efficacité dépend étroitement de divers paramètres électrochimiques, physico-chimiques et hydrodynamiques [22].

Pour mettre en œuvre l'EC, des anodes solubles (de fer ou l'aluminium) sont placées dans un réacteur contenant un électrolyte. Lorsqu'un courant électrique est appliqué entre ces électrodes, il génère des ions tels que Fe^{2+} ou Al^{3+} , favorisant ainsi la coagulation et la floculation des particules présentes dans la solution [18].

En parallèle, l'émission de gaz d'hydrogène (H_2) près de la cathode, sous forme de microbulles, facilite la flottation des particules éliminées, entraînant leur ascension à la surface de la solution à traiter [22].

Pendant un processus d'EC, divers phénomènes se déroulent, incluant les réactions électrochimiques d'oxydoréduction, les réactions chimiques entre les ions, les adsorptions physiques ou chimiques des hydroxydes avec les polluants, ainsi que l'adsorption chimique des ions métalliques avec la pollution. En outre, il y a des interactions entre les gaz produits et la solution traitée [20].

II.5. Mode de connexion des électrodes

Pour optimiser les performances, il est essentiel d'utiliser des électrodes de grande surface. Des essais ont été menés avec des cellules électrochimiques, en utilisant soit des électrodes monopolaire, soit bipolaire [18].

La figure III.2 illustre trois modes de connexion distincte dans une cellule d'électrolyse.

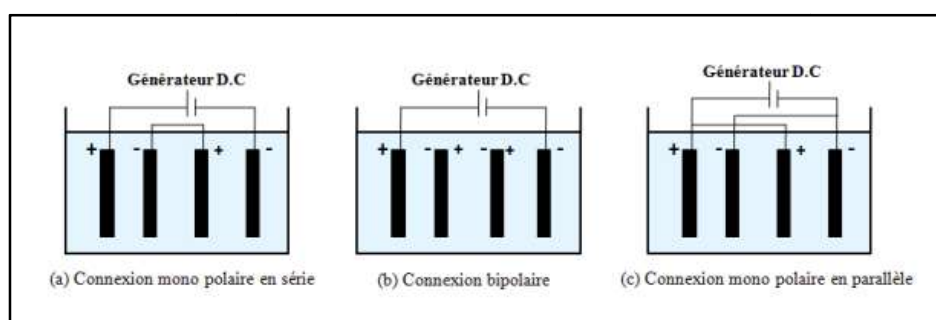


Figure III.2 : Modes de connexion distincts dans une cellule d'électrolyse

Le montage parallèle se compose principalement de paires de métaux conducteurs placées entre deux plaques d'électrodes parallèles, connectées à une source de courant continu :

- Dans un montage monopolaire, chaque paire d'électrodes sacrificielles est connectée entre elles en interne, sans connexion externe avec les autres électrodes. Cette disposition des électrodes monopôles en série est électriquement similaire à une seule cellule avec de nombreuses interconnexions d'électrodes.
- Dans un arrangement bipolaire, les électrodes sacrificielles sont positionnées entre deux électrodes parallèles sans être électriquement connectées entre elles. Les deux électrodes monopôles sont reliées à la source d'alimentation sans qu'il y ait

de liaisons entre les électrodes sacrificielles. Cette configuration cellulaire simplifiée facilite l'entretien [19].

Lorsqu'un courant électrique traverse les deux électrodes, les côtés neutres de la plaque conductrice sont transformés en côtés chargés, avec des charges opposées par rapport au côté parallèle adjacent à chaque électrode [22].

Le type de connexion utilisé influence directement le circuit électrique. On constate que, pour une intensité fixe, la tension nécessaire est plus élevée en mode série qu'en mode parallèle. En mode série, les tensions s'additionnent en raison de l'accumulation des résistances (l'intensité traversant chaque électrode reste constante), tandis qu'en mode parallèle, chaque cellule individuelle (composée de deux électrodes) présente sa propre résistance. Utiliser le mode parallèle nécessite un générateur capable de fournir un courant élevé à basse tension, tandis qu'en mode série, un générateur adapté doit fournir des intensités plus faibles à des tensions plus élevées [18].

Selon les résultats de certaines études, citées dans la littérature, l'électrocoagulation avec une paire d'électrodes Fe/Al (anode/cathode) s'est révélée plus efficace que le processus de traitement avec une paire d'électrodes Fe/Fe. En synthèse, La configuration monopolaire est généralement moins coûteuse à exploiter. Cependant, dans certains cas, une meilleure élimination des polluants peut être obtenue avec la configuration bipolaire, probablement en raison de réactions secondaires additionnelles [22].

II.6. Passivation des électrodes

L'encrassement des électrodes, notamment celles en aluminium, est couramment observée et reconnue comme nuisible à la performance du réacteur. Ce phénomène résulte de la formation d'une couche d'inhibition, souvent un oxyde sur la surface de l'électrode, qui entrave la dissolution du métal et le transfert des électrons. Cela limite l'efficacité de l'ajout de coagulant dans la solution. Au fil du temps, cette couche s'épaissit, ce qui diminue l'efficacité globale du processus d'EC [22].

La stratégie la plus efficace consiste à inverser périodiquement la polarité des électrodes, ce qui réduit significativement la passivation. De plus, l'ajout d'anions ralentit également ce phénomène sur l'électrode. L'effet positif est hiérarchisé comme suit [23] :



Figure III.3 : Dégradation des électrodes après traitement par l'électrocoagulation



En particulier, l'ajout de Cl peut inhiber ce phénomène. Mais, il est nécessaire de rincer régulièrement la surface de l'électrode après chaque utilisation.

II.7. Facteurs influant l'électrocoagulation

II.7.1. Effet de la conductivité

La conductivité du milieu est essentielle pour un transfert ionique efficace dans un effluent. Elle doit être suffisamment élevée pour supporter le courant imposé. Si la conductivité est trop faible, la résistance du milieu augmente, nécessitant une tension plus élevée pour faire passer le courant. Cela entraîne une consommation énergétique accrue, ce qui est économiquement défavorable [25].

En cas de faible conductivité, l'ajout d'un électrolyte neutre peut augmenter sa conductivité électrique. On cite par exemple, le sulfate de sodium (Na_2SO_4) qui ne réagit pas avec les ions en solution mais facilite le passage du courant entre les électrodes, permettant ainsi la réaction malgré la résistance initiale de l'effluent. Le chlorure de

sodium (NaCl) est également couramment utilisé en électrocoagulation en raison de sa sécurité d'utilisation et de son coût abordable [25].

II.7.2. Effet de la température

L'impact de la température sur le processus d'EC n'a pas été étudié de manière exhaustive depuis sa découverte. Cependant, selon CHEN (2004), l'efficacité du traitement par EC augmente avec l'augmentation de température jusqu'à environ 65 °C. À l'inverse, KOREN et SYVERSEN (1995) ont souligné que des températures trop élevées peuvent altérer l'interface gaz-liquide de manière non souhaitable pour l'élimination des polluants. De plus, à des températures élevées, la production de bulles d'hydrogène de taille plus importante (due à l'expansion du gaz à haute température) accélère la remontée des bulles, ce qui peut diminuer l'efficacité de l'accrochage des particules en suspension. Par conséquent, le traitement par électrocoagulation est généralement réalisé à température ambiante pour maintenir des conditions optimales et prévenir ces effets indésirables [23].

II.7.3. Effet du pH

Le pH du milieu est crucial pour définir la forme des ions métalliques dans la solution, influençant ainsi leur réactivité et leur disponibilité. Il impacte également l'état des autres espèces chimiques en solution et la capacité de dissolution des produits formés. Par conséquent, le pH joue un rôle déterminant dans le rendement global et l'efficacité des processus impliquant des interactions chimiques, y compris ceux liés à l'EC [25].

II.7.4. Effet de la distance entre les électrodes

L'espacement entre les électrodes est un paramètre critique qui influe significativement sur les réactions d'électrolyse. En augmentant cet espacement, la tension de la cellule augmente également, ce qui se traduit par une consommation d'énergie accrue. Pour cette raison, des espacements plus étroits sont préférés car ils améliorent les caractéristiques de transfert de masse et réduisent les pertes ohmiques. La tension affichée par le voltmètre ne sera celle donnée par les couples Réd-Ox mais supérieure en raison de la chute ohmique, la tension s'écrit alors [22] :

$$U' = U + RI$$

Avec :

U : la tension thermodynamique (obtenue par la relation de Nernst)

U' : la tension à appliquer

I : l'intensité

R : la résistance de la cellule

Mais, des espacements plus étroits peuvent entraîner une augmentation de la résistance électrique en raison de la production accrue de gaz entre les électrodes. Ainsi, trouver un équilibre approprié entre l'espacement des électrodes, la consommation d'énergie et les pertes de résistance est essentiel pour optimiser les performances et l'efficacité du processus.

II.7.5. Effet de la densité du courant

La densité du courant (i) est un paramètre de grande importance en EC, car c'est le seul paramètre de fonctionnement directement maîtrisable. Il influe non seulement sur la réactivité du système, mais aussi de manière significative sur le processus de séparation des polluants.

Elle contrôle la production de coagulant et l'émission de bulles, tout en impactant le mélange de la solution et le transfert de matière au niveau des électrodes [23].

La densité de courant est définie comme le courant électrique appliqué à l'électrode, divisé par l'aire active (S) de cette même électrode. Ainsi, pour réguler ce paramètre, il est simplement nécessaire de contrôler l'intensité du courant (I) [23].

II.7.6. Effet du temps d'électrolyse

Le temps d'EC a une influence directe sur l'efficacité du processus d'EC, car ce processus utilise un courant électrique pour coaguler et précipiter les particules à éliminer présentes dans un liquide [25].

a. Composition des électrodes

Le choix du matériau des électrodes est crucial dans les processus d'EC, comme le fer et l'aluminium [26] :

- *Plaques en aluminium*

Les électrodes en aluminium sont également populaires en raison de leur légèreté et de leur conductivité électrique élevée. Elles peuvent être utilisées efficacement pour la coagulation des particules et la production de floccs.



Figure III.4 : Plaques en aluminium pure

- *Plaques en fer*

Les électrodes en fer sont moins coûteuses et efficaces pour la précipitation des métaux lourds et d'autres contaminants dans les eaux usées. Cependant, elles peuvent nécessiter un traitement supplémentaire pour éviter la corrosion.

Ces plaques sont les plus couramment utilisées, principalement en raison de leur coût abordable, de leur disponibilité généralisée et de leur efficacité bien établie dans diverses applications [26].

Cela s'applique également à d'autres facteurs tels que l'état de surface des électrodes (lisse ou rugueux) et le niveau d'agitation dans le réacteur d'électrolyse (adéquat ou insuffisant), qui peuvent influencer la surtension de transfert ou d'activation. La surtension de transfert est un paramètre crucial pour évaluer les performances d'une électrode, représentant l'énergie nécessaire pour faciliter l'échange d'électrons à la surface des électrodes [22].

II.8. Applications variées de l'électrocoagulation en traitement des eaux

- Dans une étude faite par CAMILLERI [22], l'application d'EC/flottation pour le traitement des eaux usées urbaines a été faite avec succès. Ce processus a permis d'atteindre des niveaux d'élimination significatifs : 90 % de MES, 80 % de DBO₅ et de DCO, 25 % d'azote, 90 % de phosphates et 80% de détergents ;
- Ils ont évalué l'efficacité de l'EC pour le traitement d'un effluent textile [27], en la combinant avec la coagulation chimique. Ils ont observé une réduction de la (DCO) de 78 % avec la coagulation chimique seule, de 50 % avec l'électrocoagulation seule à une intensité de courant de 100 A/m² pendant 10 minutes, et de 79,5 % lorsque les deux procédés ont été combinés sur la même durée ;
- Des recherches approfondies ont été faites sur l'utilisation de l'EC pour traiter divers types d'effluents contaminés [27]. En utilisant un électro-coagulateur avec un temps de traitement court de seulement 2,5 minutes, il a obtenu des résultats remarquables allant de 60 à 99 % de DCO, de 61 à 91 % de DBO₅, 71 à 99 % de MES, et de 95 à 100 % de couleur. En plus, l'étude a mis en évidence les effets directs de l'électrolyse sur divers composés dissous, notamment l'oxydation des nitrites, sulfures, cyanures et sulfites, ainsi que la réduction du chrome hexavalent. Au cours du ce processus, l'élimination des bactéries a été aussi prouvée en générant des oxydants tels que l'eau oxygénée et les acides hypochloreux à partir de la décomposition des chlorures présents dans les effluents ;
- Dans le tableau III.2 présente les résultats de quelques études faites sur l'EC des lixiviats de site d'enfouissement ;

Tableau III.2 : Résultats de quelques études faites sur l'EC des lixiviats de CET

Electrodes		Volume de travail (L)	pH	Durée de traitement (min)	Tension ou densité électrique	DCO		NH ₄		Distance inter-électrode (cm)	Références
Anode	Cathode					Concentration initiale (mg/L)	Abattement (%)	Concentration initiale (mg/L)	Abattement (%)		
Al	Al	0,5	8	100	12 V	16.464	62,7 %	-	-	6,5	(Jotin <i>et al.</i> , 2012)
Fe	Fe	1	6,4 – 7,3	90	4,96 mA/cm ²	2.566	49,8 %	386	38,6 %	1	(Li <i>et al.</i> , 2011)
Fe	Fe	1	6,5	30	2,98 mA/cm ²	2.566	32,7 %	386	24,8 %	1	(Li <i>et al.</i> , 2011)
Al	Al	1	6,5	30	2,98 mA/cm ²	2.566	21 %	386	20,8 %	1	(Li <i>et al.</i> , 2011)
Al	Al	0,5	8,2	30	63,1 mA/cm ²	12.860	56 %	2.240	14 %	6,5	(Ilhan <i>et al.</i> , 2008)
Fe	Fe	0,5	8,2	30	63,1 mA/cm ²	12.860	≈ 52 %	2.240	11 %	6,5	(Ilhan <i>et al.</i> , 2008)
Al	Al	0,5	7,6 – 8,9	30	50 mA/cm ²	28.200 – 34.200	70 %	-	-	2,8	(Bouhezila <i>et al.</i> , 2011)
Fe	Fe	0,5	7,6 – 8,9	30	50 mA/cm ²	28.200 – 34.200	≈ 68 %	-	-	2,8	(Bouhezila <i>et al.</i> , 2011)
Al	Cu	2	8,2 – 8,5	20	25 mA/cm ²	2.247	39 %	-	-	2	(Tsai <i>et al.</i> , 1997)
Fe	Cu	2	8,2 – 8,5	20	26,1 mA/cm ²	2107	44,5 %	-	-	2	(Tsai <i>et al.</i> , 1997)
Al	Al	-	8	60	20 mA/cm ²	9.800	60,5 %	3.710	24,3 %	-	(Kabuk <i>et al.</i> , 2014)
Fe	Fe	0,15	8,6	30	5 V	12.650	33 %	-	-	2,3	(Norma <i>et al.</i> , 2012b)
Al	Al	0,8	6,61 - 7	30	15,9 mA/cm ²	6.200	45 %	-	-	1,6	(Top <i>et al.</i> , 2011)
Fe	Fe	0,9	6,54	180	30 mA/cm ²	11.000	65,85	-	-	0,9	(Orkun et Kuleyin, 2012)

II.9. Avantages et désavantages

II.9.1. Avantages

- L'eau purifiée est claire, incolore et inodore ;
- EC est simple et facile à utiliser avec une large plage de fonctionnement suffisant pour surmonter la plupart des problèmes rencontrés pendant le fonctionnement [25] ;
- Par rapport au traitement chimique, les eaux usées générées par l'EC contiennent moins de matières dissoutes totales [26] ;
- Les floes produits par l'EC sont comparables à ceux formés par des méthodes chimiques, mais ils sont caractérisés par leur plus grande taille, leur moindre contenu en eau liée [26], leur stabilité accrue et leur résistance à l'acide. Ces propriétés facilitent leur séparation rapide à travers les filtres.



Figure III.5: Les flocs produits par l'EC

II.9.2. Désavantages

- L'inconvénient principal réside dans le coût élevé des électrodes consommables, mais l'utilisation de métaux recyclés a offert une solution partielle à ce défi [25] ;
- La nécessité d'entretenir les installations, de nettoyer et de remplacer les électrodes entraîne des interruptions du processus, ce qui se traduit par une perte de temps significative [27] ;
- Le procédé d'électrocoagulation repose sur des réactions électrochimiques, nécessitant que l'effluent à traiter soit conducteur. Pour certains effluents faiblement conducteurs, l'ajout de NaCl est souvent requis afin de garantir une efficacité optimale du traitement [26].

III. Application de l'électrocoagulation pour le traitement des lixiviats

III.1. Traitement des lixiviats de la décharge publique contrôlée de la ville de Fès (Maroc)

Une étude sur le traitement par EC a été faite sur des lixiviats provenant de la décharge publique contrôlée de la ville de Fès [28]. Diverses expériences ont été menées afin de déterminer les conditions optimales pour éliminer la pollution. Ils ont réalisé une cellule d'électrocoagulation, d'un volume de 400 ml, comporte deux électrodes en aluminium (5 cm x 3 cm): l'une fonctionne comme cathode et l'autre comme anode. Les électrodes sont espacées de 5 cm. Un générateur de courant applique une tension de 12 V, avec une densité de courant de 38 A/m². Pour assurer le mélange de la solution, un agitateur magnétique, fonctionnant à 100 trs/min, est placé au fond de la cuve entre les deux électrodes pendant 1 h. Après le traitement, les résultats ont montré un rendement maximal d'élimination des métaux lourds tels que le chrome, le zinc, le nickel et le fer a été obtenu, avec des taux respectifs de 79, 86, 89 et 90 % (Tableau III.3). Ce rendement a été atteint avec une consommation minimale d'énergie et d'électrodes. Après trois heures de décantation, la production de boues s'élève à 1,1 kg/m³. Ainsi, une formation de floccs facilite l'agglomération ou l'adsorption des molécules organiques polluantes présentes dans le lixiviat.

Tableau III.3: Concentrations des éléments métalliques dans le lixiviat brut et traité par électrocoagulation

C (mg/l)	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
Lixiviat brut	0,14	4,36	2,04	0,4	33,72	2,58	3,74	0,18	4,68
Lixiviat traité	0,04	-	0,43	0,03	3,62	-	0,41	0,12	0,62

III.2. Optimisation du traitement des lixiviats de la décharge publique contrôlée de la ville de Tébessa

Le traitement des lixiviats provenant de la décharge publique contrôlée de la ville de Tébessa par EC a été étudié dans un autre travail [29].

Les expériences ont été réalisées dans un bécher en verre d'un litre pour observer visuellement le processus d'EC, utilisant deux électrodes en aluminium (6 x 2,4 x 0,3 cm) de pureté à 98 %, pour traiter 400 ml de lixiviat. Les paramètres étudiés sont : le pH (4,5-8), vitesse d'agitation (100-350 trs/min) et distance inter-électrodes (2-5,9 cm). Ils ont noté une formation significative de boues et ont cherché à optimiser les conditions pour maximiser l'élimination de la DCO. À la fin, le taux d'élimination de la DCO est de 89 %. L'exploration d'un prétraitement biologique complémentaire pourrait être envisagée comme une étape finale pour rendre les lixiviats conformes aux normes requises pour leur déversement dans le milieu récepteur. Ainsi, les conditions optimales incluaient sont :

- Vitesse d'agitation de 150 trs/min ;
- Distance inter-électrodes de 2,9 cm ;
- Intensité du courant de 1,4 A ;
- pH de 5 ;
- Temps de contact de 75 min.

Le tableau III.4 présente les données caractérisant le lixiviat avant et après son traitement par EC.

Tableau III.4: Caractéristiques du lixiviat avant et après traitement

	Avant traitement	Après traitement
Conductivité (mS/cm)	55	34,9
Turbidité (NTU)	150	38,6
DCO (mg O₂/l)	9850	1103,2
DBO₅ (mg O₂/l)	800	400



Figure III.6 : Etat d'électrode avant et après EC



Figure III.7 : Couleur des lixiviats avant et après EC

III.3. Traitement des lixiviats du CET de Ouled Fayet

Une autre étude est faite sur le traitement de lixiviats issus de centre d'enfouissement technique d'Ouled Fayet [19]. Elle a mis en œuvre un dispositif qui contient une cellule d'électrocoagulation cylindrique de 1 litre (bêcher en verre), permettant de suivre visuellement le processus d'électrocoagulation. Cette cellule intègre un filtre qui capture des flocs formés par flottation. Les électrodes utilisées sont en fer et ont une surface active de 29 cm².

Pour cette étude, elle a choisi de focaliser sur quatre paramètres particuliers ;

- La vitesse d'agitation (v) : 100, 150, 200 et 300 trs/min ;
- La distance inter-électrode (e) : 1, 1,5, 1,7, 2 cm ;
- Intensité du courant (i) : 1, 5, 2, 2,5 et 3 A ;
- Le pH : 4 ; 4,5 ; 5, 5,5 ; 6 et 8.

Les résultats de l'EC sous les conditions optimales (v = 150 trs/min, e = 1,7 cm, i = 1,5 A et pH = 5) ont montré un rendement notable avec un abattement de plus de 83 % de la charge organique initiale (initialement 5593,22 mg d'O₂/l). De plus, tous les orthophosphates ont été totalement précipités et le pH de l'effluent après traitement ne nécessite aucun ajustement avant son rejet dans l'environnement.

III.4. Traitement du lixiviat issu de la décharge publique d'Oued Samar

Dans l'étude de faisabilité du traitement du lixiviat issu de la décharge publique d'Oued Samar, par l'EC en suivant l'évolution de la concentration en matière organique, azote et phosphore, un récipient cylindrique a été utilisé comme une cellule d'EC contenant deux plaques en aluminium disposées de manière parallèle [5].

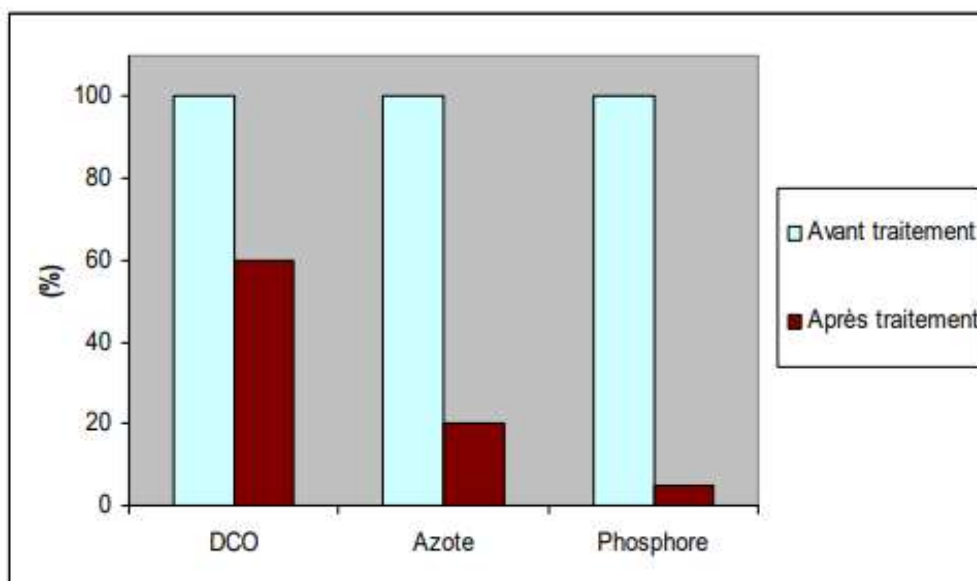


Figure III.8 : Efficacité du traitement par EC

La figure III.8, présente le rendement d'élimination de la pollution organique. D'après l'analyse de ces résultats, ils ont conclu que le traitement du lixiviat de la décharge publique d'Oued Samar par EC permet d'éliminer 40 % de la DCO, 80 % des composés azotés et 95 % du phosphore.

III.5. Traitement des lixiviats par les anodes hybrides

Le dispositif expérimental utilisé par la figure III.18, a été utilisé dans une étude sur le traitement des lixiviats d'un bassin de stockage provenant de la décharge d'Oued El-Alleug par la méthode d'EC [30]. Le dispositif est composé de deux électrodes en aluminium de dimensions identiques (170 mm x 45 mm), immergées dans un b cher d'un litre et un réacteur cylindrique agit  contenant 400 ml de lixiviat   traiter, où se déroulent

les réactions électrochimiques, maintenu une vitesse d'agitation constante de 400 trs/min. L'ajout de 0,4 g de NaCl au lixiviat a pour objectif d'augmenter sa conductivité, effectuée à la température ambiante ($23 \pm 2^\circ\text{C}$). Sur chaque étude, ils ont varié un paramètre et fixé les autres.

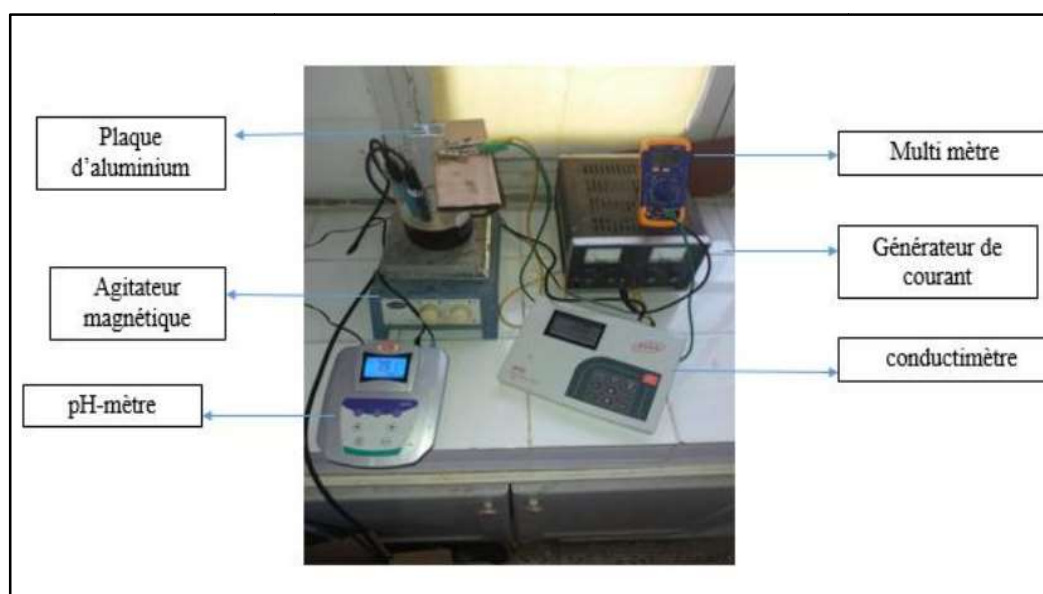


Figure III.9 : Dispositif utilisé

Les conditions optimales sont : $\text{pH} = 4$, $v = 400$ trs/min, $e = 2$ cm, $t = 90$ min et $I = 0,5$ A et une dilution de 25 %. Ils ont rapporté avec des résultats intéressants en termes d'élimination de la DCO et nitrates, phosphates, qui sont 86, 90 et 98 % respectivement.

IV. Conclusion

En conclusion, ce chapitre a mis en lumière les principes théoriques et les mécanismes de l'électrocoagulation en tant que méthode de traitement des lixiviats. Les résultats pratiques présentés, obtenus par divers chercheurs, démontrent clairement l'efficacité de l'électrocoagulation pour réduire la charge polluante des lixiviats. Cette technique se révèle être une solution performante et prometteuse pour la gestion des eaux usées issues des décharges et peut significativement améliorer la qualité des lixiviats traités, offrant ainsi une alternative viable et durable pour la protection de l'environnement.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

En conclusion, la gestion des lixiviats issus des décharges demeure un défi environnemental significatif, nécessitant des solutions efficaces pour préserver les sols et les ressources en eau. Ce mémoire a exploré plusieurs approches de traitement des lixiviats, mettant en évidence l'électrocoagulation comme une méthode prometteuse pour réduire la charge polluante de ces liquides complexes.

L'analyse approfondie des caractéristiques des lixiviats a souligné leur potentiel élevé de contamination et les risques associés pour l'environnement et la santé publique. Dans ce contexte, l'adoption de technologies comme l'électrocoagulation, basée sur des processus électrochimiques avancés, se présente comme une solution efficace pour éliminer les contaminants tels que les métaux lourds et les matières organiques.

L'efficacité d'électrocoagulation, comme toutes les techniques de traitement des eaux, est influencée par les paramètres expérimentaux tels que la vitesse d'agitation et la distance entre d'électrodes ainsi le pH, le courant électrique. Alors il faut étudier ces paramètres afin d'optimiser le rendement opératoire avec un faible coût.

Il est essentiel de développer des solutions adaptées aux conditions locales et de promouvoir l'innovation continue dans le domaine du traitement des déchets. Cette approche garantit non seulement une gestion durable des déchets mais aussi une préservation à long terme des ressources naturelles et des écosystèmes.

Pour l'avenir, la poursuite des efforts de recherche et de développement est cruciale pour améliorer nos pratiques environnementales et promouvoir des solutions de gestion des déchets plus responsables à l'échelle mondiale.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Berthe C (2006) : Etude de la Matière Organique contenue dans des lixiviats issus de différentes filières de traitement des déchets ménagers et assimilés. Thèse de doctorat, Université de Limoges, 196 p.
- [2] Aloueimine S.O (2006) : Méthodologie de caractérisation des déchets ménagers à Nouakchott (Mauritanie) : contributions à la gestion des déchets.
- [3] Aina M.P (2006) : Expertises des centres d'enfouissement techniques de déchets urbains dans les PED : contribution à l'élaboration d'un guide méthodologique et à sa validation expérimentale sur sites. Thèse de doctorat, Université de Limoges, 236 p.
- [4] Hariti M (2010) : Traitement du lixiviat par procédés électrochimiques. Mémoire de magister, ENP, p17.
- [5] Lounici H, Bouhezila F & Mameri N (2011) : le lixiviat: un déchet généré par une nouvelle technique de traitement, Article de journal ; Ecole Nationale Polytechnique El-Harrach Alger.
- [6] Kjeldsen P, Barlaz M.A, Rooker A.P, Baun A, Ledin A & Christensen T.H (2002) : Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 32(4): 297-336.
- [7] Ademe (2012) : Les Avis de l'ADEME. L'incinération des déchets ménagers et assimilés. Décembre 2012. 6p.
- [8] APHA (1998), Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th edn. American Public health Association : Washington, DC. 2671p.
- [9] Jacques B, Olivier T (2015) : "Les lixiviats de décharges d'ordures ménagères genèse, composition et traitements", Article.
- [10] Emilien B (2008) : "Evolution de l'impact environnemental de lixiviat d'ordure ménagère sur les eaux superficielles et souterraines, approche hydrobiologique et hydrogéologique. Site d'étude : décharge de Tuffe (Territoire de Belfort –France)", Thèse de doctorat. Hydrologie. Université de Franche-Comté française.
- [11] Jean R : « analyse de l'eau » 9^{em} édition.

[12]Schlumpf J.P, Trebouet D, Quemeneur F, Maleriat JP& Jaouen P(2001) : Revue des sciences de l'eau, 14/2147-155.

[13]ONEP : Procédure de conditionnement et de conservation des échantillons d'eau (14PQ 07) Direction contrôle qualité des eaux.

[14]Rodier J (2009) : L'analyse de l'eau – eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, 9ème édition, Paris, Dunod, 1475 p.

[15]Azzouz L (2011) : Traitement des lixiviats de la décharge d'Oued Smar par couplage POA/Bioréacteur ; mémoire de magister ; ENP ; P66 ,106.

[16]BoudjemaL,HadjiR,BoutaghaneH&KebourD(2012) : Évaluation de la gestion des déchets solides urbains en Algérie.

[17]Trabelsi S (2012) : Etudes de traitement des lixiviats des déchets urbains par les procédés d'oxydation avancée photochimiques et électrochimiques : application aux lixiviats de la décharge tunisienne "Jebel Chakir". Thèse, Sciences de la Terre, université Paris-Est, p17.

[18]Bouras A &BoudehirN (2016) : Traitements physico-chimiques et biologiques des lixiviats de décharge ; Mémoire de Master ; Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou ;p39,79.

[19]Gharsa S (2011) : Caractérisation et traitement par coagulationfloculation et électrocoagulation des lixiviats du CET de Ouled Fayet ; Mémoire du projet de fin d'études ; ENP ; P53,70

[20]Tabouchount A (2009) : Traitement des lixiviats du C.E.T d'Ouled Fayet par la combinaison des Procédés : boues activée et oxydation Fenton ; Mémoire du projet de fin d'études ; p59,70.

[21]Teffahi A et DjetteneR (2017) : Etude des lixiviats générés dans les Centres d'Enfouissement Technique des déchets ; Mémoire du projet de fin d'étude ; p70,111.

[22]RodriguezL,RuizG&GarridoJ (2014). Treatment of landfill leachates by sequential membrane bioreactor and reverse osmosis: operating cost comparison. Desalination, 357, 52-58.

[23]AllenA et HaynesR (2006). Landfill leachate management using waste materials. Waste Management, 26(5), 459-469.

[24]LundbergM., &Fröling, M. (2007). Advanced oxidation processes for treatment of leachates from landfill sites. Water Science and Technology, 55(12), 309-316.

[25]Aouichat F (2012) : Traitement des lixiviats fortement chargés par bioréacteur à membrane ; Mémoire du projet de fin d'études ;p51,31.

[26]Rabahi A (2020) : étude de traitement des lixiviats de cet par electrocoagulation et la faisabilite de leurs biodegradation ; these ;p38,58,156.

[27]Bennajah M (2007) : Traitement des rejets industriels liquide par électrocoagulation/électroflotation en réacteur airlift ;these de doctorat ; l'institut national polytechnique de toulouse ;p8-22.

[28]Ben Abbou M& El Haji M (2014) : Traitement des Lixiviats de la décharge non contrôlée de la ville de Taza par électrocoagulation- filtration et leur réutilisation dans la germination du Sorgho et de la luzerne. Article International Journal of Innovation and AppliedStudies, Faculté Poly disciplinaire de Taza, Boîte Postale 1223 Taza Gare, Maroc, p375.

[29]Lessoued R &Souahi F (2018) : Modélisation et optimisation de la dépollution des lixiviats ; thèse de doctorat ;p52,104.

[30]Aissani S &Fkair N ; (2018) : Traitement par électrocoagulation des lixiviats par les anodes hybrides ; mémoire de master ; P3,5,12,48.

[31]AFNOR (1997) ; Recueil des normes françaises.