

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département Génie de l'environnement En
collaboration avec
Centre de Développement des Énergies
renouvelables
Unité de développement des Équipements solaires
/EPST CDER



Mémoire de projet de fin d'études Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en Génie de
l'Environnement

T H E M E

Application des procédés électrochimiques pour la désinfection des eaux usées de l'UDES

Présenté et soutenu publiquement le 14/07/2021 par
Melle BOUDRAA Abir et Melle BOUHENAF Naima

Sous la direction de
Dr Hafida LEBIK Maître de recherche B (UDES)
Dr Yacine KERCHICH Maître de conférence A (ENP)

Composition du jury :

<i>Président :</i>	Pr MAMERI Nabil	Professeur ENP
<i>Examineur :</i>	Pr DROUCHE Madani	Professeur ENP
<i>Promotrice :</i>	Dr LEBIK Hafida	Maître de recherche B UDES
<i>Co-Promoteur :</i>	Dr KERCHICH Yacine	Maître de conférences A ENP

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département Génie de l'environnement En
collaboration avec
Centre de Développement des Énergies
renouvelables
Unité de développement des Équipements solaires
/EPST CDER



Mémoire de projet de fin d'études Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en genie de
l'Environnement

T H E M E

Application des procédés électrochimiques pour la désinfection de l'UDES

Présenté et soutenu publiquement le 14/07/2021 par
Melle BOUDRAA Abir et Melle BOUHENAF Naima

Sous la direction de
Dr Hafida LEBIK Maître de recherche B (UDES)
Dr Yacine KERCHICH Maître de conférence A (ENP)

Composition du jury :

<i>Président :</i>	Pr MAMERI Nabil	Professeur ENP
<i>Examineur :</i>	Pr DROUCHE Madani	Professeur ENP
<i>Promotrice :</i>	Dr LEBIK Hafida	Maître de recherche B UDES
<i>Co-Promoteur :</i>	Dr KERCHICH Yacine	Maître de conférences A ENP

ملخص

مياه الصرف الصحي محملة بكميات كبيرة من الملوثات المختلفة، مما يشكل مشاكل صحية وبيئية. إذن فالهدف الأساسي من هذه الدراسة هو تقدير كفاءة العملية الكهروكيميائية لتطهير مياه الصرف الصحي لوحدة تنمية الأجهزة الشمسية بوسماعيل ولاية تيبازة.

أجريت تجارب مخبرية على نطاق واسع للتحقق من تأثير كثافة التيار والمسافة بين الأقطاب الكهربائية والتهوية وطبيعة الإلكتروليت وتركيزه بالإضافة إلى وقت المعالجة على عملية التطهير.

أثناء التطهير، تم أخذ تركيز القولونيات الكلية كمؤشر على الكفاءة حيث تم تحقيق قيمة عالية لتطهير القولونيات الكلية، قدرت ب $5\log_{10}$ في غضون 15 دقيقة من وقت الأكسدة. كما تمت متابعة تركيز الكلوريدات وكمية الطاقة المستهلكة خلال العملية الكهروكيميائية.

الكلمات المفتاحية: إعادة استخدام مياه الصرف الصحي، التطهير الكهروكيميائي، العوامل المؤثرة، القولونيات، إستهلاك الطاقة

Abstract

Wastewater is highly loaded with pollutants and various contaminants, which poses a problem of sanitary and environmental risks. The primary goal of this study was to estimate the efficiency of electro-chemical process in the disinfection of Development Unite of Solar Equipment's (DUSE) Bou Ismaïl (Tipaza), wastewater. Laboratory scale experiments were conducted to investigate the influence of current density, inter-electrode distance, aeration, electrolyte nature and concentration as well as treatment time on the disinfection process. During disinfection, total coliforms concentration was taken as an efficiency indicator. A high value of $5\log_{10}$ reduction was achieved within 15 min oxidation time. Chlorine evolution was reported. On the other hand, energy consumption estimation, revealed a low requirement for the system use.

Keywords: wastewater reuse, electrochemical disinfection, parameters, coliforms, energy consumption.

Résumé

Les eaux usées sont fortement chargées en polluants et contaminants divers, ce qui pose un problème de risques sanitaires et environnementaux. L'objectif principal de cette étude était d'estimer l'efficacité du procédé électrochimique pour la désinfection des eaux usées de l'Unité de Développement des Equipements Solaire - Bou Ismaïl Tipaza (UDES). Des expériences à l'échelle du laboratoire ont été menées pour étudier l'influence de : la densité du courant, la distance inter-électrodes, l'aération, la nature et la concentration de l'électrolyte ainsi que le temps de traitement, sur le processus de désinfection. Pendant la désinfection, la concentration des coliformes totaux a été sélectionnée comme indicateur d'efficacité. Une valeur élevée de réduction de $5\log_{10}$ a été atteinte en 15 minutes d'oxydation. L'évolution de la concentration des chlorures a été rapportée. Ainsi que la consommation en énergie

Mots clés : réutilisation des eaux usées, désinfection électrochimique, paramètres, coliformes, consommation d'énergie.

Remerciement

Au nom de Dieu le Clément, le Tout Miséricordieux.

Nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir offert tout ce que nous possédons et de nous avoir donné le courage, la santé et la volonté pour terminer notre projet de fin d'étude.

Nous tenons, à remercier Monsieur M. TASSALIT Djilali, Directeur de l'Unité de développement des Équipements solaires /EPST CDER de nous avoir permis d'effectuer notre PFE au sein de l'UDES.

Nous adressons nos plus sincères remerciements tout particulièrement à notre encadreur, Dr LEBIK Hafida, pour sa disponibilité infaillible, son assistance, sa patience et tous les conseils qu'elle nous a prodigués durant toute la durée de notre stage.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur, Dr KERCHICH Yacine Maître de Conférence A à l'ENP, pour avoir codirigé et suivi de très près nos travaux, pour son aide et ses orientations pédagogiques dans l'élaboration de ce mémoire.

Nous remercions les membres de jury :Professeur MAMERI Nabil et Professeur DROUCHE Madani de l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de faire partie du jury de ce mémoire, tout en espérant qu'ils trouveront les qualités de clarté et de motivation qu'ils attendent.

Nos remerciements vont aussi à l'ensemble du personnel de l'Unité de développement des Équipements Solaires et en particulier à Madame MAHIEDINE Sara de nous avoir aidé, conseiller et encourager tout au long de nos travaux expérimentaux.

Il va sans dire que nous adressons un hommage tout particulier à l'ensemble de nos enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger et en particulier, à nos professeurs du département du Génie de l'Environnement pour les connaissances qu'ils nous ont transmises, pour leur écoute, leur disponibilité et l'encadrement dont ils nous ont fait bénéficié.

Enfin, nous ne terminerons pas sans remercier toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

À ceux à qui mon cœur depuis sa naissance n'a pas pu éprouver qu'amour et reconnaissance,

À ceux qui ont donné du sens à mon existence en m'offrant une éducation digne de confiance,

À mes chers parents.

À mes sœurs (Rania, Manel, Amani) et mes frères (Abdellah, Souhaib)

Je vous dédie ce travail pour vous remercier pour vos encouragements et votre soutien,

Je vous souhaite le plus radieux des avenir.

À tous mes amis spécialement

Akila, Chourouk, Chahra, Nesrine, Assia, Abir, Hannene, Yasmine, Soria, Maroua, Ilham, Saif Eddine, Oussama.

À toute ma famille

À mon binôme Abir, merci pour tous les bons moments qu'on a passés ensemble.

Je ne pense pas que cela soit courant mais je souhaite me remercier moi-même d'avoir réussi à arriver au bout de ce Master et de ce projet, malgré toutes les difficultés rencontrées.

Naima

Dédicaces

Je dédié ce travail

À la plus belle créature que dieu a créé sur terre ...à cette source de tendresse, de patience et de générosité...à ma mère !

À mon papa...tu as été et tu seras toujours un exemple pour moi par tes qualités humaines, ta persévérance et perfectionnisme.

En ce jour, j'espère réaliser l'un de vos rêves. Aucune dédicace ne saurait exprimer mes respects, ma reconnaissance et mon profond amour.

Puisse Dieu vous préserver et vous procurer santé et bonheur.

À mes belles, adorables et joyeuses sœurs avec qui j'ai passé les meilleurs moments de ma vie : Manar, Rihem, Marwa et Zahra ma sœur aînée, ma meilleure amie et mon idole.

À une famille au sein de laquelle je me suis toujours senti chez moi et qui m'ont toujours considéré comme une des leurs : Khali et tata Nadia et mes cousins Amel, Lamia, Mustapha Kamel, Rym et krimou.

À Naima chère amie avant d'être binôme merci pour tous les superbes moments que nous avons vécus ensemble

À tous mes meilleurs amis : Meriem, Kaouther, Imene, Nousseiba, Assia, Naima, Chahra, Anis et Yahia.

Abir

Table des matières

Liste des tableaux

Table des figures

Liste des symboles et abréviations

Introduction générale	12
Partie Théorique	14
I Généralités sur les eaux usées	15
I.1 Introduction	16
I.2 Origines des eaux usées	16
I.2.1 Les eaux usées agricoles	16
I.2.2 Les eaux usées industrielles	16
I.2.3 Les eaux usées domestiques	16
I.2.4 Les eaux de ruissellement	16
I.3 Composition et qualité des eaux usées	17
I.3.1 Paramètres physico-chimiques	17
I.3.2 Paramètres microbiologiques	19
I.4 Conséquences de la pollution des eaux	19
I.4.1 Les conséquences écologiques	19
I.4.2 Les conséquences sanitaires	20
I.5 Normes de rejet	21
I.6 Traitement des eaux usées	22
I.7 Réutilisation des eaux usées	23
I.8 Conclusion	24
II Les procédés de la désinfection des eaux usées	25
II.1 Introduction	26
II.2 Généralités sur la désinfection	26
II.2.1 Définition de la désinfection	26
II.2.2 Choix de la méthode de désinfection	26
II.2.3 Moyens de désinfection	26
II.3 La Désinfection électrochimique	28
II.3.1 Principe d'inactivation par DE	29
II.3.2 Mécanisme de génération de désinfectants	30
II.3.3 Paramètres influençant la DE	31
II.3.4 Avantages et Inconvénients	33
II.4 Cinétique d'inactivation	33

II.4.1	Modèle de Chick-Watson	33
II.4.2	Modèle de Hom	34
II.5	Conclusion	34
Partie Expérimentale		35
III Matériel et Méthodes		36
III.1	Introduction	37
III.2	Matériel et Verreries	37
III.3	Méthodes expérimentales	37
III.3.1	Désinfection Electro-chimique	37
III.3.2	Méthodes analytiques	38
IV Résultats et Discussion		43
IV.1	Objectifs de recherche	44
IV.1.1	Objectif global	44
IV.1.2	Objectifs spécifiques	44
IV.2	Hypothèses de recherche	44
IV.3	Caractéristiques de l'eau usée de l'UDES	44
IV.4	Optimisation des paramètres influençant la DE	45
IV.4.1	Densité du courant	45
IV.4.2	Type d'anode	46
IV.4.3	Temps de traitement	48
IV.4.4	L'aération	48
IV.4.5	Distance inter électrode	49
IV.4.6	Type d'électrolyte	50
IV.4.7	Concentration d'électrolyte	52
IV.5	Dosage des chlorures	53
IV.6	Caractéristiques de l'eau traitée	54
IV.7	Evaluation de la consommation énergétique	54
V Conclusion générale et perspectives		57
V.1	Conclusion générale	58
V.2	Perspectives	58
Références bibliographiques		59
Annexes		66

Liste des tableaux

I.1	Cas d'impact sanitaires de la pollution de l'eau en Algérie	21
I.2	Les normes des rejets liquides selon le JORA, 2006	22
II.1	Exemples d'études utilisant l'ED des eaux usées	31
IV.1	Les valeurs des paramètres des effluents de l'UDES	45
IV.2	Les valeurs des paramètres de leau traitée par DE	54
V.1	Liste des germes et leurs effets sur la santé humaine	67
V.2	Conséquences de la pollution d'eau sur l'environnement	68

Table des figures

I.1	Clasification des polluants	17
I.2	Exemples d'impacts écologiques de la pollution d'eau en Algérie	20
I.3	Étapes de traitement des eaux usées	23
II.1	Principe d'inactivation des microorganismes par DE	29
III.1	Schéma descriptif du dispositif expérimental	38
III.2	Le dispositif expérimental	38
III.3	Analyse des coliformes totaux : Préparation du milieu de culture	39
III.4	Analyse des coliformes totaux : la filtration sur membrane	40
III.5	Analyse des coliformes totaux : l'incubation	40
III.6	Image de colonies des CT formées après incubation	41
III.7	spectrophotomètre HACH-Lange DR 1900	41
III.8	kits LCK prêts à l'emploi	41
III.9	a.DCO mètre, b.DBO mètre et c.Turbidimètre	42
IV.1	Effet de la densité de courant appliquée sur l'abattement des CT	46
IV.2	Effet du type de l'anode sur l'abattement des CT au cours du temps	47
IV.3	Effet du temps de traitement sur le taux d'abattement	48
IV.4	Effet de l'aération sur la cinétique d'abattement des CT	49
IV.5	Effet de la distance inter électrode sur la cinétique l'abattement des CT au cours du temps	50
IV.6	l'influence de l'électrolyte support sur la cinétique l'abattement des CT au cours du temps	51
IV.7	Effet de la concentration d'électrolyte sur la cinétique d'abattement des CT en fonction du temps	52
IV.8	Évolution des chlorures lors de la DE	53
IV.9	Variation de l'énergie consommée et de l'abattement des CT au cours de la DE en fonction du temps $N_C T$	55
IV.10	Evolution de la consommation en énergie en fonction de la variation de CT en $\Delta(\log_{10}(N_C T))$	55
V.1	Types des micro-organismes dans les eaux usées	69

Liste des symboles et abréviations

AI : acier inoxydable.
BDD : boron doped diamond.
COT : Carbone organique total.
CT : coliformes totaux.
DBO5 : demande biochimique en oxygène.
DBP : désinfection by product.
DCO : demande chimique en oxygène.
DE : désinfection électrochimique.
Dech : Agent de dechloration **EC** : consommation énergétique.
E.coli : Escherichia coli.
I : courant.
j : densité du courant.
MOs : micro-organisms.
MES : les matières en suspension.
MTH : maladies à transmission hydrique.
NTU : unité néphélométrie.
OMS : Organisation Mondiale de la Santé
ONA : Office National de l'Assainissement
POA : procédés d'oxydation avancée.
STEP : station d'épuration des eaux usées.
UDES : unité de développement des équipements solaires.
UNICEF : Fonds des Nations unies pour l'enfance
UFC : unité formant colonie.
UV : ultrat -violets.

Introduction générale

Introduction générale

Aujourd'hui, plus de 700 millions de personnes souffrent de pénurie d'eau. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et l'UNICEF, la moitié de la population mondiale sera affectée par des sécheresses ou une diminution des ressources d'ici 2030 à cause notamment des bouleversements climatiques.

D'autre part, l'assainissement des eaux usées demeure aussi une problématique mondiale : près d'un tiers de la population mondiale ne bénéficie pas d'installations d'assainissement [1], c'est la cause du déversement de nombreux polluants dans les eaux de surfaces et les eaux souterraines.

Du point de vue environnemental, ces polluants qui peuvent être biologiques ou chimiques, impactent les écosystèmes à des degrés divers, allant jusqu'à menacer la survie d'espèces aquatiques[2] [3]. Aussi la contamination des eaux de surface par les micro-organismes (MOs) provoque de graves maladies (dysenterie, choléra...) qui tuent plusieurs millions de personnes chaque année dont une majorité d'enfants [4]. D'ailleurs il est estimé que 842000 décès résultent de ces contaminations[5].

Afin de prévenir la propagation des maladies hydriques, et le risque potentiel pour le milieu récepteur, il est primordial d'éliminer les micro-organismes pathogènes par une méthode de désinfection adéquate.

Dans les stations de traitement de l'eau, la chloration (une désinfection chimique) reste le procédé le plus utilisé. Cependant, la désinfection chimique, se trouve aujourd'hui contestée, à cause de la formation de produits dangereux, appelés également « Désinfection by-product (DBP) », ce qui constitue un risque pour la santé humaine [2]. De plus, ces méthodes comportent des risques d'exposition considérables associés à la production, au transport et à la manipulation de produits dangereux. D'autres parts, les procédés physiques tels que la filtration membranaire et l'ultra-violet (UV), sont limités par les caractéristiques des eaux à traiter. En conséquence, la recherche et le développement de technologies de désinfection alternatives se sont intensifiés. Aussi, la désinfection électrochimique (DE) est apparue comme un substitut viable à ses méthodes, dites conventionnelles. Cette méthode, déjà établie dans le domaine de production de l'eau potable et le traitement des eaux de piscine, reste limitée quand il s'agit des eaux usées, et ce, bien que son efficacité soit démontrée. Aussi, des efforts supplémentaires sont nécessaires pour améliorer les perspectives d'application de cet outil, surtout quand il s'agit de la sélection des conditions opératoires les plus appropriées et, en particulier, de la nature des électrodes et la durée du traitement qui devraient encore être complètement résolus.

Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés à l'électro-désinfection des eaux usées de l'Unité de Développement des Equipements Solaire (UDES), qui étant caractérisées par une forte contamination bactérienne, ne peuvent être déchargées/réutilisées. Cette étude de faisabilité permettra de développer, dans le futur, un système de traitement pour la récupération /réutilisation des rejets de l'UDES estimés à $35m^3$ /mois. Notre contribution est présentée en deux parties :

- Une bibliographique, consacrée à des rappels sur les eaux usées leurs types, composition et les normes qui régissent leurs rejets. Plus une synthèse sur les différents procédés de

désinfection tels la chloration, l'ozonation . . . , procédés d'oxydation avancés (POAs), y compris la DE.

- L'autre expérimentale, comprenant deux chapitres : où sont décrits le matériel et les méthodes utilisés, dans l'un et les résultats et discussion dans l'autre. A la fin du travail, une conclusion et des perspectives sont énoncées.

Partie Théorique

Chapitre I

Généralités sur les eaux usées

I.1 Introduction

Les eaux usées sont des milieux extrêmement complexes, altérées par les activités anthropiques, elles sont considérées parmi les facteurs les plus polluants et ont déjà causé beaucoup de dommages aussi bien humains qu'environnemental. Aussi, elles doivent être traitées avant toute réutilisation ou rejet dans les milieux récepteurs.

Le présent chapitre aborde les notions d'eau usée, de contaminants, de leurs impacts avec la santé humaine et l'environnement et enfin, de la réglementation concernant leur rejet, des méthodes de traitement et enfin de la possibilité de leur réutilisation.

I.2 Origines des eaux usées

Une eau usée est une eau chargée de substances minérales, organiques, ou biologiques, issues de l'activité humaine, et provoquant, à une concentration excédant la capacité d'autoépuration du milieu naturel récepteur, la dégradation de sa qualité [6].

Selon leurs sources, on distingue quatre grandes catégories d'eaux usées : Industrielle, agricoles, domestiques et les eaux de ruissellement.

I.2.1 Les eaux usées agricoles

Englobent celles issues de l'épandage (engrais, pesticides), les eaux blanches de laiterie et les eaux de déjections animales[7].

I.2.2 Les eaux usées industrielles

Elles sont issues des rejets des procédés industriels qui utilisent de l'eau dans la composition, la fabrication et l'entretien d'un produit, leurs caractéristiques varient d'une industrie à l'autre. En plus de matières organiques, azotées ou phosphorées, elles peuvent également contenir des produits toxiques, des solvants, des métaux lourds, des micropolluants organiques et des hydrocarbures [7]

I.2.3 Les eaux usées domestiques

Elles proviennent des habitations et sont généralement véhiculées par le réseau d'assainissement jusqu'à la station d'épuration. Constituant généralement l'essentiel de la pollution, elles comprennent les eaux grises résultant du lavage en cuisine qui sont peu chargées, et les eaux noires riches en matière fécales et en produits cosmétiques et qui sont plus difficiles à traiter [8]

I.2.4 Les eaux de ruissellement

Elles sont issues des pluies, d'arrosage des voies publiques, de lavage des caniveaux, des marchés et des cours, ce sont un mixte de tous les polluants rencontrés au cours du drainage et peuvent contenir, des métaux lourds et des toxiques [9].

I.3 Composition et qualité des eaux usées

Les eaux usées contiennent divers polluants et substances indésirables, qui selon le Journal Officiel de la République Algérienne [10] peuvent modifier les caractéristiques physiques, chimiques et/ou biologiques de l'eau et de :

- Créer des risques pour la santé de l'homme.
- Nuire à la faune et à la flore terrestre et aquatique.
- Porter atteinte à l'agrément des sites ou de gêner toute autre utilisation normale des eaux.

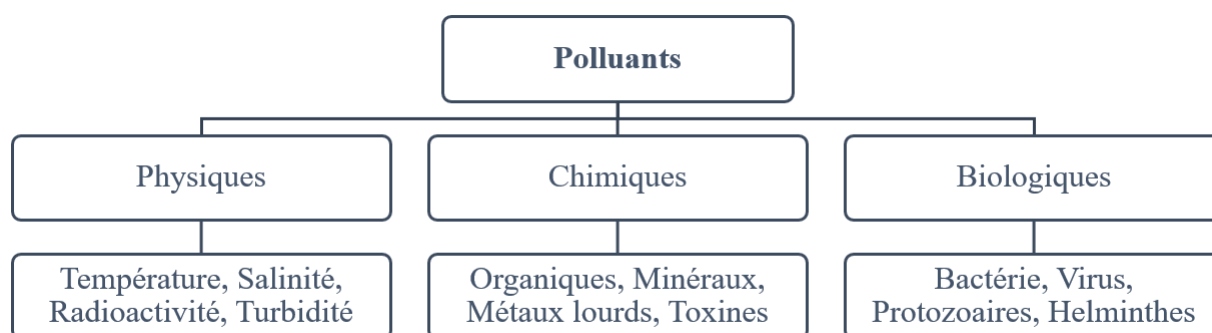


FIGURE I.1 – Classification des polluants [11-12]

L'appréciation globale de la qualité d'une eau de rejet est basée sur le suivi des paramètres suivants :

I.3.1 Paramètres physico-chimiques

I.3.1.1 Le pH

C'est un paramètre important dans le domaine du traitement des eaux. Il détermine la qualité de celles-ci vis-à-vis des ouvrages de traitement et d'adduction (agressivité, corrosivité et entartrage), ainsi que les traitements de correction apportés aux eaux avant et après traitement[13].

I.3.1.2 La turbidité

La turbidité est le caractère trouble d'une eau qui traduit la présence de matières insolubles : colloïdes et/ou matières en suspension d'origine minérale, organique et biologique. Cette turbidité doit être éliminée pour permettre à l'eau une bonne désinfection. Elle est mesurée en unités néphélométrie (NTU)[14].

I.3.1.3 La couleur

La couleur est due le plus souvent à la présence de matières organiques dissoutes ou colloïdales issues de la décomposition de la faune et de la flore. Ce sont, en général, les substances humiques (acides humiques et fulviques) qui confèrent à l'eau une forte coloration[13].

I.3.1.4 Les matières en suspension (MES)

Les matières en suspension sont des composés dont l'origine peut être minérale ou organique. A ces composés s'ajoutent les micro-organismes tels que les bactéries, planctons, algues et virus [13].

I.3.1.5 Le carbone organique total (COT)

Critère de pollution organique mesurant tous les composés organiques fixés ou volatils présents dans les eaux résiduaires : cellulose, huiles, sucres, suie ...etc[14].

I.3.1.6 La demande biochimique en oxygène (DBO)

Représente la quantité doxygène consommée lors de l'oxydation des composés du carbone par voie biologique à la température de 20°C dans l'obscurité. Par convention, les mesures de DBO sont limitées durant les cinq premiers jours. Elle évalue la teneur en matières organiques biodégradables, exprimée en mg O_2/l [14].

I.3.1.7 La demande chimique en oxygène (DCO)

Représente la quantité d'oxygène consommée par les matières réductrices contenues dans l'effluent. L'oxydant utilisé est le bichromate de potassium en milieu sulfurique à ébullition pendant deux heures. Elle évalue la teneur en matières organiques totales, biodégradables ou non et s'exprime en mg O_2 /l [14].

I.3.1.8 Les produits azotés

Ils peuvent être décelés sous forme organique ou minérale (ammoniaque, nitrites, nitrates). La teneur en azote organique et ammoniaque est donnée par la mesure de l'azote Kjeldahl total. Pour le cas des effluents domestiques, les teneurs respectives sont de : 8 à 40 mg/l de N d'azote organique, 12 à 50 mg/l de N d'ammoniaque et des traces de nitrates et nitrites [15].

I.3.1.9 La teneur en phosphates

Le phosphore est essentiel pour le déroulement des activités biologiques. Pour cela, il est important de connaître la teneur en ortho phosphates qui sont directement assimilables dans les processus biologiques. Les teneurs minimales sont de 5% pour l'azote et de 1% pour le phosphore par rapport à la DBO pour le cas des effluents domestiques [15].

I.3.1.10 La toxicité

Le test équitox permet de montrer la présence dans l'eau de substances inhibitrices de l'action biologique. C'est une notion très générale et dépend de nombreux facteurs (microorganisme, poisson, homme, l'âge de l'individu, etc.) qu'il faudrait préciser. Certains toxiques peuvent empêcher la biodégradation des eaux de rejets ou la minéralisation biologique des boues [15].

I.3.2 Paramètres microbiologiques

La détection directe des bactéries et des virus pathogènes, ainsi que des kystes de parasites protozoaires, nécessite des procédures coûteuses et longues, ainsi qu'une main-d'œuvre bien formée. Ces exigences ont conduit au concept d'organismes indicateurs de l'efficacité du traitement de la contamination fécale dans les stations de traitement de l'eau et des eaux usées, ainsi que de la détérioration et de la post-contamination de l'eau dans les systèmes de distribution [16] Les germes indicateurs sont cités ci-dessous.

I.3.2.1 Coliformes totaux

Ils appartiennent à la famille des Enterobacteriaceae et comprennent les bactéries aérobies et anaérobies facultatives, gram-négatives, non sporulées, en forme de bâtonnets, qui fermentent le lactose avec production de gaz dans les 48 heures à 35°C. Ce groupe comprend *Escherichia Coli*, *Enterobacter*, *Klebsiella* et *Citrobacter*. Ces coliformes sont rejetés en grand nombre dans les matières fécales humaines et animales, mais ils ne sont pas tous d'origine fécale [17].

Dans les stations de traitement des eaux, les coliformes totaux sont l'un des meilleurs indicateurs de l'efficacité du traitement de la station.

I.3.2.2 Coliformes fécaux

Les coliformes fécaux ou coliformes thermotolérants comprennent tous les coliformes qui peuvent fermenter le lactose à 44,5°C. Le groupe des coliformes fécaux comprend des bactéries telles que *E.Coli* ou *Klebsiella pneumoniae* [17].

La présence de coliformes fécaux indique la présence de matières fécales provenant d'animaux à sang chaud [17].

Les coliformes fécaux présentent un schéma de survie similaire à celui des pathogènes bactériens, mais leur utilité en tant qu'indicateurs de contamination protozoaire ou virale est limitée. Ils sont beaucoup moins résistants à la désinfection que les virus ou les kystes de protozoaires.

I.3.2.3 Streptocoques fécaux

Les streptocoques n'ont généralement pas de pouvoirs pathogènes importants. Présentes en très grand nombre dans l'intestin de l'homme, ils meurent assez rapidement dans le milieu naturel et leur présence dans le rejet ou dans l'eau de pluie est une indication de pollution fécale récente [18].

Un rapport entre le nombre de coliformes fécaux et le nombre de streptocoques fécaux supérieur à 1 indique la présence de fèces humaines fraîches ; une valeur inférieure à 0.6 indique des fèces animales.

I.4 Conséquences de la pollution des eaux

I.4.1 Les conséquences écologiques

La pollution engendrée par le déversement des eaux usées est l'une des formes de pollution les plus répandues et les plus dommageables pour l'ensemble des écosystèmes marins de la pla-

nète [19].

Lorsqu'elles ne sont pas traitées convenablement, les eaux usées d'origine domestique transportent avec elles des quantités excessives de nutriments, des bactéries pathogènes et de matière en suspension [20]. Le plus souvent, ces eaux sont rejetées près des côtes en zone infralittorale et peuvent ainsi affecter la faune marine. Leur rejet dans les milieux naturels est souvent associé à des désordres au niveau cellulaire et/ou physiologique chez les organismes ainsi qu'aux perturbations des habitats pouvant aller jusqu'à causer des changements irréversibles au niveau de la structure des communautés [19].

En annexe V.2 sont rapportées quelques conséquences de la pollution de l'eau sur l'environnement selon la nature des polluants.



FIGURE I.2 – Exemples d'impacts écologiques de la pollution d'eau en Algérie [16-18,21]

I.4.2 Les conséquences sanitaires

L'eau est le véhicule majeur des épidémies dans le monde. D'ailleurs, il est estimé que 842000 décès résultent des contaminations de l'eau. La pollution de certaines couches hydriques si elle a atteint des niveaux alarmants provoque des épidémies dues aux maladies à transmission hydrique (M.T.H)[22].

Les effets à long termes apparaissent à travers l'action des perturbateurs endocriniens qui troublent les hormones et provoquent des maladies graves, tel que le cancer. Les effets à court termes ont des conséquences variables sur la santé humaine et peuvent aller d'une simple infection (gastro-entérite) à des infections mortelles (choléra).

Le Tableau.1 cite les différents types de germes dans les eaux usées avec leurs effets sur la santé

de l'homme.

TABLE I.1 – Cas d'impact sanitaires de la pollution de l'eau en Algérie [23-25]

Maladie	Cas constaté en Algérie
Choléra	86 cas confirmés, 2 décès, 221 personnes hospitalisées et 6 régions touchées.(Août 2018)
Paludisme (Malaria)	2 morts et 82 cas enregistrés à Adrar 2020
Typhoïde	Cinq cas de fièvre typhoïde confirmés(Sétif 2019)

I.5 Normes de rejet

Les eaux usées collectées, dans les réseaux urbains ou les eaux usées directement émises par les industries, ne doivent être rejetées dans un milieu récepteur naturel (rivière, lac, littoral marin, ou terrain d'épandage) que lorsqu'elles correspondent à des normes fixées par la voie réglementaire.

Le Décret exécutif n°93-160 du 10 Juillet 1993, du Journal Officiel de la République Algérienne réglementant les rejets d'effluents liquides dans son chapitre I, article 2, fixe, en son annexe 1, les valeurs limites de ce rejet. Ces mêmes valeurs viennent d'être renforcées par un nouveau texte réglementaire ; le Décret Exécutif n°06-141 du 20 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 19 Avril 2006, section 1, article 3.

Les valeurs limites maximales de rejet d'effluents fixées par ces deux décrets sont regroupées dans le Tableau I.2.

TABLE I.2 – Les normes des rejets liquides selon le JORA, 2006

Paramètres	Valeurs limites
Température	30 C
PH	6,5 à 8,5
MES	35 mg /l
DBO5	35 mgO ₂ /l
DCO	120 mgO ₂ /l
Azote kjeldahl	30 mg/l
Phosphates	02 mg/l
Phosphore total	10 mg/l
Cyanures	0,1 mg/l
Aluminium	03 mg/l
Cadmium	0,2 mg/l
Fer	03 mg/l
Manganèse	01 mg/l
Mercure total	0,01 mg/l
Nickel total	0,5 mg/l
Plomb total	0,5 mg/l
Cuivre total	0,5 mg/l
Zinc total	03 mg/l
Huiles et Grasses	20 mg/l
Indice phénols	0,3 mg/l
Fluor et composés	15 mg/l
Chrome total	0,5 mg/l
Composés organiques chlorés	05 mg/l

I.6 Traitement des eaux usées

Le traitement des eaux usées est l'ensemble des procédés visant à dépolluer l'eau usée avant son retour dans le milieu naturel ou sa réutilisation et ce, afin d'obtenir une eau traitée conforme aux normes de rejet.

Ci-dessous le récapitulatif des différentes étapes de ce traitement[26].

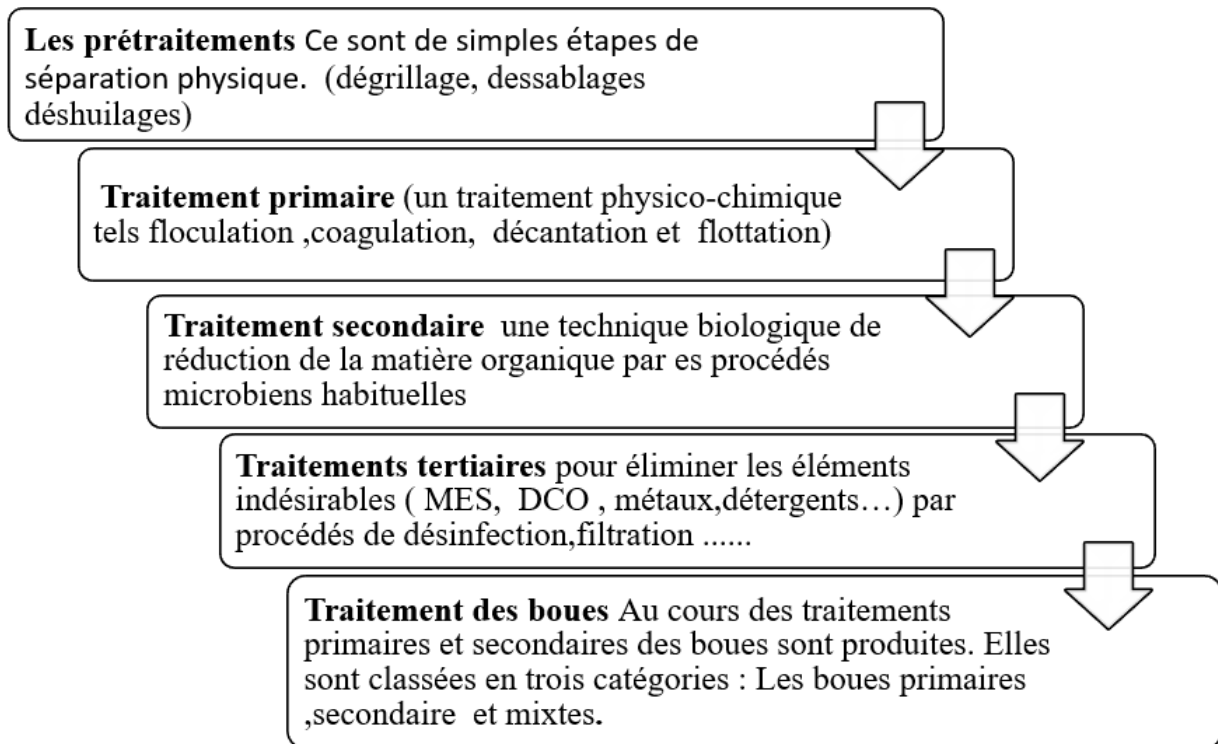


FIGURE I.3 – Étapes de traitement des eaux usées

Selon le rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau publié en 2017, l'Algérie collecte $1570.4Mm^3/an$ d'eau usée. Cependant, seulement $275.2Mm^3$ sont traités, le reste est déversé dans le milieu récepteur : lacs et rivières ou rejeté directement à la mer sans aucun traitement préalable [27].

I.7 Réutilisation des eaux usées

La réutilisation des eaux usées non traitées est formellement interdite par la loi n°83-03 du 5 février 1983, relative à la protection de l'environnement et la loi n°83-17 du 16 juillet 1983, portant le code des eaux. Mais les eaux usées traitées, constituent une forme de valorisation d'un potentiel hydrique important, qui permet d'alléger le recours aux ressources hydriques conventionnelles, notamment les eaux de surface et souterraines très vulnérables. Actuellement, les eaux usées épurées sont fortement sollicitées par les agriculteurs (Réutilisation pour l'irrigation), les industriels (Réutilisation industrielle) et les collectivités locales (Réutilisation municipale).

En Algérie, la présence de normes de rejet spécifiques à la réutilisation des eaux usées en agriculture (Décret exécutif n°93-160 du 10 juillet 1993 et décret exécutif n°06-141 du 19 avril 2006) ainsi que la présence de textes réglementaires fixant la modalité de réutilisation des eaux usées et la liste des cultures et les conditions de leur irrigation par les eaux usées épurées (Décret exécutif n°07-149 du 20 mai 2007 et l'arrêté interministériel du 2 janvier 2012) constituent une promotion de projets de réutilisation des eaux usées épurées [27].

En Algérie, seuls 7% des eaux usées traitées sont réutilisées pour l'irrigation.

I.8 Conclusion

Les eaux usées déversées dans la nature, chargées de toute sorte de contaminants ont déjà causé beaucoup de dommages aussi bien humains que environnementaux. Alors qu'on peut facilement les récupérer, les traiter et les transformer en une nouvelle source hydrique, exploitable par différents secteurs, en passant par des procédés simples et adéquats ce qui nous ramène à la désinfection.

Chapitre II

Les procédés de la désinfection des eaux usées

II.1 Introduction

L'utilisation massive des eaux à des fins domestiques, industrielles et agricoles entraîne des pollutions de plus en plus complexes, rendant difficile le traitement de ces eaux de rejets. Ces nuisances nous amènent à chercher les procédés les plus adéquats afin de réduire la charge polluante, voire l'éliminer, avec une efficacité maximale, tant du point de vue de la rentabilité de l'opération, que de celui de son coût économique. Parmi ces procédés nous citerons en particulier l'étape de désinfection.

Cette étape vise l'inactivation ou la destruction des microorganismes pathogènes présents dans les eaux usées. Elle joue un rôle important dans la lutte contre les maladies d'origine hydrique.

II.2 Généralités sur la désinfection

II.2.1 Définition de la désinfection

La désinfection consiste à éliminer physiquement des micro-organismes (bactéries, virus, parasites, levures, algues, moisissures) ou animalcules (crustacés, nématodes, larves...) de l'eau et/ou inactiver chimiquement ou physiquement les micro-organismes. L'objectif visé n'est pas une stérilisation de l'eau, c'est-à-dire l'absence de toute vie microbiologique, mais l'absence d'organismes pathogènes. L'efficacité de la désinfection se mesure en pourcentage d'abattement (élimination physique) et/ou d'inactivation (action chimique d'un produit désinfectant ou physico-chimique d'un rayonnement UV) des micro-organismes présents dans l'eau [28].

II.2.2 Choix de la méthode de désinfection

Pour que la désinfection soit efficace, les eaux usées doivent préalablement subir un traitement approprié. Le choix d'un moyen de désinfection doit se faire en considérant les contraintes techniques, économiques et environnementales. En ce sens, le mode de désinfection idéal est celui qui présente, notamment, les caractéristiques suivantes[29] :

- Efficacité sur la plupart des microorganismes pathogènes (bactéries, virus et parasites) sous différentes conditions ;
- Absence de sous-produits indésirables formés à la suite de son utilisation ;
- Produit sécuritaire pour les humains et la vie aquatique ;
- Facilité d'utilisation ;
- Coûts d'investissement et d'exploitation économiquement viables.

II.2.3 Moyens de désinfection

Les moyens de désinfection les plus couramment utilisés dans le monde sont : la chloration, le rayonnement ultraviolet, la filtration et le lagunage. L'ozonation est peu répandue mais elle connaît un certain essor en raison de son efficacité antimicrobienne et de certains autres bénéfices environnementaux (dont la réduction des concentrations de substances émergentes)[29]. Par ailleurs, l'acide peracétique, tout comme les procédés d'oxydation avancée, pourraient constituer une des solutions de remplacement à considérer.

II.2.3.1 Chimiques

Le chlore

Grâce à leur efficacité prouvée et leur coût économique, le chlore et ses dérivés sont les agents les plus utilisés pour la désinfection des eaux de rejets. Ces agents ont la capacité d'éliminer à la fois les bactéries, les virus, les spores et les champignons [30]. Le chlore a un effet rémanent qui garantit une désinfection continue de l'eau. Le chlore gazeux Cl_2 , l'hypochlorite de sodium/calcium/lithium et les isocyanurates chlorés sont tous appelés "chlore" et se dissocient dans l'eau pour donner l'acide hypochloreux $HClO$ qui, à son tour, peut se dissocier en partie et donner l'ion hypochlorite ClO^- à pH basique. Ces deux espèces forment le chlore actif ou le chlore libre responsable de l'oxydation des polluants.

Le chlore peut s'associer aux composés de la matière organique dégradée (composés azotés acides aminés, ammonium, etc.) pour former des sous-produits de chloration qui peuvent être des chloramines, des trihalométhanes et des acides halo-acétiques [31].

L'ozone

L'ozone peut être utilisé en désinfection des eaux usées, Il permet l'amélioration de la qualité physico-chimique de l'effluent lors du traitement. En solution aqueuse, l'ozone réagit instantanément avec les composés minéraux réducteurs, tels le fer ferreux, le manganèse, les nitrites... L'action de l'ozone sur les matières organiques est également rapide et poussée [32]. L'ozone est reconnu pour son très large spectre germicide : Les virus, les bactéries et les protozoaires sont sensibles à l'action de l'ozone et Les virus montrent une plus grande sensibilité à l'ozone qu'au chlore[28].

L'acide peracétique

Ce désinfectant présente différentes caractéristiques favorables à son utilisation en désinfection d'eaux usées ; son potentiel bactéricide est reconnu et utilisé en industrie. L'acide peracétique (APA) est un mélange d'acide acétique et de peroxyde d'hydrogène. C'est un désinfectant principalement utilisé en industrie agro-alimentaire. Son activité désinfectante est basée sur la libération d'oxygène actif. Le produit de dégradation est l'acide acétique, composé parfaitement biodégradable [28].

Différentes études de désinfection d'eaux usées par l'acide peracétique ont montré sa capacité à éliminer les germes témoins de contamination fécale. Une dose de 5 à 7 mg/l et un temps de contact supérieur à 10 minutes permettent d'abattre plus de 3 unités log de coliformes thermotolérants sur des effluents secondaires [33].

II.2.3.2 Physique

Les rayonnements UV

Les rayonnements ultraviolets (UV) sont aujourd'hui couramment employés en désinfection des eaux usées ces rayonnements sont des ondes électromagnétiques dont le spectre se situe entre 100 et 400 nm et qui véhiculent une énergie importante. Les rayons UV dont la longueur d'onde est comprise entre 200 et 280 nm sont germicides, avec une efficacité maximale à 254 nm. L'action germicide des UV est essentiellement localisée au niveau des molécules d'acides nucléiques (ADN et ARN) : l'énergie photonique des UV provoque la création, sur ces molécules, de doubles liaisons entre des nucléotides thymines adjacents. Ceci conduit à un blocage de la réplication du matériel génétique, arrêt de la multiplication cellulaire et mort des cellules. Cependant, la désinfection UV ne peut fonctionner que si l'eau est claire. Si l'eau est trouble, il faut utiliser un préfiltre. Aussi, la dégradation photochimique causée par les UV peut être

réparée chez certains organismes si la dose d'UV est trop faible, par un processus de photoréactivation.

Le lagunage

Le traitement des eaux usées par lagunage (étangs aérés et non aérés) se caractérise notamment par sa grande simplicité et son grand pouvoir tampon à l'égard des variations de charges organiques et hydrauliques. Le lagunage n'est pas en soi une méthode de désinfection, mais les microorganismes entériques humains y survivent difficilement. L'efficacité microbiologique des étangs aérés dépend du temps de rétention et du nombre de cellules. Ainsi, plus le temps de rétention dans les étangs est long et plus le nombre de cellules est grand, plus l'élimination des microorganismes est importante [29].

La filtration

La filtration permet de retenir les particules solides grossières, les matières organique et minérale contenues dans l'eau ainsi que les microorganismes adsorbés sur celles-ci[34]. Par ailleurs, sa fonction principale consiste à réduire la turbidité, ce qui favorise une désinfection efficace. En effet, les microorganismes peuvent s'adsorber sur les particules et échapper à l'inactivation par les désinfectants si la filtration n'est pas assurée [35] Il est possible d'utiliser plusieurs types de filtres (filtres à sable, filtres à diatomite, etc.) mais on peut aussi faire appel au charbon actif en grain (CAG) ou à la zéolite pour une adsorption plus efficace [35].

II.2.3.3 Procédés hybrides

Les techniques hybrides utilisent des processus mixtes. Parmi ces techniques, on cite : les procédés d'oxydation avancée (POA). Ces derniers, font partie de ces nouvelles technologies prometteuses, et ce, grâce à leur performance prouvée dans l'épuration et le traitement de différents types de matrices. Les POA se basent sur la génération in-situ d'espèces oxydantes très puissantes tels les radicaux hydroxyles OH^\bullet [36] qui résultent de la rupture homolytique ou radicalaire d'une liaison covalente donnant un électron à chaque molécule d'eau, lui conférant son caractère très polaire et très réactif [37]. La durée de vie des radicaux hydroxyles est estimée à 10^{-9} secondes[38]. Ils peuvent réagir avec les molécules organiques, inorganiques et microbiennes à des cinétiques plus importantes (arrivant à 109 fois) que celles d'autres espèces oxygénées comme l'ozone par exemple [39]. Les POA regroupent : l'électrochimie, la sono-chimie, l'oxydation homogène, la photo-oxydation (H_2O_2/UV , O_3/UV), la photocatalyse, le photo-Fenton et la radiolyse. Les avantages de ce procédé par rapport à ceux conventionnels de types biologique ou physico-chimique sont nombreux tels que :

Fonctionnement facile du procédé ;

Pas de déchets secondaires ;

Capacité à traiter des rejets à composition variable.

II.3 La Désinfection électrochimique

De nos jours, la chloration est toujours la méthode la plus utilisée pour inactiver les microorganismes pathogènes dans l'eau. Cependant, on s'inquiète de plus en plus des sous-produits chlorés indésirables (Trihalométanes) générés par le chlore. Ces dernières années, d'autres procédés ont été examinés pour la désinfection de l'eau, parmi lesquels on cite : la désinfection

électrochimique.

La DE appartient aux méthodes physico-chimiques des systèmes de désinfection. La DE est la destruction ou l'inactivation des micro-organismes (MOs) à travers une forte concentration d'oxydant généré in situ. Le traitement ne nécessite que l'application d'un courant électrique, permettant ainsi une gestion facile du processus.

II.3.1 Principe d'inactivation par DE

La DE peut se faire par deux méthodes principales, l'oxydation directe qui a lieu à la surface de l'électrode où l'inactivation provient des radicaux hydroxyles, du peroxyde d'hydrogène et de l'ozone, ou de l'effet de champ électrique ; d'autre part, les processus indirects reposent sur la génération de divers oxydants en solution aqueuse tels que le persulfate ou les espèces dérivées du chlore [31].

L'action désinfectante implique généralement la lyse cellulaire, c'est-à-dire la dissolution de la membrane cellulaire de l'organisme cible, provoquant ainsi un changement de la perméabilité cellulaire et l'inhibition de l'activité enzymatique. Les produits chimiques générés ont une incidence sur les fonctions des membranes : ils modifient la pression osmotique, la perméabilité et les processus de transport des molécules et des ions à travers la membrane tout en inhibant les processus métaboliques, la bio-oxydation et la division cellulaire. Un objectif supplémentaire est représenté par l'oxydation de la teneur en matière organique résiduelle dans l'eau, favorisant la mort des microorganismes survivants en raison d'un manque de nutriments. L'action des biocides électro-générés in situ est encore renforcée par la synergie avec le champ électrique et, dans certains cas, avec des changements de pH, ce qui entraîne une inactivation rapide et efficace de plusieurs micro-organismes[40].

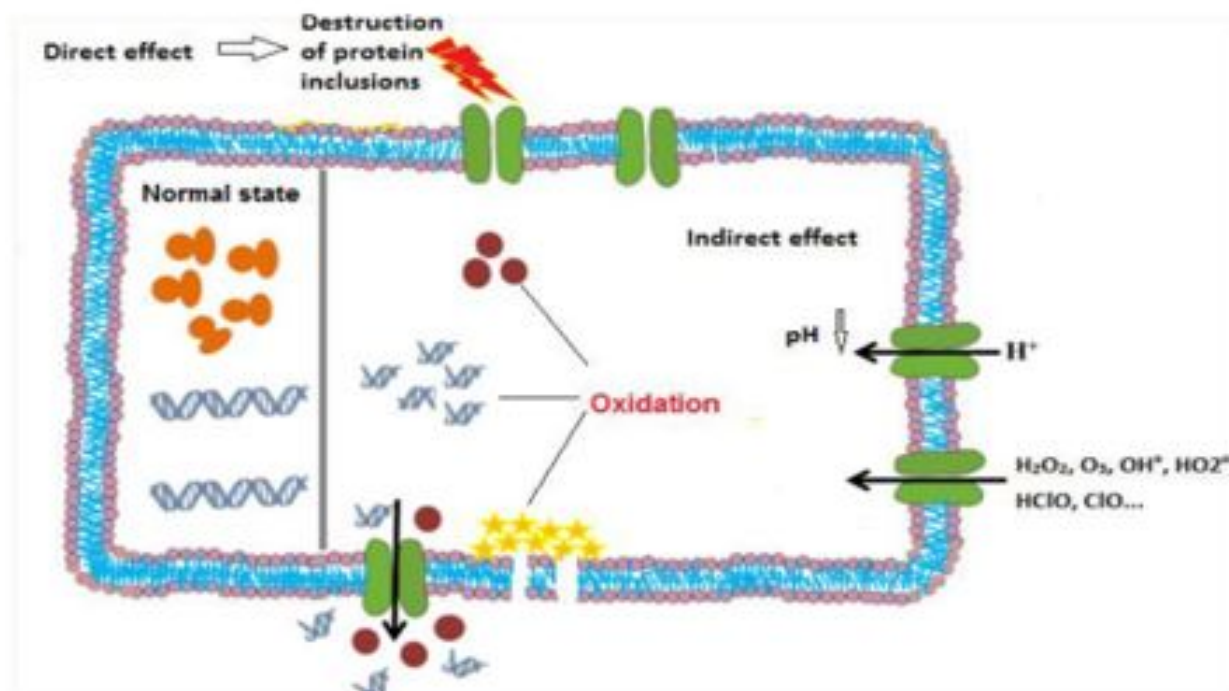


FIGURE II.1 – Principe d'inactivation des microorganismes par DE[40]

II.3.2 Mécanisme de génération de désinfectants

Les désinfectants peuvent être produits en anodique et plus rares en réactions cathodiques. Le chlore gazeux Cl_2 , l'hypochlorite de sodium/calcium/lithium et les isocyanurates chlorés sont tous appelés "chlore" et se dissocient dans l'eau pour donner l'acide hypochloreux HClO qui, à son tour, peut se dissocier en partie et donner l'ion hypochlorite ClO^- à pH basique. Ces deux espèces forment le chlore actif ou le chlore libre responsable de l'inactivation des MOs [42].

Pour une meilleure désinfection on tend à privilégier la formation de HClO car il est plus efficace que ClO^- . Pour se faire, le pH doit être inférieur à 7,5 [43].

Le chlore peut être produit à la surface de l'anode, la quantité de chlore générée est directement proportionnelle au temps de traitement et au courant appliqué ; cependant, il existe d'autres réactions de spéciation qui sont fortement influencées par le pH, y compris la disproportion à l'acide hypochloreux et l'hydrolyse à l'hypochlorite comme indiqué ci-dessous :



Il existe d'autres réactions qui pourraient se produire pendant l'électrolyse, en particulier la production de perchlorate due à la présence de radicaux hydroxyles, comme indiqué :



La formation de perchlorate peut être réduite en utilisant de faibles densités de courant. La présence de chlorure ou son ajout au cours du processus d'ED améliore l'épuisement des bactéries comme indiqué dans le tableau II.1. Jusqu'à présent, dans les traitements de désinfection traditionnels. D'autres oxydants peuvent être formés électrochimiquement en particulier le groupe peroxy, composé d'oxydants qui sont caractérisés par la présence de liaisons oxygène dans la molécule. On signale une production d'oxydation $\text{C}_2\text{O}_6^{2-}$, $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ et $\text{P}_2\text{O}_8^{4-}$ à l'aide d'électrodes PbO_2 et BDD. Néanmoins, à l'heure actuelle, leur utilisation dans la désinfection de l'eau est limitée[31].

TABLE II.1 – Exemples d'études utilisant l'ED des eaux usées

Traitement	Conditions de processus	Résultat
La génération du chlore et la désinfection	Électrode à dimensions anodiques stable enrobée utilisant une colonne avec un débit de 75 ml/smin^{-1} . 260 mg.l^{-1} de chlore. Courant de 0,4 A	99% d'élimination de l'Escherichia coli (Ecoli) [31]
L'électro-désinfection des eaux usées municipales.	FeO_2 en utilisant une densité de courant de 30 A m^{-2} . Concentration de chlorure de 150 mg.l^{-1} .	99% d'élimination de l'Ecoli [31]
Technique d'électro-désinfection dans la régénération de l'eau.	2 électrodes monopolaires BDD/SI. $12,5 \text{ cm}^2$ de surface, NaCl d'une concentration de 100 mg/l, courant de 3A.	99% d'élimination de l'E.Coli[46]
Inactivation des légionelles avec des électrodes en diamant.	Electrodes BDD, addition de carbonates, de courant 50 mAcm^{-2} , des temps de contact courts (<5min)	Inactivation des légionelles [45]
Inactivation d'E.Coli à l'aide d'une nouvelle électrode à nanotube TIO_2 . Anodes de nanotubes de tio_2	utilisant une cellule de type filtre presse avec de l'acier inoxydable comme cathodes, densité de courant $2,63 \text{ mAcm}^{-2}$.	L'Ecoli est complètement épuisé [44]

II.3.3 Paramètres influençant la DE

Les types et les concentrations des oxydants formés dépendent strictement des conditions de fonctionnement adoptées. Parmi les paramètres qui influencent le traitement d'ED, on peut citer : la densité du courant, le type d'électrode, le pH, la conductivité, le temps de traitement, les caractéristiques de l'eau à désinfecter, la température...[47]

II.3.3.1 Densité du courant

La densité du courant est exprimée sous la forme d'un rapport entre l'intensité du courant et la surface de l'électrode. C'est un paramètre très important à prendre en considération dans un procédé électrochimique car, il contrôle la cinétique d'oxydation et aussi la quantité de radicaux produits [48]. Une augmentation de la densité du courant peut entraîner une hausse de la concentration en radicaux libres dans la solution à traiter. Toutefois, il faut noter qu'une augmentation de la densité du courant ne signifie pas toujours une augmentation des rendements épuratoires d'un système électrolytique [49], par contre, elle va sûrement engendrer une hausse de la consommation énergétique.

II.3.3.2 Type d'électrode utilisée

Le choix de l'électrode, surtout de l'anode, dans un procédé électrochimique est primordial. Une anode est définie par sa sélectivité et sa surtension en oxygène. En effet, il existe des anodes à forte surtension en oxygène (BDD ; FeO₂ ; RuO₂ ; SnO₂ ; PbO₂) qui favorisent la génération des radicaux hydroxyles aux dépens de l'oxygène [49]. Cette dernière réaction est dite secondaire ou indésirable si l'objectif est la dégradation des polluants qui se trouvent dans l'eau à traiter. Elle peut avoir lieu si les anodes utilisées sont à faible surtension en oxygène. En effet, les bulles d'oxygène peuvent bloquer les sites actifs sur l'électrode et compromettre, par conséquent, le transfert d'électrons et par la suite l'efficacité de la dégradation des contaminants [51]. Outre, la conductivité électrique, la stabilité physico-chimique et l'activité oxydante d'une anode doivent être significatives, alors que le ratio coût/durée de vie doit être faible.

II.3.3.3 Température du milieu

L'efficacité du traitement par oxydation électrochimique des eaux contaminées dépend aussi de la température du milieu. En général, la vitesse de réaction chimique et ou, électrochimique augmente avec l'accroissement de température du milieu. Cependant le traitement à des températures élevées diminuera la vie des électrodes, en effet la plupart des anodes en métaux ne peuvent résister aux attaques des oxydants abondamment générés[52].

II.3.3.4 Caractéristiques initiales de l'effluent ou la solution à traiter :

La composition initiale ainsi que les caractéristiques physico-chimiques de la solution à électrolyser définissent majoritairement l'efficacité d'un procédé électrochimique. Premièrement, la teneur de cette solution en sels influence d'une part sa conductivité, et d'autre part la formation des oxydants à partir d'halogénures (Cl⁻-Br⁻...etc) Par exemple, Naumczyk et al [53] ont démontré qu'on peut produire du chlore actif à partir d'une eau usée de l'industrie du textile très riche en Cl⁻ selon le mécanisme suivant :



Deuxièmement, la concentration en polluants contenus dans la solution à traiter influence leur taux de dégradation [50]. Une forte concentration en polluants peut soit générer une hausse de la cinétique d'abattement grâce à un meilleur transfert de masse, soit à une diminution de l'efficacité du procédé causée par la compétition entre les polluants et leurs sous-produits de dégradation[51].

II.3.3.5 pH

Le pH doit être pris en considération car il affecte aussi le processus électrochimique, surtout via l'oxydation indirecte. En effet, le pH détermine la dominance de l'une des deux espèces chlorées : HClO et ClO^- [54].

II.3.4 Avantages et Inconvénients

Comme tous les procédés d'épuration des eaux, l'ED possède des avantages et des inconvénients qui favorisent ou limitent ses domaines d'applications [55-57].

II.3.4.1 Avantages

- Simplicité et facilité d'utilisation.
- Facilité d'automatisation et compacité.
- Technologie propre.
- Versatilité.
- Efficacité sur une large gamme de micro-organismes.

II.3.4.2 Inconvénients

- Nécessité d'ajout de sels pour les solutions à faible conductivité.
- Nécessité de nettoyage des électrodes.
- Coûts de fonctionnement, et d'investissement élevés.
- Génération de sous-produits d'oxydation.

II.4 Cinétique d'inactivation

La cinétique de désinfection a un profil caractérisé par trois régimes distincts. Le premier présente un épaulement de la courbe ; c'est la partie où une lente désactivation des microorganismes a lieu. Au second régime, une réduction log-linéaire de la concentration des microorganismes est observée. La dernière partie du processus est marquée par une traînée caractérisant le ralentissement de la réduction des microorganismes dans le milieu traité. Afin de décrire les différents régimes de désactivation des microorganismes, plusieurs modèles ont été proposés :

II.4.1 Modèle de Chick-Watson

Introduit en 1908, le modèle de Chick-Watson [58-59] est encore à l'heure actuelle le modèle le plus connu et le plus employé. Il décrit l'inactivation des microorganismes basée sur le concept Ct , stipulant une relation de premier ordre entre la concentration du désinfectant et le temps d'exposition qui produit un niveau spécifique de désactivation :

$$\ln \frac{N}{N_0} = -kC^n.t$$

Où

- N : nombre de microorganismes à l'instant t (CFU/ml) ;
- N_0 : nombre initial de microorganismes (CFU/ml) ;
- C : concentration du désinfectant (doit être constante) ;
- n : coefficient de dilution spécifique au désinfectant, le pH et la température ;
- K : constante de réaction (ou d'élimination des microorganismes) exprimée en CFU/s ;
- T : temps de contact (s).

La relation de Chick-Watson corrèle assez bien les données expérimentales pour un certain nombre de désinfectants et de microorganismes. Cependant, dans plusieurs conditions (microorganismes résistants, forte turbidité, présence d'agglomérats, etc.) des déviations de cette relation linéaire sont observées.

II.4.2 Modèle de Hom

Le modèle de Hom [60], introduit en 1972, définit l'inactivation comme égale à :

$$-\log \frac{N}{N_0} = -k_{10}.C^m.t$$

En ajoutant l'exposant m au temps, le modèle de Hom permet de décrire les courbes en épaulement ($m > 1$) ou en traînée ($m < 1$) qui sont observées en conditions réelles. Cependant, en plus d'ajouter un paramètre supplémentaire (et donc d'augmenter le niveau de complexité), la détermination de m est faite de manière purement empirique et dépend intégralement des conditions du moment. Même si ce paramètre était déterminé pour chaque usine et microorganisme à plusieurs périodes de l'année, cela ne saurait représenter les conditions changeantes des caractéristiques de l'eau et des microorganismes.

II.5 Conclusion

La DE est un domaine technologique très innovant et en cours de développement. Cependant, malgré tous les progrès réalisés dans la recherche fondamentale, les études pilotes et l'application pour de nombreuses technologies de la DE reste très limitée plus particulièrement dans le domaine de traitement des eaux usées. Dans cette perspective, nous nous sommes intéressés à la DE des eaux usées de l'UDES, et ce, afin de contribuer à la compréhension de la DE et d'examiner la faisabilité d'un tel procédé pour un rejet réel.

Partie Expérimentale

Chapitre III

Matériel et Méthodes

III.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de fournir un aperçu détaillé de l'ensemble du matériel, dispositifs, techniques analytiques, ainsi que du protocole expérimental utilisés au cours de ce travail

III.2 Matériel et Verreries

Le matériel utilisé au cours des expériences au laboratoire :

- Electrodes :en acier inoxydable 316 anti corrosion $4 \times 10 \text{ cm}^2$.
- Electrodes en BDD
- Alimentation en courant continu (ATTEN APS 3003D : 0-30 V ; 0-5A).
- Rampe de filtration.
- Pompe à vide.
- Spectrophotomètre DR 1600
- Système de DBO
- Turbidimètre
- Multi-paramètre
- Eprouvettes, Bêchers, Bouteilles en verre, Entonnoirs et Verres de montre.
- Agitateur et barreaux magnétique.
- Autoclave, Etuves et Incubateur.
- Papier filtre et Membranes stérilisées de $0.45\mu\text{m}$.
- Micropipettes.
- Eau ultra-pure qualité milli-Q

III.3 Méthodes expérimentales

III.3.1 Désinfection Electro-chimique

Tous les essais de la DE ont été réalisés dans un réacteur en batch (III.1 et III.2), constitué d'un Becher en verre ayant une capacité de 250ml et de deux électrodes en acier inoxydable. L'anode et la cathode étaient toutes les deux d'une surface de 40 cm^2 , placées parallèlement à une distance de 4cm. Le système étant alimenté par un courant continu, est continuellement agité par un barreau magnétique et des échantillons sont prélevés à des intervalles de temps réguliers afin de déterminer la cinétique de l'abattement des micro-organismes. Après le prélèvement de l'échantillon, la réaction est immédiatement stoppée par l'ajout d'un agent de déchloration (Thiosulfate de sodium).

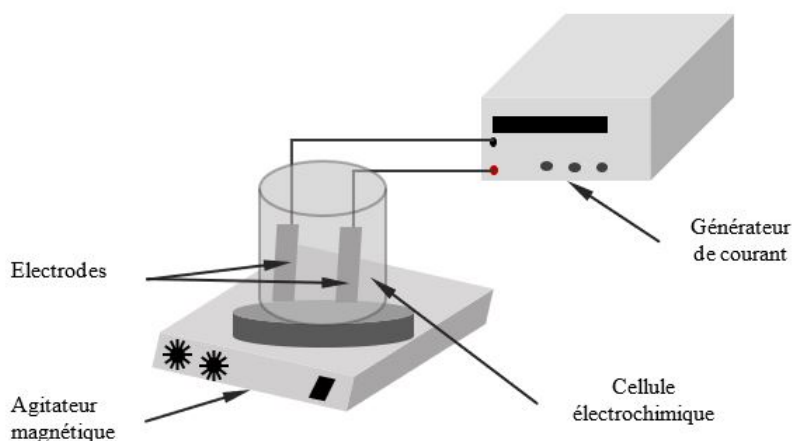


FIGURE III.1 – Schéma descriptif du dispositif expérimental



FIGURE III.2 – Le dispositif expérimental

III.3.2 Méthodes analytiques

III.3.2.1 Analyse microbiologique

Dans le présent travail, les coliformes totaux ont été sélectionnés comme indicateurs de pollution microbiologique. Le dénombrement des coliformes totaux s'est fait par la méthode de filtration. Un volume d'eau (100 ml) est filtré sur une membrane filtrante stérilisée de 0.45 μm , qui est déposée sur la gélose TTC. Cette gélose est ensuite incubée pendant 24 heures à 37°C. Au terme de la période d'incubation, les coliformes totaux retenus sur la membrane filtrante forment des colonies jaune orangé entourées d'un halo jaune et des colonies vert ou bleu.

Préparation du milieu de culture

Le milieu de culture utilisé est une Gélose lactosée au Tergitol 7 et au TTC (appelé communément gélose TTC), composé de : Composants nutritifs (peptone 10,0 g, extrait de viande 5,0 g, extrait de levure 6,0 g, lactose 20,0 g), agent sélectif (Tergitol 7 100 mg), indicateurs (TTC Chlorure de triphényltétrazolium 25 mg, Bleu de bromothymol 50 mg) et un gélifiant (agar 15,0 g).

Dans notre cas, nous avons utilisé un milieu pré-préparé lyophilisé à utiliser après dosage comme suit :

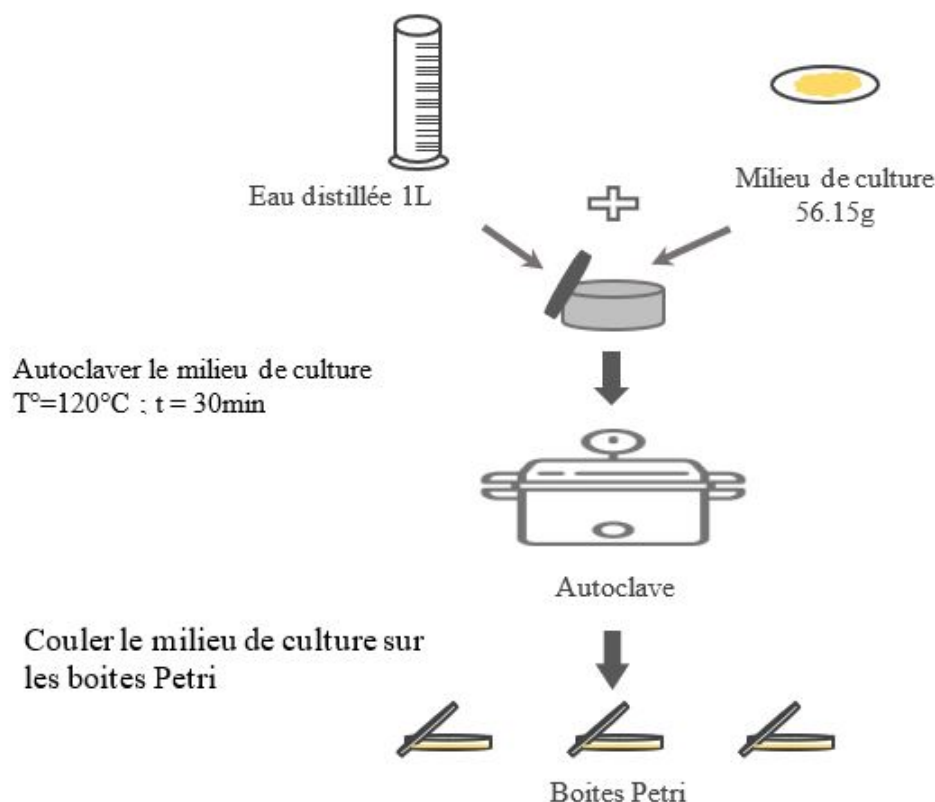


FIGURE III.3 – Analyse des coliformes totaux : Préparation du milieu de culture

Filtration sur membrane et incubation

Le principe est que le passage de l'échantillon à travers une membrane filtrante 0.45µm empêche le passage des cellules, dont la dimension est supérieure à celle des pores de la membrane, ce qui permet de concentrer les micro-organismes présents dans un volume de liquide.

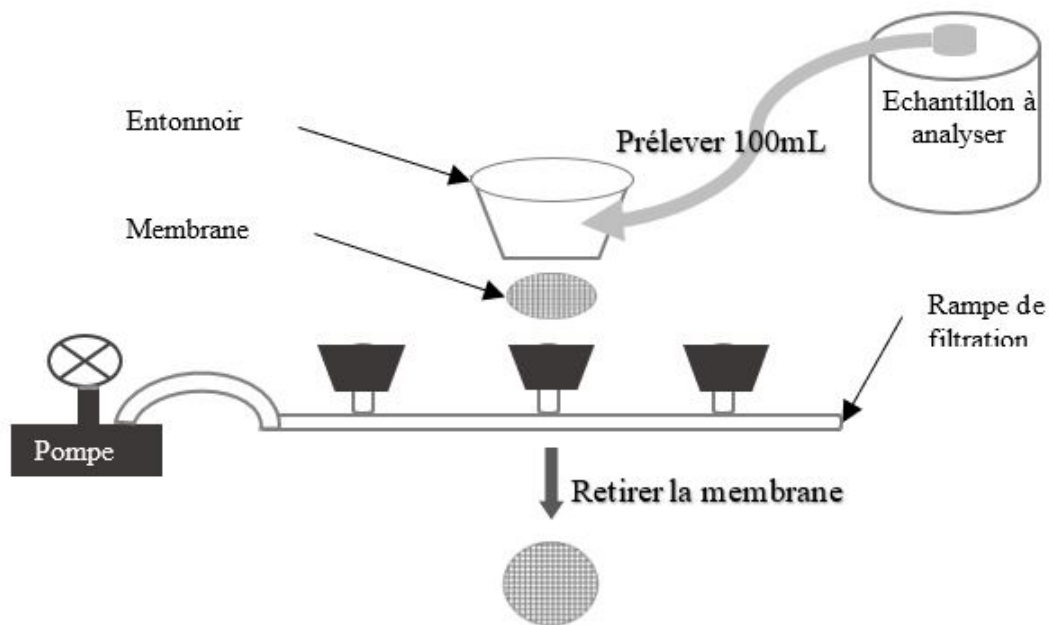


FIGURE III.4 – Analyse des coliformes totaux : la filtration sur membrane

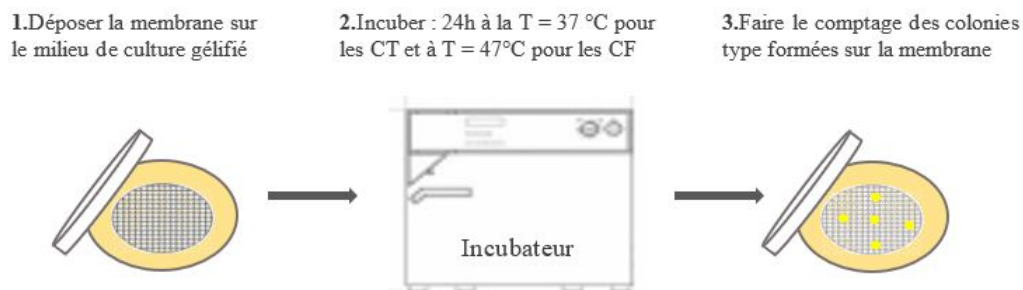


FIGURE III.5 – Analyse des coliformes totaux : l'incubation

Dénombrement des colonies :

La méthode de comptage utilisée est le comptage manuel car il est rapide et facile à mettre en œuvre (nécessite peu de matériel).

Les consignes de la lecture des résultats sur le Tergitol TTC sont :

- Halo bleu ou vert : Coliformes qui ne fermentent pas le lactose.
- Halo jaune : Coliformes qui fermentent le Lactose.

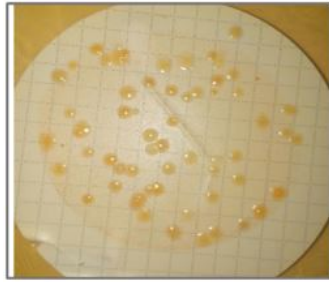


FIGURE III.6 – Image de colonies des CT formées après incubation

III.3.2.2 Analyse physico-chimique

Les mesures des chlorures, Nitrites, Nitrates, Ammonium et Phosphates total ont été effectuée par des kits de mesure (LCK) prêts à l'emploi (figure III.8) et la lecture est faite directement sur un spectrophotomètre III.7 HACH – Lange DR 1900.

Les mesures du potentiel hydrogène (pH), température et conductivité sont effectuées à l'aide d'un multi paramètre équipé d'une sonde spécifique à chaque paramètre.



FIGURE III.7 – spectrophotomètre HACH-Lange DR 1900



FIGURE III.8 – kits LCK prêts à l'emploi

La DCO, DBO et la turbidité sont mesurés, respectivement, par un photomètre, un DBO mètre et un turbidimètre.

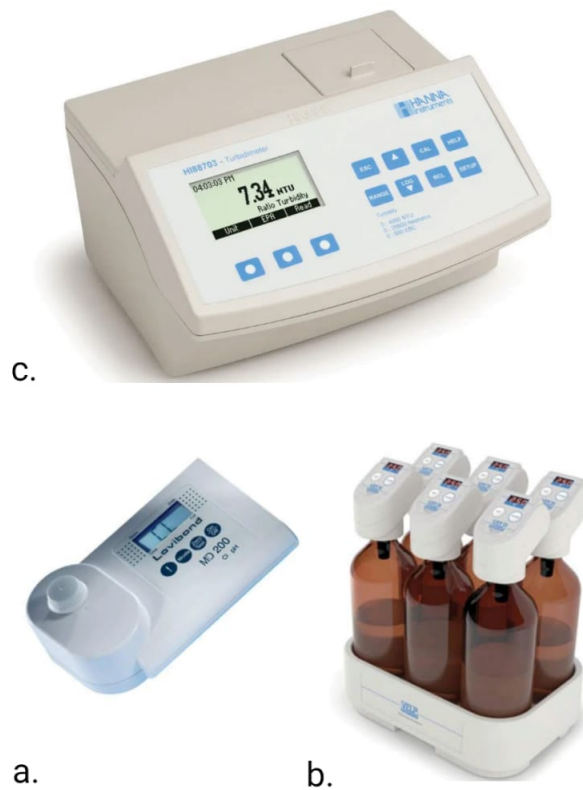


FIGURE III.9 – a.DCO mètre, b.DBO mètre et c.Turbidimètre

Chapitre IV

Résultats et Discussion

IV.1 Objectifs de recherche

IV.1.1 Objectif global

L'objectif global de ce projet est l'utilisation des procédés électro-chimique pour la désinfection des eaux usées de l'UDES.

IV.1.2 Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques se présentent comme suit :

- Optimiser les conditions opératoires du procédé électrolytique utilisé pour la désinfection d'un échantillon réel prélevé de la fosse septique de l'UDES.
- Évaluer l'efficacité épuratoire du procédé pour la dégradation des coliformes totaux, sélectionnés comme germe indicateur pour l'étude.

IV.2 Hypothèses de recherche

Le développement d'un procédé électro-chimique basé sur la génération, in-situ, des oxydants chlorés (HClO , ClO^- et Cl_2) par des réactions anodique et cathodique pourrait constituer une voie potentielle de désinfection des eaux usées. Cette approche permettrait de remplacer les techniques conventionnelles.

IV.3 Caractéristiques de l'eau usée de l'UDES

Les eaux à traiter sont des eaux usées domestiques, issues de l'UDES qui emploie 172 personnes. L'UDES, située au front de mer à Bou-Ismaïl (Tipaza) n'est pas connectée au réseau d'assainissement, aussi elle est obligée de collecter ses eaux usées dans une fosse septique, en attendant leur décharge périodique vers la STEP de Tipaza.

La fosse septique en question d'un volume de 70m^3 , est divisée en 3 compartiments de décantation, où les eaux sont prétraitées par décantation. Les caractéristiques de ces eaux usées sont représentées dans le tableau IV.1

TABLE IV.1 – Les valeurs des paramètres des effluents de l'UDES

Paramètres	Valeur
Turbidité	11.2 NTU
Température	25°C
PH	7.52
Conductivité	2.22 ms/cm
DCO	15.41 mgO ₂ /l
DBO	152 mgO ₂ /l
Ammonium	0.404 mg/l
Nitrites	0.906 mg/l
Nitrates	11.08 mg/l
Phosphates	02 mg/l
MES (105°C pendant 2 heures)	0.0424 mg/l
Coliformes totaux	256000 UFC/100ml

Excepté les coliformes totaux, nous pouvons constater que l'eau usée de l'UDES est moins chargée, en comparaison avec celle qu'on trouve dans les STEP. Ceci nous a incité à procéder à sa désinfection afin d'éliminer les pathogènes et faciliter sa décharge et/ou réutilisation.

IV.4 Optimisation des paramètres influençant la DE

Pour optimiser le procédé de désinfection électrochimique, plusieurs paramètres ont été pris en considération. Ces derniers, sont : la densité du courant (j) la nature et la concentration des électrolytes, type d'électrode, la distance inter-électrode, le temps de traitement et l'effet de l'aération.

IV.4.1 Densité du courant

La densité du courant appliquée est un paramètre clé dans le procédé d'électro-oxydation. Dans cette optique, et afin de déterminer son effet sur le taux d'abattement des micro-organismes pathogènes contenus dans les eaux usées étudiées, des densités de courant variant entre $2.5\text{mA}/\text{cm}^2$ et $12.5\text{mA}/\text{cm}^2$ ont été appliquées. Les résultats obtenus sont représentés sur la Figure IV.1.

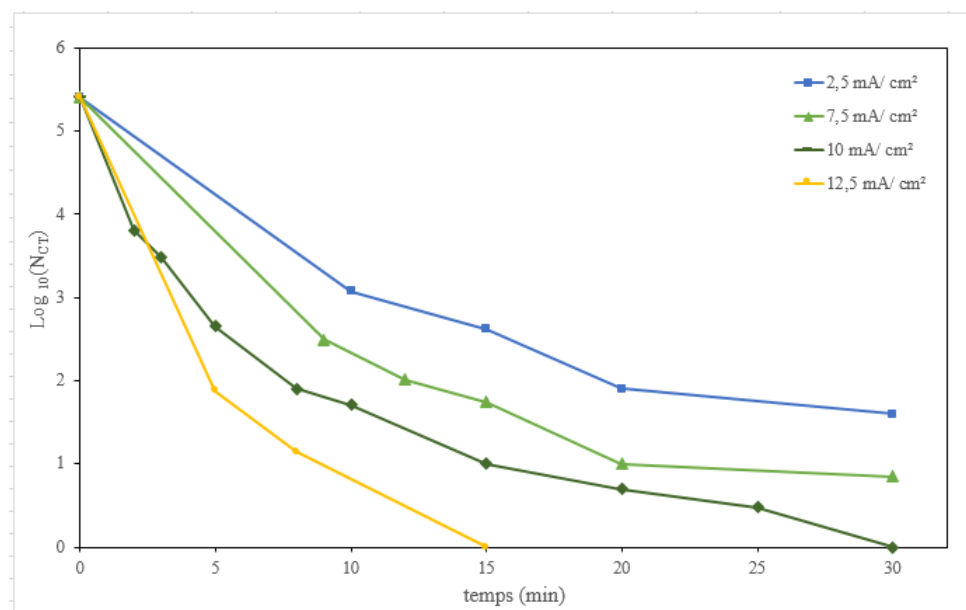


FIGURE IV.1 – Effet de la densité de courant appliquée sur l'abattement des CT

(Electrodes AI/AI ; $t = 30\text{min}$; $V = 250\text{ml}$; $V_{Dech} 3\%$ [NaCl] = 0.1 M)

Le suivi de l'évolution de l'élimination des coliformes totaux (CT) en fonction de la densité du courant a montré un abattement variant de $3,4\text{Log}_{10}$ à $5,5\text{Log}_{10}$, pour les différentes densités étudiées, ce qui démontre l'efficacité du traitement.

Selon les profils d'abattement bactérien obtenus, nous remarquons que, pour toutes les densités étudiées ($2,5$ à $12,5\text{mA}/\text{cm}^2$), la vitesse d'abattement augmente avec l'augmentation de la densité de courant. D'un autre côté, il est à signaler que l'abattement des CT est en dessous de la valeur limite de quantification, fixée à 1Log_{10} , pour la méthode utilisée, quel qu'elle soit la densité appliquée exceptée pour le courant $2,5\text{mA}/\text{cm}^2$ pour lequel l'abattement final est à $1,6\text{Log}_{10}$.

La DE, est due à l'effet combiné du courant électrique et d'oxydants chlorés (HClOClO^- et Cl_2) formés au niveau de l'anode, aussi, plus la densité de courant augmente, plus les bactéries initialement soumises à ce courant électrique deviennent plus sensibles et sont, ainsi, plus rapidement éliminées [61]. Il est à signaler, l'augmentation de la densité du courant est à la base de l'accélération de la production des oxydants électrochimiques responsables de la désinfection [62].

Pour la suite de l'étude, la densité du courant est fixée à $10\text{mA}/\text{cm}^2$ (correspondant à un courant de $0,4\text{A}$). Ce choix est justifié, par une volonté de suivre la cinétique de désinfection. En effet, avec un courant de $12,5\text{mA}/\text{cm}^2$ le processus est beaucoup trop rapide et l'effet des autres paramètres ne pourrait être amplement apprécié.

IV.4.2 Type d'anode

Il a été prouvé que le matériau dont est fabriquée l'anode influence, à la fois, la sélectivité et l'efficacité d'un procédé électrolytique [63]. Dans cette optique, nous avons procédé à la comparaison du pouvoir de désinfection de deux anodes différentes : BDD et acier inoxydable. La figure IV.2 présente l'évolution de l'élimination des CT en fonction du temps pour deux types d'anodes différentes, acier inoxydable (AI) et Boron Doped Diamond (BDD).

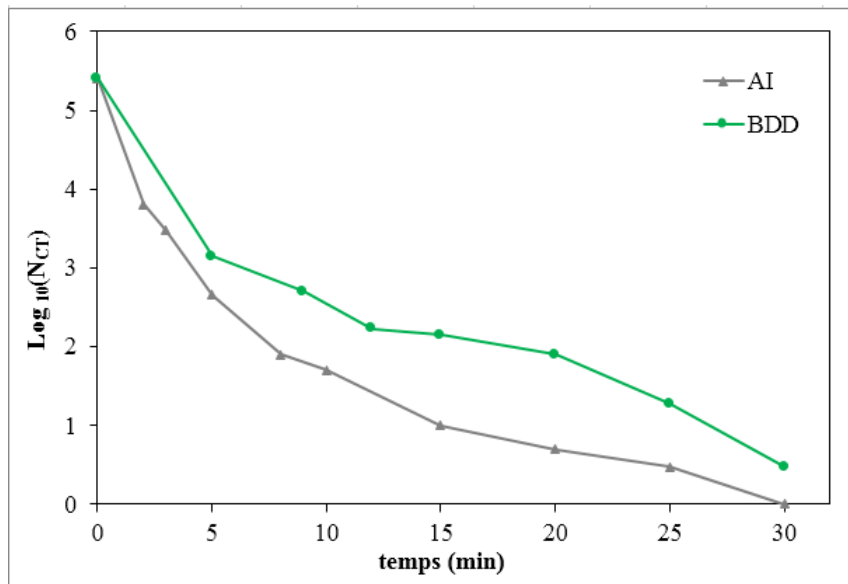


FIGURE IV.2 – (Effet du type de l'anode sur l'abattement des CT au cours du temps

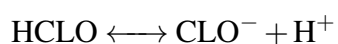
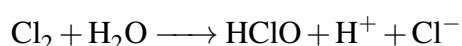
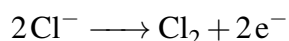
($j = 10 \text{ mA/cm}^2$; $t = 30 \text{ min}$; $V = 250 \text{ ml}$; $V_{\text{Dekh}} 3\%$ $[\text{NaCl}] = 0.1 \text{ M}$)

L'abattement de la concentration des CT en fonction du temps d'électrolyse est représenté sur la figure IV.2. Les résultats obtenus, ont montré des profils d'abattement similaires; que ce soit dans le cas de la BDD ou de l'AI, une diminution avoisinant les $5 \log_{10}$ est atteinte, d'au bout de 30 min. Cependant, il est à noter que la DE par l'intermédiaire de l'AI est légèrement meilleurs en termes d'efficacité de désinfection. Les deux anodes BDD et AI, agissent selon des mécanismes différents. En raison de sa surtension élevée pour l'évolution de l'oxygène et du chlore, l'AI favorise l'oxydation de l'hypochlorite en chlorate et perchlorate [64].

Cependant, la BDD génère les radicaux hydroxyles (OH^\bullet) connu comme étant l'oxydant le plus puissant des espèces réactives de l'oxygène [65-66] et étant extrêmement réactifs (une demi-vie limitée à 10^{-10} s dans les systèmes biologiques) et non sélectifs, ces derniers réagissent avec d'autres composés de l'eau traitée qui rentrent en compétition avec les microorganismes pour les radicaux libres, ce qui implique la diminution de leur disponibilité pour ces derniers.

La BDD diffère de l'AI par son mécanisme d'inactivation aussi, qui à travers les radicaux hydroxyles, cible les molécules organiques et inorganiques des cellules, en particulier, l'ADN, les protéines, les lipides, les acide-aminés, les sucres et les métaux. la BDD conduit à la formation de perchlorate comme produit principal et final de l'électrolyse à hautes densités de courant dans de l'eau contenant du chlore.[40,67,68]

Le mécanisme de la DE pour l'AI est basé sur l'oxydation des ions chlorures Cl^- présents dans l'eau usée suivi d'un dégagement de Cl_2 qui à son tour s'oxyde en HClO puis en ClO^- [42]



La dominance de chacune des deux espèces HClO et ClO^- dépend du pH[42].

L'inactivation dans le cas de l'AI, résulte de l'action des dérivés réactifs de chlorures (DRC : HClO et ClO^-) connus pour leur grande capacité de désinfection. Par ailleurs, il est important

de rappeler que HClO est plus efficace que ClO^- car la réaction entre les bactéries et HClO est plus rapide que celle entre les bactéries et ClO^- [41,69].

IV.4.3 Temps de traitement

Tout comme le courant le type de l'anode, le temps de traitement est un paramètre essentiel qui doit être pris en considération lors de la DE car une longue durée d'une d'électrolyse peut aboutir à une consommation supplémentaire en énergie. Dans cette étude, le temps de traitement nécessaire pour arriver à un rendement de 100% a été évalué pour une densité de courant de $10\text{mA}/\text{cm}^2$.

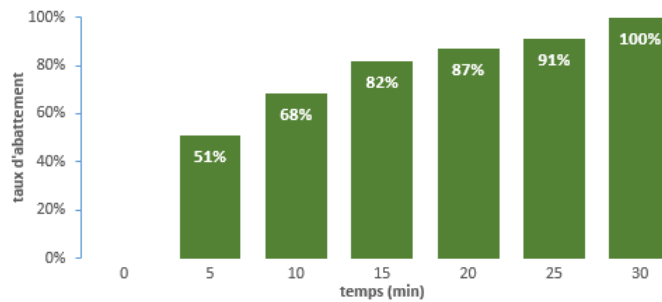


FIGURE IV.3 – Effet du temps de traitement sur le taux d'abattement ($A_{I,j} = 10\text{mA}/\text{cm}^2$; $t = 30\text{min}$; $V = 250\text{ml}$; $V_{\text{Dech}}3\%$)

IV.4.4 L'aération

La figure IV.4 représente l'effet de l'aération sur la cinétique d'abattement des CT par DE.

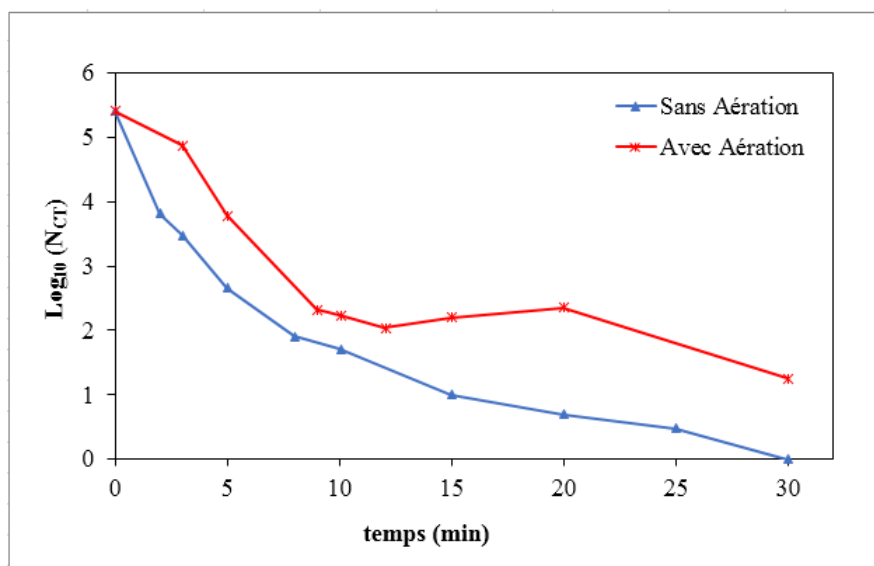


FIGURE IV.4 – Effet de l'aération sur la cinétique d'abattement des CT

(AI, $j = 10 \text{ mA/cm}^2$; $t = 30 \text{ min}$; $V = 250 \text{ ml}$; $V_{\text{Dech}} 3\%$)

Les résultats obtenus montrent que l'aération n'améliore pas la cinétique de la DE. En effet, les valeurs obtenues dans le cas d'un traitement sans aération sont légèrement meilleures, en comparaison avec celles obtenues avec aération. Ceci, peut-être attribué à la perturbation de l'électro-génération des oxydants suite à l'accélération d'oxydation des ions chlorates ClO_2^- en ions perchlorates ClO_4^- , en présence de l'oxygène apporté par l'aération. En outre, les perchlorates étant des sous-produits de la désinfection sans pouvoir biocide, cela diminuera l'efficacité d'inactivation [70].

IV.4.5 Distance inter électrode

L'effet de la distance inter-électrode est étudié pour trois valeurs : 0.5, 2 et 4 cm.

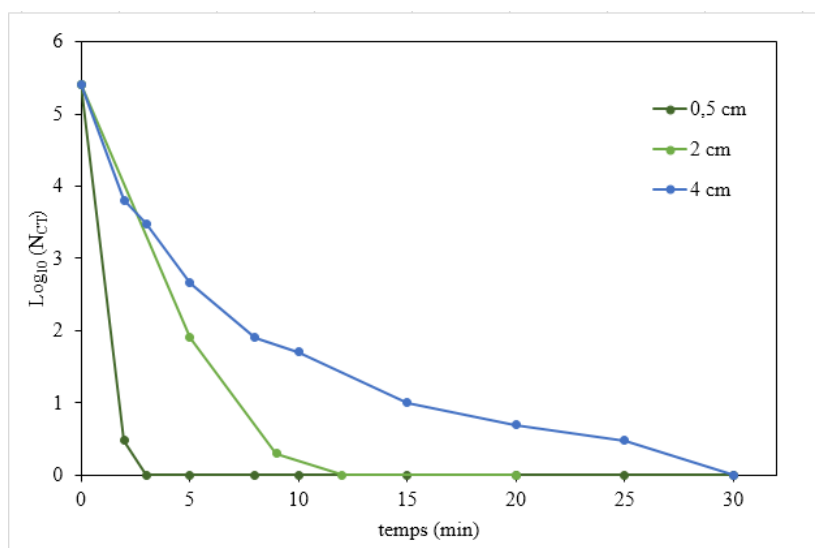


FIGURE IV.5 – Effet de la distance inter électrode sur la cinétique l'abattement des CT au cours du temps ($AI, j = 10 mA/cm^2$; $t = 30 min$; $V = 250 ml$; $V_{Dech} 3\%$)

Les résultats obtenus, ont montré que plus la distance inter-électrode est petite, plus le processus de désinfection est rapide. En effet, le temps de d'inactivation passe de 30 à 2 min quand la distance inter-électrodes passe de 4 à 0.5 cm.

La distance inter-électrodes est une variable importante car elle détermine l'encombrement des systèmes électrochimiques et augmente également la résistance du système interne au passage du courant : généralement une distance inter électrodes très large peut aboutir à une consommation supplémentaire en énergie.

Une petite distance inter électrode signifie également une moindre distance à parcourir pour les espèces oxydantes générées ce qui facilitera leur réaction.

IV.4.6 Type d'électrolyte

L'électrolyte-support contrôle la conductivité de la solution a et améliore le transfert d'électrons. En outre, la présence d'électrolyte engendre la formation d'oxydants forts, qui peuvent promouvoir ou diminuer l'efficacité du procédé, selon la nature et la concentration de l'électrolyte utilisé[71].

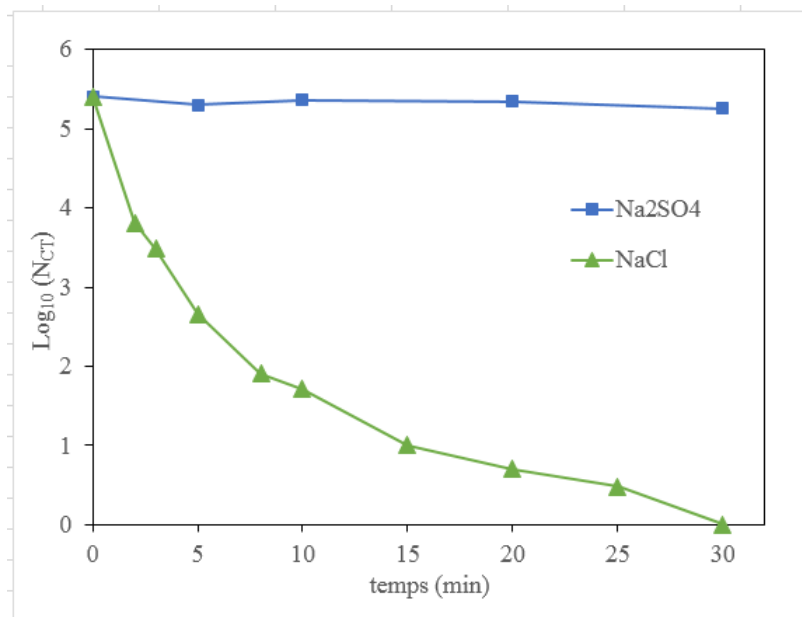
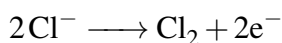


FIGURE IV.6 – l’influence de l’électrolyte support sur la cinétique l’abattement des CT au cours du temps ($AI, j = 10mA/cm^2$; $t = 30min$; $V = 250ml$; $V_{Dech} 3\%$)

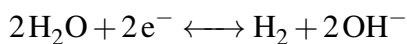
Dans cette étude, deux sels : le chlorure de sodium (0.1 M NaCl) et le sulfate de sodium (0.1 M Na₂SO₄) sont utilisés pour étudier l’influence de l’électrolyte support sur la DE. Les résultats obtenus, portés sur la figure IV.6, mettent en évidence la dégradation est rapide en présence de NaCl en comparaison avec le Na₂SO₄. Avec le Na₂SO₄, aucune désinfection n’a été constatée. En présence de chlorures, il y’a formation des espèces chlorées et en particulier les ions hypochlorite.[42]

selon le mécanisme suivant :

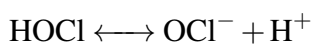
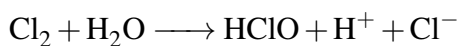
Anode :



Cathode :



Dans la solution :



Les dérivés réactifs de chlorures (DRC : HClO et ClO⁻) sont connus pour leur grande capacité de désinfection, ce sont des oxydants très puissants avec des potentiels standard très élevés[71]. La dissociation du Na₂SO₄, dans la solution génère des ions Na⁺ et des ions de sulfates SO₄²⁻ Patermarakis et al[72] ont émis l’hypothèse que les ions sulfates dans l’eau entraîneraient la formation de peroxodisulfate qui, à son tour, exercerait une grande action germicide pendant les processus électrochimiques. Ainsi Kerwick et al[73] ont observé une inactivation de 4 log d’E.Coli en 60 min avec une densité de courant de 321,2mA/cm⁻² dans un électrolyte Na₂SO₄

0,03 M sans chlorure.

Cependant, Li et al[74] ont réalisé l'inactivation d'E.coli sur des dispositifs électrochimiques à base de Ti/RuO₂/Ti et sont arrivés à la conclusion que $S_2O_8^{2-}$ ne jouait pas de rôle dans la désinfection. Il en est de même pour Furuta et al[75].

Cette différence de résultats et d'interprétations est probablement attribuée aux différences des conditions de désinfection, tels que les microorganismes indicateurs, la concentration de l'électrolyte et la configuration du dispositif. Dans notre cas, il semblerait que les coliformes totaux existants dans le milieu sont plus résistants à l'ED en présence de Na₂SO₄.

IV.4.7 Concentration d'électrolyte

La figure IV.7 représente l'influence de deux concentrations différentes de NaCl sur la cinétique d'abattement des CT

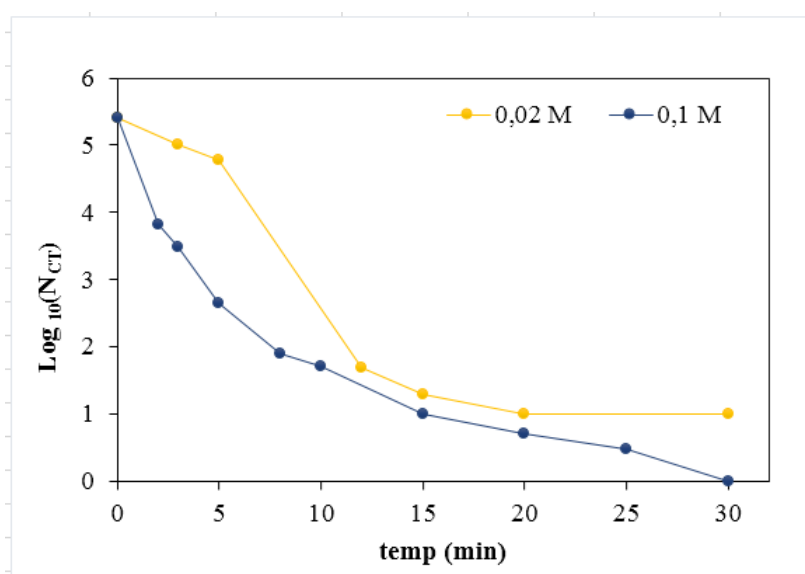


FIGURE IV.7 – Effet de la concentration d'électrolyte sur la cinétique d'abattement des CT en fonction temps ($AI, j = 10 \text{ mA/cm}^2$; $t = 30 \text{ min}$; $V = 250 \text{ ml}$; $V_{Dech} = 3\%$)

Les résultats indiquent qu'en augmentant la concentration en électrolyte, l'efficacité de l'élimination des CT s'améliore. L'augmentation de la concentration de NaCl accroît la quantité de production du chlore libre ce qui conduit à l'accélération de la DE. Cependant, il est à noter que dans notre cas la différence entre les deux concentrations (x5), n'apparaît pas avoir affecté, ni le rendement de dégradation, ni la cinétique de dégradation. Ceci est probablement dû à la concentration en chlorures et autres ions existants déjà dans l'eau usée et qui, dans notre cas peuvent jouer le rôle d'électrolyte et interférer, par conséquent, dans l'interprétation des résultats. La tendance à l'inactivation des microorganismes est fortement influencée par leur adsorption sur la surface de l'anode, et puisque que le chlore actif agit principalement dans toute la masse, ceci lui permettra de s'attaquer aux microorganismes présents et de les détruire. [76]

IV.5 Dosage des chlorures

La figure IV.8 présente la variation des chlorures Cl^- et l'abattement des bactéries en fonction du temps.

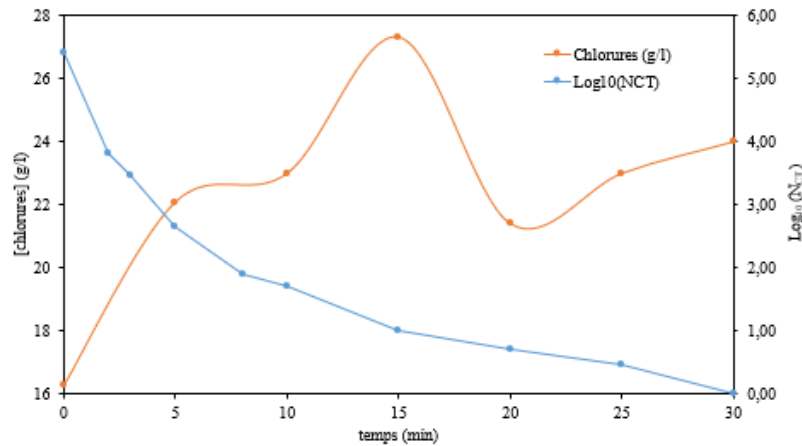


FIGURE IV.8 – Évolution des chlorures lors de la DE ($AI, j = 10 \text{ mA/cm}^2$; $t = 30 \text{ min}$; $V = 250 \text{ ml}$; $V_{Dech} = 3\%$)

Les profils obtenus montrent une diminution significative des CT durant les 8 premières minutes. Cette élimination est due à l'oxydation anodique des chlorures qui génèrent des oxydants chlorés responsables de la désinfection [42]. Durant cette première phase, la concentration en chlorures augmente avec le temps d'électrolyse, jusqu'à atteindre un maximum de 27 g/l à 15 min. Au-delà de cette valeur, la concentration en chlorures diminue pour atteindre un palier autour des 23-25 g/l.

Une légère augmentation des chlorures a été observée après 20 mn, ce qui nous amène ici à mentionner que l'abattement bactérien n'est pas effectué le même jour et que les analyses des chlorures ont été effectuées après une contamination de la fosse septique expliquée par des rejets d'une saumure.

IV.6 Caractéristiques de l'eau traitée

TABLE IV.2 – Les valeurs des paramètres de leau traitée par DE

paramètres	Valeur
Température	22.2°C
PH	8.12
Conductivité	11.6 ms/cm
DCO	5 mg/l
Ammonium	0.169 mg/l
Nitrites	0.238 mg/l
Nitrates	0.81 mg/l
Phosphates	0.5 mg/l
TDS	6.4 g/l
Salinité	6 g/l
Coliformes totaux	0 UFC

Selon la norme algérienne N°17683 « la réutilisation des eaux usées épurées à des fins agricoles, municipales et industriels spécifications physico-chimique et biologiques est disponible au niveau de l'institut algérien de normalisation IANOR », nous pouvons envisager la réutilisation de l'eau traitée par ED dans l'irrigation après une inspection des autres paramètres exigés par la loi concernant la réutilisation.

IV.7 Evaluation de la consommation énergétique

L'équation suivante a été utilisée pour calculer la consommation d'énergie pendant le processus de DE.

$$EC = \frac{E_{cell} \cdot I \cdot t}{1000 \cdot V_s \Delta(CT)}$$

Avec :

- E_{cell} : le potentiel moyen de la cellule électrochimique (V).
- I : le courant appliqué (A).
- t : le temps d'électrolyse nécessaire à la dégradation d polluant (h).
- V_s : volume de la solution (L).
- $\Delta(CT)$; l'abattement de la concentration en CT ($\log_{10} N CT$).
- EC : kWh/g CT éliminés.

En appliquant la relation dans notre étude nous obtenons les résultats représentés dans la figure IV.9.

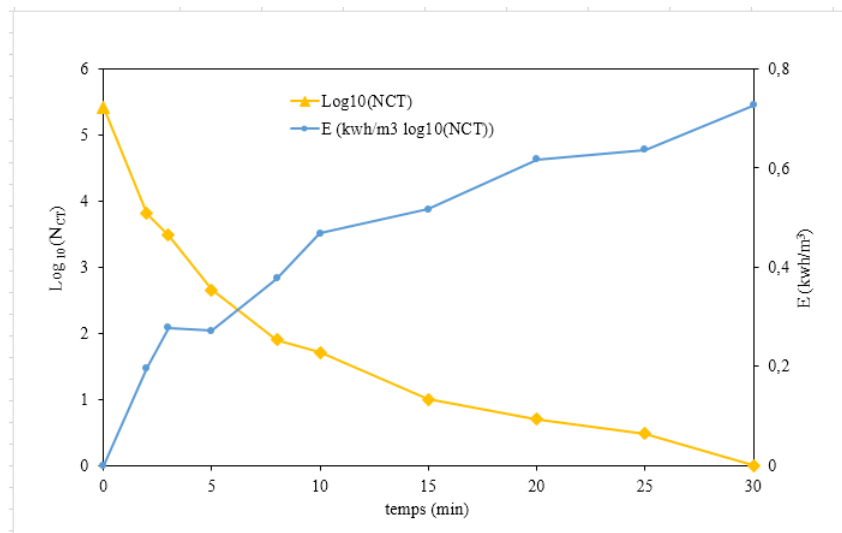


FIGURE IV.9 – Variation de l'énergie consommée et de l'abattement des CT au cours de la DE en fonction du temps N_{CT} ($AI, j = 10mA/cm^2$; $t = 30min$; $V = 250ml$; $V_{Dech} 3\%$)

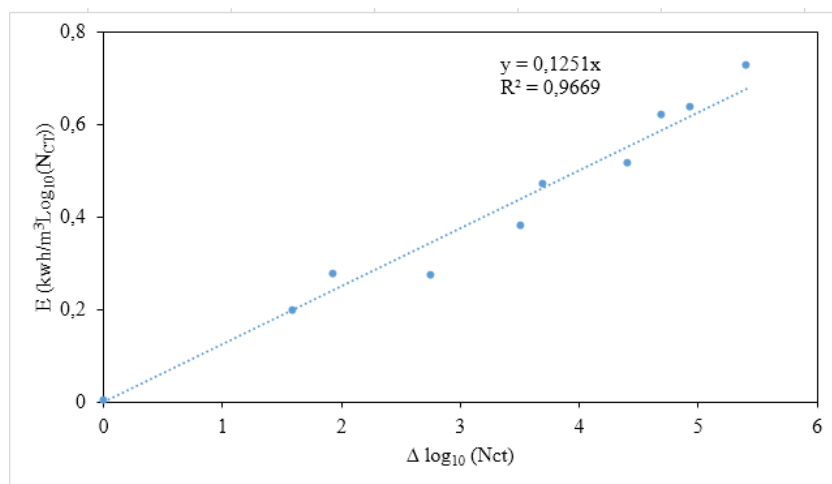


FIGURE IV.10 – Evolution de la consommation en énergie en fonction de la variation de CT en $\Delta(\log_{10}(N_{CT}))$

Le calcul de l'EC associée à la désinfection des micro-organismes, nous permet d'estimer que pour une réduction de 5.4 log₁₀ CT une énergie de 0,7kWh/m³ est nécessaire. D'après une étude récente, pour chaque m³ d'échantillon, l'énergie consommée pour éliminer les CT, en utilisant l'anode d'Al était inférieure à celle de l'anode en Ti [76]. Dans une autre étude, La consommation d'énergie avec les électrodes BDD pour l'inactivation complète d'E. Coli était dans la gamme de $E = 0,7kWh/L$ [77]. En conséquence, les résultats de la présente étude rapportés ci-dessus se situent en sans cette gamme.

La consommation d'énergie est influencée par la densité de courant, le temps de réaction et le potentiel de la cellule électrochimique [76].

En regardant la figure IV10, on conclue que l'EC varie proportionnellement avec la concentration en CT éliminée. Aussi, pour diminuer la consommation énergétique, il suffit de rentrer dans les normes de réutilisation. Ainsi, au lieu d'atteindre une valeur 0 CT, nous pouvons arrêter le traitement à 100 colonies/100ml et économiser ainsi $0.2kwh/m^3$ traité.

Chapitre V

Conclusion générale et perspectives

V.1 Conclusion générale

Ce travail a été effectué au laboratoire d'épuration et valorisation des eaux de rejets (EVER) au niveau de l'unité de développement des équipements solaire (UDES). Il a été motivé par l'accumulation des eaux usées de l'UDES dans une fosse septique. Vu la surcharge en contaminants microbiologiques des eaux en question il est impératif de les désinfecter avant leurs rejets. Pour cela, nous avons opté pour la désinfection électrochimique basée sur la génération, in-situ, des oxydants chlorés (HClO , Cl^\cdot et Cl_2) à pouvoir désinfectant. Cette approche permettrait d'une part de remplacer les techniques conventionnelles basées sur l'ajout de produits chimiques et d'autre part d'examiner les performances d'un nouveau procédé durable.

Afin de confirmer l'efficacité de cette DE et de l'optimiser, plusieurs paramètres ont été pris en considération : la densité du courant, la nature et la concentration des électrolytes, type d'électrodes, la distance inter-électrode, le temps de traitement et l'aération. Les résultats de notre étude paramétrique ont révélé que :

- Une densité de courant de 12.5mA/cm^2 est idéale avec un abattement total des CT au bout de 15 min.
- Les profils d'abattement des CT dans le cas de la BDD et de l'Acier Inoxydable sont similaires. Cependant, la DE par l'intermédiaire de l'AI est plus rapide.
- Le temps de traitement nécessaire pour arriver à un rendement de 100% a été évalué à 30 min pour une densité de 10mA/cm^2 .
- L'aération n'améliore pas la cinétique de la DE. La distance inter-électrodes optimale démontrée est de 0.5 cm avec un temps d'électrolyse de 2 min.
- Comparé au Na_2SO_4 , NaCl est le meilleur électrolyte dans le cas de la DE.
- L'évaluation de la consommation énergétique de la désinfection électrochimique nous permet d'estimer que pour une réduction de $5.4 \log_{10}$ CT une énergie de $0,7\text{kWh/m}^3$ est nécessaire.

V.2 Perspectives

- En somme, les recherches abordées dans ce travail suggèrent que ce procédé électrochimique peut remplacer efficacement la désinfection classique.
- Une étude technico-économique devrait être réalisée ainsi qu'une analyse du cycle de vie.
- Il est impératif de faire une analyse des sous-produits de désinfection générés dans le milieu par DE.
- Conception et mise en place d'un réacteur travaillant en mode continu.
- Exploiter les énergies renouvelables comme une source alternative pour l'alimentation du procédé électrochimique.
- La valorisation de la saumure générée par les stations de dessalement des eaux en la réutilisant comme un électrolyte dans la DE.
- La réutilisation de l'eau traitée par ED dans l'irrigation après une inspection des autres paramètres exigés par la loi concernant la réutilisation.

Références bibliographiques

-
- [1] WHO and UNICEF, “Progress on Sanitation and Drinking Water 2013 Update,” *World Health*, 2004, 2013vol. 1, no. October.
- [2] M. CLEUVERS, “Aquatic ecotoxicity of pharmaceuticals including the assessment of combination effects,” *Toxicol. Lett.*, 2003,vol. 142, no. 3, doi: 10.1016/S0378-4274(03)00068-7.
- [3] SUMPTER, P. JOHN, JOBLING, and SUSAN, “The occurrence, causes, and consequences of estrogens in the aquatic environment,” *Environ. Toxicol. Chem.*, 2013 vol. 32, no. 2, , doi: 10.1002/etc.2084.
- [4] J. BROWN, S. CAIRNCROSS, and J. H. J. ENSINK, “Water, sanitation, hygiene and enteric infections in children,” *Arch. Dis. Child.*, 2013,vol. 98, no. 8, , doi: 10.1136/archdischild-301528.
- [5] O. mondiale de la Santé, “Stratégie de l’OMS sur l’eau, l’assainissement et l’hygiène 2018-2025,” Organisation mondiale de la Santé, 2019.
- [6] R. FRANÇOIS, *Dictionnaire encyclopédique des pollutions*. 1999.
- [7] E. KOLLER, *Traitement des pollutions industrielles Eau, air, déchets, sols, boues*, (2ème édit. 2009.
- [8] N. GHAZI, “Utilisation des technologies avancées compactes : Réacteur Biologique à Membrane et Réacteur Biologique Séquentiel pour le traitement des eaux grises en vue de leur recyclage à des fins domestiques.” 2007.
- [9] R. DESJARDINS, *Le traitement des eaux*, 2ème édit. 1997.
- [10] J. O. de la République Algérienne, “loi n°03-10 du 19 Joumada El Oula 1424 correspondant au 19 juillet 2003 relative à la protection de l’environnement dans le cadre du développement durable.2003 pp. 6–19.
- [11] C. M, “UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES DÉPARTEMENT DE GÉNIE DES PROCÉDÉS Domaine : Sciences et Techniques Filière : Génie des Procédés Niveau : 3 iem Licence Cours Pollution (Air, Eau, Sol). Programme du Matière. Chapitre I. La Po.” 2016.
- [12] B. SAMUEL, “Réutilisation des eaux usées épurées : risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France.” .
- [13] E. LEFEBVRE, “Etude par des parametres globaux de la matiere organique d’eaux brutes et clarifiees,” *Revue des Sciences de l’Eau*, 1995 ,vol. 8, no. 1. doi: 10.7202/705216ar.
- [14] H. GUERRÉE and C. GOMELLA, *Les Eaux usées dans les agglomérations urbaines ou rurales*. Paris : Eyrolles, 1983., 1983.
- [15] H. GUEREE and C. GOMELLA, *Le traitement des eaux publiques industrielles et privées*, 2nd ed. Editions Eyrolles, Paris, 1978.
- [16] G. BITTON, *Wastewater Microbiology: Fourth Edition*. 2010.
- [17] P. JC, F. A, and T. G, “Caractérisation de la contamination microbiologique d’origine fécale de l’estuaire de la Seudre en période sèche,” 2011, [Online]. Available:

-
- <http://archimer.ifremer.fr/doc/00129/24048/22011.pdf>.
- [18] W. E. FEDERATION, “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater,” *Public Health*, , 1999, vol. 51, no. 1, doi: 10.2105/AJPH.51.6.940-a.
- [19] F. ESPINOSA, J. M. GUERRA-GARCÍA, and J. C. GARCÍA-GÓMEZ, “Sewage pollution and extinction risk: An endangered limpet as a bioindicator?,” *Biodivers. Conserv.*, 2007, vol. 16, no. 2, doi: 10.1007/s10531-005-3014-3.
- [20] A. SIUNG-CHANG, “A review of marine pollution issues in the Caribbean,” *Environmental Geochemistry and Health*, 1997, vol. 19, no. 2, doi: 10.1023/A:1018438119034.
- [21] C. RAMSAR, “Alerte à la pollution à Béjaïa 2021,” pp. 1–2.
- [22] A. Baouia and D. Habbaz, “La situation d’assainissement et d’évacuation des eaux usées de la ville d’Ouargla et caractérisation des eaux de Chott de Ain baida, 2006.” pp. 0–118.
- [23] “Choléra en Algérie_ l’origine de l’épidémie identifiée,” 2018, [Online]. Available: https://fr.news.yahoo.com/cholera-algerie-l-origine-l-005041425.html?guccounter=1&guce_referrer=aHR0cHM6Ly93d3cuYmluZy5jb20v&guce_referrer_sig=AQAAAFpWhAEE8nkh8pNKwG11nrNk5UajmmFHLFFsh9be_38E9uQYu8U4ZOwRPBmG2RJUOdZbjCSx9PTqNgFBMT8Y8waH6QxlFK1TcXbFnxBJZZ.
- [24] “Paludisme en Algérie _ 2 morts et 82 cas enregistrés à Adrar - Algerie360,” [Online]. Available: <https://www.algerie360.com/20200929-paludisme-en-algerie-2-morts-et-82-cas-enregistres-a-adrar/>.
- [25] “Cinq cas de fièvre typhoïde confirmés_ Toute l’actualité sur liberte-algerie,” 2021, [Online]. Available: <https://www.liberte-algerie.com/est/cinq-cas-de-fievre-typhoide-confirmes-330259>.
- [26] “Différents traitements d’une station d’épuration (STEP) - Agronomie,” 2019, [Online]. Available: <https://agronomie.info/fr/differents-traitements-dune-station-depuration-step/>.
- [27] L. BOUCHAALA, N. CHARCHAR, and A. GHERIB, “Ressources Hydriques : Traitement Et Reutilisation, , 2017” vol. 7, pp. 84–95.
- [28] M. DROUCHE, “traitement des eaux de surface et des eaux de rejets d’huilerie d’olive par ultrafiltration et procédé à oxydation avancée uv/h2o,” Thèse de Doctorat Ecole nationale polytechnique, 2006.
- [29] “Désinfection des eaux usées traitées,” 2021, [Online]. Available: <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/eaux-usees/desinfection.htm#:~:text=Les moyens de désinfection les,rayonnement ultraviolet et le lagunage>.
- [30] J Fleurette., “Guide pratique de l’antisepsie et de la désinfection.,” *Ed. Eska*, 1997.
- [31] N. GONZALEZ-RIVAS, H. REYES-PÉREZ, and C. E. BARRERA-DÍAZ, “Recent Advances in Water and Wastewater Electrodisinfection,” *ChemElectroChem*, 2019, vol. 6, no. 7, pp. 1978–1983, doi: 10.1002/celec.201801746.
- [32] D. P. et F. M. LANGLAIS B, “La microfiltration, moyen de désinfection d’un effluent

-
- après traitement biologique,” *L’eau, l’industrie, les nuisances*, 1992, vol. 157, pp. 42-45.
- [33] F. ZANETTI, G. DE LUCA, R. SACCHETTI, and S. STAMPI, “Disinfection efficiency of peracetic acid (PAA): Inactivation of coliphages and bacterial indicators in a municipal wastewater plant,” *Environ. Technol.*, 2007, vol. 28, no. 11, doi: 10.1080/09593332808618886.
- [34] C. ZWIENER, S. D. RICHARDSON, D. M. DEMARINI, T. GRUMMT, T. GLAUNER, and F. H. FRIMMEL, “Drowning in disinfection byproducts? Assessing swimming pool water (Environmental Science and Technology (2007) 41, (363-372)),” *Environmental Science and Technology*, 2008, vol. 42, no. 5, doi: 10.1021/es702871c.
- [35] G. AVERY and A. BHARGAVA, “WHO report 2000,” *Lancet*, 2001, vol. 358, no. 9287., doi: 10.1016/s0140-6736(01)06208-0.
- [36] H. VOLK, C., RENNER, C., ROCHE, P., & PAILLARD, “Effects of ozone on the production of biodegradable dissolved organic carbon (BDOC) during water treatment,” *Ozone Sci. &*, 1993.
- [37] M. MILLET, “L’oxygène et les radicaux libres,” *I. Bios.*, 1992.
- [38] C. PULGARIN, N. ADLER, P. PÉRINGER, and C. COMNINELLIS, “Electrochemical detoxification of a 1,4-benzoquinone solution in wastewater treatment,” *Water Res.* 1994, vol. 28, no. 4, doi: 10.1016/0043-1354(94)90095-7.
- [39] L. R. KARAM, D. S. BERGTOLD, and M. G. SIMIC, “Biomarkers of oh radical damage in vivo,” *Free Radic. Res.*, 1991., vol. 12, no. 1, doi: 10.3109/10715769109145762.
- [40] S. PALMAS, M. MASCIA, A. VACCA, L. MAIS, S. CORGIOLU, and E. PETRUCCI, *Practical aspects on electrochemical disinfection of urban and domestic wastewater.* Elsevier Inc., 2018.
- [41] T. NAJI, “Développement d’un procédé électrolytique de désinfection et de traitement des eaux récréatives de piscines,” 2017.
- [42] H. BERGMANN, “Electrochemical disinfection – State of the art and tendencies,” *Curr. Opin. Electrochem.* 2021, vol. 28, p. 100694, doi: 10.1016/j.coelec.2021.100694.
- [43] “NSW PUBLIC HEALTH buLLETIN,” *Year Rev* 2013, vol. 24(3).
- [44] I. O. R. IBÁÑEZ, “The Use Of Efficient Electrodisinfection Technique In Water Regeneration: Kinetics Of Escherichia Coli Inactivation R.,” 2014.
- [45] D. A. ARESHKIN, O. A. SHENDEROVA, S. P. ADIGA, and D. W. BRENNER, “Electronic properties of diamond clusters: Self-consistent tight binding simulation,” *Diam. Relat. Mater* 2004, vol. 13, no. 10, doi: 10.1016/j.diamond.2004.04.012.
- [46] T. BOND, Q. TSE, C. L. CHAMBON, P. FENNELL, G. D. FOWLER, and M. R. Templeton, “Retraction: The feasibility of char and bio-oil production from pyrolysis of pit latrine sludge,” *Environ. Sci. Water Res. Technol.* 2017 vol. 3, no. 6, doi: 10.1039/c7ew90022h.
- [47] V. KHANDEGAR et A.K. SAROHA, “Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent,” *Rev. Environ. Manag.* 2013 vol. 128, pp. 949–963, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479713004465>.
- [48] A. PACHECO, M. J., SANTOS, V., CIRÍACO, L., & LOPES, “Electrochemical

- degradation of aromatic amines on BDD electrodes.,” *J. Hazard. Mater.*, 2011, pp. 186(2–3), 1033– 1041.
- [49] D. DAGHRIR, R., DROGUI, P., & ROBERT, “Modified TiO₂ For Environmental Photocatalytic application,” *A Rev. Ind. Eng. Chem. Res.*, 2013.
- [50] ANGLADA *ET AL.*, “Emerging Technologies Contributions of electrochemical oxidation to waste-water treatment,” *Fundam. Rev. Appl.*, 2009.
- [51] D. ZHANG, C., LIU, L., WANG, J., RONG, F. ET FU, “Electrochemical degradation of ethidium bromide using boron-doped diamond electrode.,” 2013.
- [52] “Contribution a l’étude des interactions dans le système déchets-sol-eau (cas de la décharge d’Oued-Smar),” Ecole nationale polytechnique Magister 1993.
- [53] F. NAUMCZYK, J., SZPYRKOWICZ, L ET ZILIO-GRANDI, “Electrochemical treatment of textile wastewater,” *Water Sci. Technol.* 1996 vol. 34(11), pp. 17–24.
- [54] J. DURLIAT, G., VIGNES, J., & JOFFIN, “L’eau de Javel: sa chimie et son action biochimique.,” *Bull. L’union Des Physiciens*, 1997.
- [55] R. SAMET, Y., ELAOUD, S. C., AMMAR, S., & ABDELHEDI, “Electrochemical degradation of 4 - chloroguaiacol for wastewater treatment using PbO₂ anodes.”
- [56] T. BERGMANN, M. E. H., ROLLIN, J., & IOURTCHOUK, “The occurrence of perchlorate during drinking water electrolysis using BDD anodes.,” *Electrochim. Acta*, vol. 54(7), pp. 2102–2107.
- [57] J. W. JUNG, Y. J., BAEK, K. W., OH, B. S., & KANG, “An investigation of the formation of chlorate and perchlorate during electrolysis using Pt/Ti electrodes: The effects of pH and reactive oxygen species and the results of kinetic studies.,” vol. 44(18), pp. 5345– 5355.
- [58] H. E. WATSON, “A Note on the Variation of the Rate of Disinfection With Change in the Concentration of the Disinfectant,” *J. Hyg. (Lond.)*, 1908.
- [59] H. CHICK, “An Investigation of the Laws of Disinfection,” *Epidemiology & Infection.*, vol. vol 8, pp. 92–158, 1908.
- [60] L. W. HOM, “Kinetics of Chlorine Disinfection in an Ecosystem,” *J. Sanit. Eng. Div.*, vol. 98, pp. 183–194.
- [61] E. MEHRAZ, “Effet Bactéricide Et Épuratoire De Traitement Electrochimique Sur L ’ Effluent D ’ Abattoir De Viande Rouge,” , 2013, vol. 9, no. 36, pp. 155–164.
- [62] S. VICTOR, D. THOMAS, H. DANIELA, and W. ECKHARD, “Electrochemical disinfection of biologically treated wastewater from small treatment systems by using boron-doped diamond (BDD) electrodes - Contribution for direct reuse of domestic wastewater,” *Water Res.*, vol. 43, no. 20, 2009, doi: 10.1016/j.watres.2009.08.036.
- [63] C. A. MARTÍNEZ-HUITLE and E. BRILLAS, “Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: A general review,” *Applied Catalysis B: Environmental*, 2009 vol. 87, no. 3–4, doi: 10.1016/j.apcatb.2008.09.017.
- [64] A. KRAFT, “Electrochemical water disinfection: A short review,” *Platin. Met. Rev.*, 2008, vol. 52, no. 3, pp. 177–185, doi: 10.1595/147106708X329273.

-
- [65] N. BENSALAH AND A. ABDEL-WAHAB, “Electrochemical inactivation of *P. Aeruginosa*, *A. hydrophila*, *L. pneumophila* using boron doped diamond anodes,” *J. Adv. Oxid. Technol.*, 2013, vol. 16, no. 1, doi: 10.1515/jaots-2013-0101.
- [66] P. CANIZARES, F. MARTNEZ, C. JIMÉNEZ, C. SÁEZ, and M. A. RODRIGO, “Coagulation and Electrocoagulation of Oil-in-Water Emulsions,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 151, no. 1, p. 44 à 51, 2008, doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.05.043.
- [67] G. GOUDARZI, R. RASHIDI, M. J. MOHAMMADI, and S. SADEGHI, “Modeling of CO dispersion from the stack of an Iranian cement Plant,” *J Adv Env. Heal. Res.*, 2017, vol. 4(4),.
- [68] D. K. HUBLER, J. C. BAYGENTS, B. P. CHAPLIN, and J. FARRELL, “Understanding Chlorite and Chlorate Formation Associated with Hypochlorite Generation at Boron Doped Diamond Film Anodes,” *J. Electrochem. Soc.*, 2014, vol. 161, no. 12, doi: 10.1149/2.1001412jes.
- [69] Y. DI CHEN *ET AL.*, “Advanced oxidation processes for water disinfection: Features, mechanisms and prospects,” *Chem. Eng. J.*, 2021, vol. 409, no. December 2020, p. 128207, , doi: 10.1016/j.cej.2020.128207.
- [70] A. V. LEVANOV and O. Y. ISAIKINA, “Mechanism and Kinetic Model of Chlorate and Perchlorate Formation during Ozonation of Aqueous Chloride Solutions,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2020, vol. 59, no. 32, pp. 14278–14287 doi: 10.1021/acs.iecr.0c02770.
- [71] A. KRAFT, ““Electrochemical water disinfection,” *A short Rev.*, vol. 52, pp. 177–185, doi: A. Kraft, “Electrochemical water disinfection: A short review,” *Platin. Met. Rev.*, , 2008, vol. 52, no. 3, pp. 177–185, doi: 10.1595/147106708X329273.
- [72] G. PATERMARAKIS and E. FOUNTOUKIDIS, “Disinfection of water by electrochemical treatment,” *Water Res.*, 1990, vol. 24, no. 12, pp. 1491–1496, doi: 10.1016/0043-1354(90)90083-I.
- [73] M. I. KERWICK, S. M. REDDY, A. H. L. CHAMBERLAIN, and D. M. HOLT, “Electrochemical disinfection, an environmentally acceptable method of drinking water disinfection?,” *Electrochim. Acta*, 2005, vol. 50, no. 25-26 SPEC. ISS., pp. 5270–5277, doi: 10.1016/j.electacta.2005.02.074.
- [74] X. Y. LI, H. F. DIAO, F. X. J. FAN, J. D. GU, F. DING, and A. S. F. Tong, “Electrochemical Wastewater Disinfection: Identification of Its Principal Germicidal Actions,” *J. Environ. Eng.*, 2004, vol. 130, no. 10, doi: 10.1061/(asce)0733-9372(2004)130:10(1217).
- [75] T. FURUTA, H. TANAKA, Y. NISHIKI, L. PUPUNAT, W. HAENNI, and P. RYCHEN, “Legionella inactivation with diamond electrodes,” *Diam. Relat. Mater.*, 2004, vol. 13, no. 11–12, pp. 2016–2019, doi: 10.1016/j.diamond.2004.03.006.
- [76] A. R. RAHMANI, M. R. SAMARGHANDI, D. NEMATOLLAHI, and F. ZAMANI, “A comprehensive study of electrochemical disinfection of water using direct and indirect oxidation processes,” *J. Environ. Chem. Eng.*, 2019 vol. 7, no. 1, p. 102785, doi: 10.1016/j.jece.2018.11.030.
- [77] B. BAKHEET, V. PRODANOVIC, A. DELETIC, and D. MCCARTHY, “Effective treatment of greywater via green wall biofiltration and electrochemical disinfection,” *Water Res.*, 2020, vol. 185, p. 116228, doi: 10.1016/j.watres.2020.116228.

-
- [78] T. ASANO, “WASTEWATER RECLAMATION AND REUSE.,” *J. Water Pollut. Control Fed.*, 1987, vol. 59, no. 6, doi: 10.1002/047147844x.ww301.
- [79] “site Internet du ministère de la Santé du Canada <https://www.hc-sc.gc.ca>.” .
- [80] R. F. sur l’Eau et l’Assainissement REFA, “Les types de pollution ,Fiche d’information. ‘<https://www.oieau.fr/ReFEA/module2d.html>.’” 1990.
- [81] T. ASANO and J. A. COTRUVO, “Groundwater recharge with reclaimed municipal wastewater: Health and regulatory considerations,” *Water Res.*,2004,vol. 38, no. 8, doi: 10.1016/j.watres.2004.01.023.

Annexes

TABLE V.1 – Liste des germes et leurs effets sur la santé humaine

Micro-organismes	Symptomes, maladie	Micro-organismes	Symptomes, maladie
Helminthes		Protozoaires	
Ascaris	Ascariase :diarrhée, troubles nerveux Nervosité, troubles digestifs, anorexie Annémie	Entamoeba histolytica	Dysenterie ambiennne
Hymenolepis		Giardia lamblia	Diarrhée, malabsorption
Necator		Balantidium coli	Diarrhée bénigne, ulcère du colon Diarrhée
Toenia	Diarrhée, douleurs muscu- laires	Cryptosporidium	
Trichuris	Diarrhée, douleur abdominale	Toxoplasma gondii	Toxoplasmose : ganglions
Toxocora	Fièvre, douleur abdominale	Cyclospora	faible fièvre Diarrhée, légère fièvre, perte de poids Diarrhée
Strongyloides	Diarrhée, douleur abdomi- nale, nausée	Microsporidium	
Bactéries		Virus	
Salmonella	Typhoïde, paratyphoïde, sal- monellose	Virus de l'hépatite E et A	Hépatite E et A
Shigella	Dysenterie bacillaire	Rotavirus	Vomissement, diarrhée
E.coli	Gastro-entérite	Virus de Norwalk	Vomissement, diarrhée
Yersinia	Gastro-entérite	Adénovirus	Maladie respiratoire, conjonctivite, vomissement, diarrhée
Campylobacter	Gastro-entérite	Coxsackie A	Méningite, fièvre, pharyngite,
Vibrio	Choléra	Calicivirus	maladie respiratoire
Leptospira	Leptospirose	Coronavirus	Vomissement, diarrhée
Mycobacterium	Tuberculose	Poliovirus	Vomissement, diarrhée Paralysie, méningite, fièvre

Nature des polluants	Les paramètres	Effets sur l'environnement
Mécanique	Matière en suspension et Turbidité	Colmatage du lit de la rivière, des zones de reproduction des poissons (frayères)
Organique	Demande biochimique en oxygène DBO5 Demande chimique en oxygène DCO	Diminution de la photosynthèse Consommation d'oxygène dissous au détriment des poissons
Azoté	Azote organique Ammoniac et nitrites nitrates	Perturbe la production d'eau potable Toxique pour les poissons Perturbe la production d'eau potable si fortes concentration Contribue à l'eutrophisation
Phosphoré	Phosphore total Phosphates	Augmente les risques d'eutrophisation = asphyxie par prolifération des algues
Bactériologique	Bactéries et virus	Turbidité Contamination qui nécessite une stérilisation de l'eau potable Limite l'usage de la baignade

TABLE V.2 – Conséquences de la pollution d'eau sur l'environnement



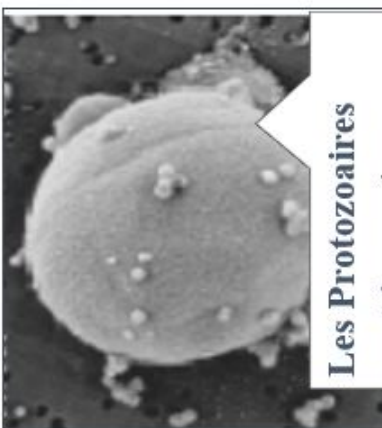
Les Virus:

- sont des parasites intracellulaires de très petite taille (10 à 350 nm) qui se multiplient uniquement dans une cellule hôte.
- Leur isolement et leur dénombrement dans les eaux usées sont difficiles, ce qui conduit vraisemblablement à une sous-estimation de leur nombre réel.



Les Bactéries:

- Les bactéries sont des organismes unicellulaires simples et sans noyau. Leur taille est comprise entre 0,1 et 10 μm .
- La quantité moyenne de bactéries dans les fèces est d'environ 10^{12} bactéries/g



Les Protozoaires

- sont des organismes unicellulaires munis d'un noyau, de taille comprise entre 1 et 200 μm .
- Certains protozoaires adoptent au cours de leur cycle de vie une forme de résistance, appelée kyste. Cette forme peut résister généralement aux procédés conventionnels de traitements des eaux usées.



Les Helminthes:

- sont des vers multicellulaires ce sont majoritairement des organismes parasites.
- Dans les eaux usées, le nombre d'œufs d'helminthes peut être évalué entre 1 et 10^3 œufs.L⁻¹

FIGURE V.1 – Types des micro-organismes dans les eaux usées