

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



Université 8 Mai 1945 Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie des Procédés

Mémoire de Projet de Fin d'Étude 2^{ème} Année Master

**Étude et analyse de l'efficacité du traitement des
eaux usées – Cas STEP Guelma**

Filière : Génie des Procédés
Spécialité : Génie chimique

Présenté par :

MEKHANIA Wiam

BOUAHSSANE Chaima

Sous la direction de :
Pr. CHELAGHMIA Mohamed Lyamine

Année 2023/2024

Remerciements

Avant tout, nous remercions sincèrement Dieu, le Généreux, qui a enseigné à l'homme ce qu'il ne savait pas, et qui nous a donné la force et la patience nécessaires pour accomplir ce modeste travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude et reconnaissance à notre estimé superviseur, le professeur Mohamed Lyamine Chelaghmia. Ses directives précises et son encadrement ont été les fondements sur lesquels ce travail s'est appuyé, le rendant non seulement un effort scientifique, mais aussi une expérience agréable et enrichissante. Nous sommes incapables d'exprimer par des mots notre gratitude envers lui pour la grande confiance qu'il nous a accordée, et pour son soutien continu qui a eu un impact majeur sur l'avancement de cette recherche. Nous apprécions sa patience, sa gentillesse et son humilité, ainsi que ses précieux conseils, sa loyauté, sa disponibilité infinie et son esprit scientifique élevé. Malgré ses nombreuses occupations, il nous a consacré beaucoup de son temps précieux, partageant avec nous une grande partie de ses connaissances avec précision et patience. Nous lui exprimons notre profonde reconnaissance pour son bon traitement et sa compréhension de nos besoins et intérêts. L'esprit de coopération et d'encouragement qu'il a manifesté a eu un effet significatif sur l'accomplissement de ce travail. Nous lui souhaitons un succès continu dans sa carrière académique et professionnelle.

Nous tenons également à remercier mesdames Nahla Kadri et Fatima Zahra Makhlouf deux doctorantes du laboratoire LAIGM pour leur aide efficace, leur grande disponibilité, leur générosité et leur soutien constant dans la réalisation de ce travail.

Nous exprimons aussi notre sincère gratitude à tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à l'accomplissement de ce travail, en appréciant leur rôle et leurs précieuses contributions.

Grâce à cette collaboration et à ces orientations fructueuses, nous avons pu plonger dans le monde de la chimie et des capteurs, acquérant ainsi des connaissances profondes et précieuses qui resteront une référence pour nous dans notre parcours scientifique et professionnel.

Dédicace

Je voulais tout d'abord, dire : louange à Allah qui m'a inspiré le courage et la capacité de faire et accomplir ce modeste travail.

À ma mère « falla » ;

Autant de phrases aussi expressives soient-elles ne sauraient montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour toi. Tu m'as comblé avec ta tendresse et affection tout au long de mon parcours. Tu n'as cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études, tu as toujours été présente à mes côtés pour me consoler quand il fallait. En ce jour mémorable, pour moi ainsi que pour toi, reçoit ce travail en signe de ma vive reconnaissance et ma profonde estime. Puisse le tout puissant te donner santé, bonheur et longue vie

À mon père « salah » ;

Je te remercie pour tout le soutien et l'amour que tu m'as porté depuis mon enfance et j'espère que ta bénédiction m'accompagne toujours. Que ce modeste travail soit l'exaucement de tes vœux tant formulés, le fruit de tes innombrables sacrifices, bien que je ne t'en acquitterai jamais assez. Puisse Dieu, t'accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne te déçoive.

À ma chère et seule sœur « Mouna » ;

Mon cœur et ma vie, ma sœur et mon bonheur, la lumière qui allume mon chemin, la source de mes efforts et motivation tu restes et demeure éternellement l'être qui m'est le plus cher au monde.

À mes chers frères « Boubaker, Salam » ;

Qui apportent toujours de la joie dans mon cœur par leurs actions spontanées, mes vrais amis dans cette vie, merci d'être à mes côtés

A la famille : Mekhania ;

À ma chère binôme « chaima » ;

Peu importe les mots de remerciement et les expressions de gratitude que j'utilise, ils ne seront jamais à la hauteur de ce que tu mérites. Les mots de la langue sont insuffisants, et je resterai toujours incapable de l'exprimer pleinement.

À mes très chères amies « Iman, Hadil, Djihane, Rania » ;

"Je remercie Dieu chaque jour pour avoir des amis comme vous dans ma vie, vous l'avez illuminée de la lumière de l'amitié et du soutien."

Merci pour votre amour infini.

A tout ceux que j'aime et ceux qui m'aiment

Mekhaina Wiam

Dédicace

Je dédie ce travail modeste aux personnes les plus chères à mon cœur :

À mes chers parents

La source de sécurité, de fierté, de dignité, et de ma force inépuisable, et raison de mon sourire constant. Je vous adresse mes plus sincères remerciements pour vos innombrables sacrifices, votre amour inconditionnel, votre soutien ininterrompu, et vos prières qui m'ont accompagné à chaque étape. Je prie Dieu de vous accorder santé et bien-être, et de vous garder à mes côtés pour la vie.

À mes grands-parents bien-aimés

Les plus beaux souvenirs et les meilleurs moments de mon enfance ont été passés avec vous. Merci pour chaque instant de tendresse et d'amour. Vous êtes la lumière qui a illuminé mon enfance et la chaleur qui m'a enveloppé à chaque moment.

À mes chers frères « Abdallah, Mohammed »

Les bougies de ma vie qui ont illuminé mon chemin, les mains tendres qui me relèvent quand je tombe, la force qui me pousse en avant. Vous êtes la lumière de ma vie et le soutien de mon cœur. Grâce à vous, mon bonheur est complet et mes jours s'épanouissent. Merci d'être toujours à mes côtés, vous êtes les plus beaux cadeaux du destin.

À ma chère binôme « Wiam »

La supportrice et amie, qui a été pour moi un pilier et un refuge même dans les moments de silence. Je te remercie du fond du cœur pour ta compréhension, ta patience et ton soutien continu.

À mes fidèles amis « Bassma, Ikram, Ramia, Zaineb »

Vous êtes la seconde famille que j'ai choisie, merci pour votre amitié sincère et votre soutien sans faille, vous avez toujours été une source d'inspiration et de force pour moi.

À ma grande famille

Chaque membre de vous a laissé une empreinte dans ce voyage, je vous exprime tout mon amour et ma gratitude, vous êtes la fondation sur laquelle ce succès a été construit.

Bouahssane Chaima

Table des matières

Table des matières	I
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VIII
Liste des abréviations	IX
Résumé	XI
Introduction général	1
Référence bibliographiques	3

CHAPITRE I :

GENERALITE SUR LE TRAITEMENT DES EAUX USEES DE LA STEP DE GUELMA

I.1. Définition des eaux usées.....	4
I.2.1. Les eaux usées domestiques	4
I.2.2. Eaux usées industrielles	5
I.2.3. Les eaux usées pluviales « dites nuisibles »	6
I.2.4. Les eaux usées agricoles.....	6
I.3. Caractéristique des eaux usées.....	6
I.3.1. Les paramètres physiques.....	7
I.3.1.1. Température.....	7
I.3.1.2. Conductivité électrique (CE)	7
I.3.1.3. La turbidité	7
I.3.1.4. Matières en suspension (MES)	8
I.3.1.5. Les matières décantables	8
I.3.2. Les paramètres chimiques	9
I.3.2.1. Potentiel d'hydrogène.....	9
I.3.2.2. La demande biologique en oxygène (DBO5)	10
I.3.2.3. La demande chimique en oxygène (DCO)	10
I.3.2.4. Oxygène dissous	11
I.3.2.5. La biodégradabilité	11
I.3.2.6. Carbone organique total (COT)	11
I.3.2.7. L'azote et le phosphore.....	12
I.3.2.8. Salinité	12
I.3. Paramètre organoleptiques	12
I.3.3.1. Gout-Odeur	12

I.3.3.2. La couleur	13
I.3.4. Paramètre microbiologique.....	13
I.3.5. Paramètres bactériologiques.....	13
I.3.5.1. Coliformes totaux (CT)	13
I.3.5.2. Les coliformes fécaux.....	13
I.3.5.3. Streptocoques fécaux	14
I.3.6. Les paramètres toxiques	14
I.4. Les étapes de traitement au niveau de la STEP de Guelma.....	14
I.4.1. Prétraitement	15
I.4.1.1. Dégrillage	15
I.4.1.2. Dessablage	16
I.4.1.3. Dégraissage– Déshuilage.....	16
I.4.2. Traitement primaire (Décantation primaire)	17
I.4.3. Traitement secondaire	18
I.4.3.1. Le traitement biologique.....	18
I.4.3.2. Une décantation secondaire (clarification)	19
I.4.4. Désinfection	19
I.4.5. Traitement des boues.....	20
I.4.5.1. Des traitements de stabilisation	20
I.4.5.2. Des traitements de réduction de la teneur en eau des boues.....	20
Conclusion.....	21
Référence bibliographique	22

CHAPITRE II :

POLLUTION CHIMIQUE ET METHODES D'ANALYSES DES EAUX USEES

II.1. Les différents types de pollutions.....	26
II.1.1. La pollution physique	26
II.1.2. La pollution microbiologique	26
II.2. La pollution chimique des eaux usées	27
II.2.1. La pollution organique	27
II.2.1.1. Les médicaments	28
II.2.1.2. Les hydrocarbures	29
II.2.1.3. Les détergents.....	30
II.2.1.4. Les pesticides	31

II.2.2. La pollution minérale	31
II.2.2.1. Les métaux lourds	32
II.2.2.1.1. Le mercure.....	32
II.2.2.1.2. Le plomb	33
II.2.2.1.3. Le cadmium.....	34
II.2.2.1.4. Le nickel	35
II.2.2.1.5. Le cuivre.....	36
II.3. Normes de rejet des eaux usées	37
II.3.1. Normes de l’OMS :.....	37
II.3.2. Normes européennes	38
II.3.3. Normes algériennes.....	39
II.5. Méthodes analytiques utilisées pour l’analyse de l’eau.....	42
II.5.1 Les méthodes classiques	42
II.5.1.1 La spectrométrie de masse	42
II.5.1.2 Spectrophotométrie UV-visible.....	43
II.5.1.3 La chromatographie Liquide à Haute Performance (HPLC).....	45
II.5.1.4 Le titrage.....	46
II. 5.1.5 Spectroscopie Absorption atomique.....	48
II. 5.2 Méthodes modernes des capteurs in-situ	49
II. 5.2.1 Définition de capteur	49
II.6-Méthodes d’élimination des métaux lourds est les molécules organiques.....	50
II.6.1 Électrodéposition	50
Conclusion.....	51
Références bibliographiques	52

CHAPITRE III :

PROCEDURES EXPERIMENTALES ET TECHNIQUES DE CARACTERISATIO

III.1. Produits chimiques et montage expérimental.....	58
III.1.1. Produits chimiques	58
III.1.2. Solutions utilisées	60
III.2. Dispositif expérimental	60
III.2.1. Montage expérimental pour l’étude électrochimique.....	60
III.2.2. Montage expérimental pour l’élimination des métaux lourds	61
III.2.3. Équipements secondaires.....	62

III.2.3.1. Agitateur magnétique à plaque chauffante MS-H-Pro+	62
III.2.3.2. Étuve U de Memmert.....	63
III.2.3.3. Bain de nettoyage Ultrason-H.....	64
III.3. Nettoyage de la verrerie	65
III.4. Techniques et matériels de caractérisation.....	65
III.4.1. Voltampérométrie cyclique	66
III.4.2. Voltamétrie différentielle à ondes carrées	66
III.4.3. Spectroscopie d'absorption atomique.....	67
III.5. Matériels de caractérisation morphologique et structurale	68
III.5.1. Microscopie électronique à balayage	68
III.5. 2. Spectroscopie de rayons X à dispersion en énergie (EDX).....	69
III.6. Techniques d'élimination utilisées.....	70
III.6.1. Electrodeposition	70
Conclusion.....	71
Références bibliographiques	72

CHAPITRE VI :

RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1 Caractérisation structurale et morphologique des matériaux d'électrode en graphène ...	74
IV.1.1 Analyses Morphologique par MEB.....	74
IV.1.2 Analyses chimique élémentaire par EDX.....	74
IV.2 Étude électrochimique.....	75
IV.2.1 Étude voltampérométrique du couple $\text{Fe}(\text{CN})_6 - 3/\text{Fe}(\text{CN})_6 - 4$ sur le graphène ..	75
IV.2.2 Analyses avec la voltamétrie cyclique	76
IV.2.3 Analyses électrochimique par la voltamétrie à onde carrée (SWV).....	79
IV.2.4 Dosage par la voltamétrie à onde carrée.....	80
IV.2.5. Analyses électrochimique par l'absorption atomique	86
VI .4. Conclusion	87
Conclusion général.....	88

Liste des figures

CHAPITRE I :

GENERALITE SUR LE TRAITEMENT DES EAUX USEES DE LA STEP DE GUELMA

Figure I.1	une eau usée	4
Schéma I.1	Schéma de principales voix de traitements des eaux usées et des boues...	15
Figure I.2	Dégrillage.....	16
Figure I.3	Dessablage.....	16
Figure I.4	Dégraissage – Déshuilage.....	17
Figure I.5	Décantation primaire.....	18
Figure I.6	Bassin d'aération.....	19
Figure I.7	Bassin de désinfection.....	20
Figure I.8	stabilisation des boues.....	21

CHAPITRE II :

POLLUTION CHIMIQUE ET METHODES D'ANALYSES DES EAUX USEES

Figure II.1	les médicaments polluent.....	28
Figure II.2	fuite de gasoil à la station de servies.....	29
Figure II.3	Produits de nettoyage.....	30
Figure II.4	les pesticides.....	31
Figure II.5	Le mercure.....	32
Figure II.6	Le plomb.....	33
Figure II.7	le cadmium.....	34
Figure II.8	Le nickel.....	35
Figure II.9	Le cuivre.....	36
Figure II.10	Représentation schématique d'un spectromètre de masse.....	43
Figure II.11	Principe de la spectrophotométrie UV-visible.....	44
Figure II.12	Principe de fonctionnement d'une chaine HPLC.....	46
Figure II.13	un dispositif de titrage.....	47
Figure II.14	Installation générale de la spectroscopie d'absorption atomique	48
Figure II.15	Principe d'un capteur.....	50

Figure II.16	Montage d'une cellule d'électrolyse.....	50
---------------------	--	----

CHAPITRE III :

PROCÉDURES EXPERIMENTALES ET TECHNIQUES DE CARACTERISATIO

FigureIII.1	Représentation du dispositif expérimental.....	61
FigureIII.2	Le dispositif expérimental utilisé pour l'élimination des métaux lourds	62
FigureIII.3	Agitateur magnétique à plaque chauffante MS-H-Pro Plus SCIOLOGEX, USA) utilisé dans ce travail.....	63
FigureIII.4	Étuve U de Memmert utilisée lors de ce travail.....	64
FigureIII.5	Ultrason-H de marque J.P Selecta utilisé dans ce travail.....	65
FigureIII.6	(a) Signal potentiel-temps typique de la voltampérométrie cyclique(b) Exemple d'un voltampérogramme cyclique.....	66
FigureIII.7	Variation du potentiel au cours du temps lors d'une voltammétrie à vague carrée.....	67
FigureIII.8	Réponse en courant en fonction du potentiel lors d'une voltammétrie à vague carrée.....	67
FigureIII.9	Spectroscopie d'absorption atomique de la marque Perkin Elmer AA400.....	68
FigureIII.10	Microscope électronique à balayage JEOL. JSM – 7500F.....	69

CHAPITRE VI :

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Figure IV.1	Image MEB obtenue sur l'électrode de Graphène	74
Figure IV.2	Spectre EDX du capteur utilisé.....	75
Figure VI.3	Voltampérogramme relatif à la oxydoréduction des ions $[\text{Fe}(\text{CN}_6)]^{-3}/[\text{Fe}(\text{CN}_6)]^{-4}$ obtenu sur une électrode de graphène.....	76
Figure VI.4	Voltampérogrammes obtenus en absence (noir) et en présence (rouge) des cations de Cadmium.....	77
Figure VI.5	Voltampérogrammes obtenus en absence (noir) et en présence (rouge) des cations de Plomb.....	78
Figure VI.6	Voltampérogrammes obtenus en absence (noir) et en présence (rouge) des cations de Mercure.....	78
Figure VI.7	Voltampérogrammes obtenus en absence (noir) et en présence (rouge) des cations de cuivre.....	79
Figure VI.8	voltampérogrammes impulsionnels à ondes carrées obtenus dans une solution nitrique 0.1 M, avec et sans l'ajout de $100 \mu\text{M.L}^{-1}$ des cations de Cd^{2+} , Pb^{2+} , Hg^{2+} et Cu^{2+}	80

Figure VI.9	Voltampérogrammes à ondes carrée en fonction de la concentration des cations métallique de Cd^{2+} , Pb^{2+} , Hg^{2+} et Cu^{2+}	81
FigureVI.10	Courbe d'étalonnage du courant de pic de redissolution en fonction de la concentration des cations métalliques.....	82
FigureVI.11	Voltampérogrammes à ondes carrée en fonction de la concentration des échantillons réels des eaux usées.....	83
FigureIV.12	Voltammogrammes à ondes carrée obtenus dans des échantillons réels prélevés à l'entrée de la station d'épuration (STEP)contaminés par 200 PPb.....	84
FigureIV.13	Alimentation électrique utilisée pour élimineles métaux lourds par l'électrodéposition.....	85
FigureIV.14	l'élimination des métaux lourds par électrodéposition sur un échantillon en utilisant la technique de voltampérométrie à a onde carrée.....	85
Figure VI.15	Spectroscopie d'absorption atomique de la marque Perkin Elmer AA400.....	86

Liste des tableaux

CHAPITRE I :

GENERALITE SUR LE TRAITEMENT DES EAUX USEES DE LA STEP DE GUELMA

Tableau I.1	Minéralisation de l'eau en fonction de la conductivité.....	7
Tableau I.2	Classes de turbidité usuelles (NTU néphélogétrie turbidité unit).....	8
Tableau I.3	Classification des eaux selon leurs pH.....	9
Tableau I.4	Volumes d'eau utilisés dans l'analyse de la DBO5.....	10

CHAPITRE II :

POLLUTION CHIMIQUE ET METHODES D'ANALYSES DES EAUX USEES

Tableau II.1	Germe pathogène rencontrés dans les eaux usées.....	27
Tableau II.2	Normes de rejet d'eaux usées chargés en métaux lourds dans les.....	37
Tableau II.3	Normes de rejet des eaux usées (OMS).....	38
Tableau II.4	Normes européenne de rejet des eaux usées.....	39
Tableau II.5	Normes algérienne de rejet des eaux usées.....	40

CHAPITRE III :

PROCEDURES EXPERIMENTALES ET TECHNIQUES DE CARACTERISATION

Tableau III.1	Produits chimiques utilisés dans la partie expérimentale.....	59
----------------------	---	----

CHAPITRE VI :

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau IV.1	Résultats d'analyse des échantillons pharmaceutiques commerciaux	87
---------------------	--	----

Liste des abréviations

CE	Conductivité électrique
NTU	Néphélométrie turbidité unit
MES	Matières en suspension
MVS	Matières volatiles en suspension
MMS	Matières minérales
pH	Potentiel d'hydrogène
DBO5	Demande biologique en oxygène
O₂	Dioxygène
CO₂	Dioxyde de carbone
H₂O	L'eau
DCO	Demande chimique en oxygène
MO	Matière organique
OMS	L'organisation mondiale de la santé
CaCO₃	Carbonate de calcium
K	Biodégradabilité
COT	Carbone organique total
N-NTK	Azote total kjeldahl
N-NH₄	Azote ammoniacal
SO₂	Dioxyde de soufre
H₂S	Sulfure d'hydrogène
CT	Coliformes totaux
SF	Streptocoques fécaux
STEP	Stations d'épuration
Hg	Mercure
Pb	Plomb
Cd	Cadmium
Ni	Nickel
Cu	Cuivre
CIRC	Centre International de Recherche sur le Cancer
CEE	Communauté économique européenne
NH₄⁺	Ammonium

NO₂	Dioxyde d'azote
NO₃	Nitrate
P₂O₅	Pentaoxyde de diphosphore
HPLC	Chromatographie Liquide à Haute Performance
UV	L'ultraviolet
MS	Spectromètres de masse
SAA	Spectrométrie d'absorption atomique
POAs	Procédés d'oxydation avancés
HO⁻	Radical hydroxyle
H₂O₂	Peroxyde dihydrogène
O₃	L'ozone
Fe²⁺	Ion ferreux
OH⁻	Hydroxyde
ABS	Solution tampon d'acétate
ENH	L'électrode normale à hydrogène
kHz	kilohertz
CV	Voltampérométrie cyclique
SWV	Voltamétrie différentielle à ondes carrées
POA	Procédés d'oxydation avancée
EDX	L'analyse par rayons X à dispersion d'énergie
MEB	Microscope à balayage électronique
PPb	Parties par milliard
PPm	Parties par million
E_R	Electrode de référence
E_T	Electrode de travail
E_A	Électrode auxiliaire
SPE	Electrode sérigraphie
E_F	Potentiel final
E_I	Potentiel initial

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier l'efficacité du traitement des eaux usées à la station d'épuration (STEP) de la ville de Guelma. La station effectue une série d'analyses des eaux à l'entrée et à la sortie de la station, mais elles ne comprennent pas les analyses les plus importantes, à savoir la détection des contaminants chimiques tels que les métaux lourds et les produits pharmaceutiques.

Dans ce travail, nous proposons une nouvelle technique utilisant le capteur sérigraphie pour détecter ces contaminants chimiques avec une grande précision et efficacité.

La caractérisation des solutions contaminées à l'aide de la technique de voltampérométrie à onde carrée (SWV) confirme l'efficacité de l'électrode sérigraphie (SPE) pour la détection des contaminants chimiques, en particulier les métaux lourds.

Cette technologie est très précise et permet de détecter les produits chimiques mieux que les méthodes traditionnelles. De plus, elle aide à réduire le temps et les coûts nécessaires pour traiter les eaux usées, ce qui la rend plus efficace.

En outre, nous avons proposé une technique de l'électrodéposition pour éliminer les métaux lourds et avons prouvé l'efficacité de cette technique.

Mots clés : STEP ; Électrode sérigraphie ; métaux lourds ; voltampérométrie à onde carrée ; l'électrodéposition.

Abstract

The aim of this work is to study the efficiency of wastewater treatment at the Guelma wastewater treatment plant. The plant performs a series of inlet and outlet water analyses, but these do not include the most important analyses, namely the detection of chemical contaminants such as heavy metals and pharmaceuticals.

In this work, we propose a new technique using the screen-printing sensor to detect these chemical contaminants with high accuracy and efficiency.

Characterization of contaminated solutions using the square-wave voltammetry (SWV) technique confirms the effectiveness of the screen-printing electrode for detecting chemical contaminants, particularly heavy metals.

This technology is highly accurate and detects chemicals better than traditional methods. In addition, it helps to reduce the time and cost required to treat wastewater, making it more efficient.

In addition, we have proposed an electrochemical deposition technique to remove heavy metals and proved its effectiveness.

Keywords : STEP ; Screen-printing electrode ; heavy metals; square-wave voltammetry ; electrodeposition.

مخلص

الهدف من هذا العمل هو دراسة كفاءة معالجة مياه الصرف الصحي في محطة التصفية لمدينة قالمة. تقوم المحطة بإجراء مجموعة من التحاليل للمياه عند مدخل ومخرج المحطة، ولكنها لا تشمل أهم التحاليل وهي الكشف عن الملوثات الكيميائية مثل المعادن الثقيلة والمنتجات الصيدلانية.

نقدم من خلال هذا العمل تقنية جديدة تتمثل في استخدام المستشعر المطبوع على الشاشة للكشف عن هذه الملوثات الكيميائية بدقة وكفاءة عالية.

حيث يؤكد توصيف المحاليل الملوثة باستخدام تقنية قياس جهد الموجة المربعة نجاعة هذا المستشعر في الكشف عن الملوثات الكيميائية خاصة المعادن الثقيلة.

هذه التقنية تمتاز بدقة عالية تمكنها من الكشف عن الملوثات الكيميائية بدقة تفوق الطرق التقليدية، بالإضافة إلى ذلك، تُساهم هذه التقنية في تقليل الوقت والتكلفة اللازمين لمعالجة المياه، مما يجعلها خيارًا أكثر كفاءة بالإضافة إلى ذلك، اقترحنا تقنية الترسيب الكهربائي للتخلص من المعادن الثقيلة وأثبتنا فعالية هذه التقنية.

الكلمات المفتاحية: محطة التصفية؛ المعادن الثقيلة؛ المستشعر المطبوع على الشاشة؛ قياس جهد الموجة المربعة؛ الترسيب الكهربائي.

Introduction général



Introduction général

L'eau ne peut être considérée comme un simple produit commercial, elle doit être classée comme un patrimoine universel qui doit être protégée, défendue et traité avec soin. L'eau a toujours été synonyme de vie et de la croissance. Connue comme "or bleu", elle est essentielle à la survie humaine, le corps étant composé à plus de 60% d'eau. Elle est également vitale pour l'agriculture et l'élevage, piliers de la sécurité alimentaire. Sans elle, la vie sur Terre serait impossible pour tous les êtres vivants [1-2].

Cette importance cruciale de l'eau en fait une ressource vitale pour la vie humaine, car les humains en dépendent pour la boisson, l'agriculture et l'industrie. La pénurie d'eau dans certaines régions accroît le risque de conflit, car les États et les communautés se disputent les droits d'accès et d'utilisation. Ces conflits peuvent être diplomatiques ou économiques et peuvent parfois se transformer en conflits armés. Un exemple en est le conflit sur les eaux du Nil entre l'Égypte, l'Éthiopie et le Soudan, où les projets de barrages et le contrôle du débit d'eau provoquent des tensions régionales. La gestion durable et équitable des ressources en eau est essentielle pour éviter de tels conflits et parvenir à la stabilité régionale [3-5].

Au cours des dernières décennies, l'Algérie a connu une forte croissance démographique, une urbanisation massive et le développement d'activités industrielles, qui ont conduit à la production de grandes quantités d'eaux usées, notamment dans les centres urbains, qui doivent être traités avant d'être rejetés dans l'environnement. Les stations d'épuration des eaux usées en Algérie et dans la wilaya de Guelma jouent un rôle essentiel dans ce processus, car elles surveillent la qualité de l'eau et effectuent les analyses nécessaires pour la purifier des polluants [6].

Cependant, le principal défi réside dans la présence de polluants émergents, tels que des métaux lourds et des résidus de médicaments, dans les eaux usées. Ces substances toxiques peuvent avoir des conséquences dévastatrices sur l'écosystème aquatique et la santé humaine. De plus, le plus gros problème réside dans le manque d'analyses suffisantes pour surveiller et suivre avec précision ces polluants, ce qui augmente le risque de leurs effets négatifs [7-8].

Malgré l'existence de méthodes classiques d'analyse de l'eau, telles que la méthode de spectroscopie de masse, UV visible, méthodes volumétrique, ... etc., ces méthodes classiques sont souvent coûteuses et nécessitent un équipement complexe. Cependant, face au besoin de surveiller en temps réel la qualité de nos ressources en eau à moindre coût, une alternative innovante émerge : la méthode de capteurs in-situ. Cette approche moderne et économique offre de nombreux avantages en termes de simplicité, de rapidité et d'efficacité pour détecter les

polluants et déterminer leur quantité en temps réel, au même endroit où ils sont émis, ouvrant la voie à une gestion plus efficace des ressources en eau et à une protection accrue de l'environnement [9].

Après avoir prouvé la présence de polluants émergents dans les eaux usées à l'aide de capteurs, il est difficile d'éliminer ces polluants par les méthodes de traitement traditionnelles. Heureusement, des techniques de purification plus avancées, comme L'électrodéposition et l'oxydation avancée, offrent des solutions prometteuses à ce défi [10-11].

L'électrodéposition permet l'élimination des ions métalliques présents dans l'eau en les faisant migrer vers une cathode sous l'influence d'un courant électrique. Cette technique s'avère particulièrement efficace pour le traitement des effluents industriels contenant des métaux lourds tels que le cuivre, le nickel, le zinc et le plomb [12].

L'électrodéposition offre un traitement combiné performant pour éliminer simultanément les métaux lourds et les polluants organiques des eaux contaminées. Cette approche prometteuse ouvre la voie à une gestion plus efficace et durable des ressources en eau [13-14].

Ce mémoire sera divisé en quatre parties principales ils sont :

Dans le premier chapitre, présente la définition des eaux usées, leur origine, leur caractéristique et enfin les différentes étapes du traitement des eaux usées.

Le deuxième chapitre est Une étude bibliographique sur les polluants chimiques présents dans les eaux usées et les méthodes permettant de les détecter et de les éliminer.

Le troisième chapitre est spécialement consacré à la partie expérimentale qui englobera une description relativement détaillée sur l'appareillage, les solvants, les réactifs utilisés, ainsi que les différentes techniques de caractérisation.

Dans le quatrième chapitre, seront présentées les caractéristiques structurales et morphologiques, ainsi que les propriétés électrochimiques du capteur utilisé. Nous analysons la qualité des eaux usées en utilisant des méthodes électrochimiques et démontrons l'efficacité de la technique d'électrodéposition pour l'élimination des métaux lourds présents dans ces eaux.

Enfin une conclusion générale et des perspectives clôturent ce manuscrit.

Référence bibliographiques

- [1] Abderrahim H. Analyse physicochimique et microbiologique des eaux du lac de Reghaïa (W. d'Alger) après traitement par la station d'épuration de Reghaïa [Mémoire de Master]. [Université de Blida] ; 2015.
- [2] Tebessi A, Bahloul M. Caractérisation des eaux usées épurées de la ville de Guelma et leur aptitude à l'irrigation [Mémoire de Master]. [Université 8 Mai 1945 Guelma] ; 2014.
- [3]<https://www.france24.com/en/video/20230913-ethiopia-says-filling-of-nile-renaissance-mega-dam-complete>. Consulté le 12/05/2024.
- [4]https://www.lemonde.fr/afrique/article/2020/06/27/barrage-sur-le-nil-l-egypte-l-ethiopie-et-le-soudan-s-accordent-pour-reporter-la-mise-en-eau_6044363_3212.html. Consulté le 15/05/2024.
- [5]https://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/png/PNG%202011/5_fiche_eau_et_vie_web.pdf. Consulté le 15/05/2024
- [6] Touazi K. Étude de l'efficacité d'épuration des eaux usées domestiques de l'oued de Bechar par l'utilisation du sable et les graines de MoringaoleiferaLam [Thèse]. [Université Abou- BekrBelkaid–Tlemcen] ; 2021.
- [7] J'Ecko M. Impacts des changements globaux sur la qualité de l'eau et les activités productives. Situation actuelle, scénarios et modes de récupération durable des zones les plus vulnérables [Rapport de fin de mission]. [Ecole supérieure d'agro-développement international] ; 2018.
- [8]https://www.yearbook-ers.jle.com/e-docs/polluants_emergents_un_defi_pour_la_gestion_des_ressources_en_eau_309282/yb_breve.phtml. Consulté le 16/05/2024.
- [9] Goblirsch T, Mayer T, Penzel S, Rudolph M et Borsdorf H [In Situ Water Quality Monitoring Using an Optical Multiparameter Sensor Probe] ; 2023.
- [10]<https://www.anses.fr/fr/content/contamination-des-aliments-l%E2%80%99anses-propose-des-contr%C3%B4les-mieux-cibl%C3%A9s-pour-plus-d%E2%80%99efficacit%C3%A9>. Consulté le 17/05/2024.
- [11]<https://www.veoliawatertechnologies.com/fr/applications/traitement-eaux-usees-industrielles>. Consulté le 17/05/2024.
- [12] Siddiqi G, Pan Z, Hu S. Semiconductor Photoelectrodes .Electrodeposition of metal. Vol. 97, 2017, Pages 81-138 ; 2017.
- [13] Rajoria S, Vashishtha M, Sangal V K. Review on the treatment of electroplating industry wastewater by electrochemical methods.Department of Chemical Engineering, Malaviya National Institute of Technology, Jaipur 302017, India; 2021.
- [14] Zaviska F, Drogui P, Mercier G, Blais J F. Procédés d'oxydation avancée dans le traitement des eaux et des effluents industriels : Application à la dégradation des polluants réfractaires. Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science. vol. 22, n° 4, 2009, p. 535-564 ; 2009.

CHAPITRE I :

Généralité sur le Traitement des Eaux Usées de la STEP de Guelma



Les eaux usées sont des milieux extrêmement complexes, altérées par les activités anthropiques à la suite d'un usage domestique, industriel, artisanal, agricole ou autres. Elles sont considérées comme polluées et doivent être donc traitées avant toute réutilisation ou injection dans les milieux naturels récepteurs.

La dépollution des eaux usées urbaines nécessite une succession d'étapes faisant appel à des traitements physiques, physico - chimiques et biologiques [1].

Ce chapitre présente l'origine des eaux usées, leurs caractéristiques de ces eaux et enfin les différents types de procédés du traitement des eaux usées.

I.1. Définition des eaux usées

Une eau usée ou résiduaire est une eau issue des activités anthropiques (domestiques, industrielles, agricoles) qui a été dégradée après usage. Le rejet direct de ces eaux dans le milieu naturel (Fig. I.1) représente la forme de pollution la plus dommageable pour l'ensemble des écosystèmes. Ces eaux transportent des concentrations élevées en matières polluantes (azote, phosphore, matière organique, métaux lourds, bactéries pathogènes...), ce qui détériore la qualité des eaux pour les milieux récepteurs (rivières, lac, ..., etc.) [2].



Figure I.1 : une eau usée [3]

I.2. Origine des eaux usées

Selon l'origine des eaux usées, quatre grandes catégories sont distinguées :

- Les eaux usées domestiques
- Les eaux usées industrielles
- Les eaux usées pluviales
- Les eaux usées agricoles

I.2.1. Les eaux usées domestiques

Les effluents domestiques : sont composés d'eaux usées domestiques : eaux ménagères comprennent des déjections humains (eaux de lavabo, douche, baignoire, appareils ménagers). Vannes (urines et matières fécales), dans le système dit « tout à l'égout » [4].

Les déchets présents dans ces eaux souillées par des matières organiques dégradables et des matières minérales. Ces substances sont sous forme dissoute ou en suspension. Les réseaux d'eaux usées aboutissent à des stations d'épuration où les eaux sont traitées.

Elles proviennent essentiellement :

- Des eaux de cuisine qui contiennent des matières minérales en suspension provenant du lavage des légumes, des substances alimentaires à base de matières organiques (glucides, lipides, protides) et des produits détergents utilisés pour le lavage de la vaisselle et ayant pour effet la solubilisation des graisses ;
- Des eaux de buanderie contenant principalement des détergents ;
- Des eaux de salle de bain chargées en produits utilisés pour l'hygiène corporelle, généralement des matières grasses hydrocarbonées ;
- Des eaux de vanne qui proviennent des sanitaires(WC), très chargées en matières organiques [5].

En Algérie, la pollution journalière produite par une personne utilisant de 150 à 200 litres d'eaux est évaluée :

- De 70 à 90 g de matières en suspension.
- De 60 à 70 g de matières organiques.
- De 15 à 17 g de matières azotées.
- 4 g de phosphores.
- Plusieurs milliards de germes pour 100 ml [6].

I.2.2. Eaux usées industrielles

Tous les rejets résultant d'une utilisation de l'eau autre que domestique sont qualifiés de rejets industriels. Cette définition concerne les rejets des usines, mais aussi les rejets d'activités artisanales ou commerciales : blanchisserie, restaurant, laboratoire d'analyses médicales, ...etc. [7].

Leurs caractéristiques varient d'une industrie à l'autre. En plus des matières organiques, azotées ou phosphorées, elles sont chargées en différentes substances chimiques organiques et métalliques. Selon leur origine industrielle elles peuvent également contenir :

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

Avant d'être rejetées dans les réseaux de collecte, les eaux usées industrielles doivent faire l'objet d'un traitement. Elles ne sont mélangées aux eaux domestiques que lorsqu'elles ne

présentent plus de danger pour les réseaux de collecte et ne perturbent pas le fonctionnement des stations d'épurations [8].

I.2.3. Les eaux usées pluviales « dites nuisibles »

En période de temps pluvieux, les eaux pluviales peuvent engendrer d'importantes pollutions des cours d'eau, notamment à la suite d'épisodes orageux ; au contact de l'air (fumées industrielles, cendre d'incinération), l'eau de pluie se charge d'impuretés puis, en ruisselant, elle entrainerait des résidus déposés sur les toits et les chaussées des villes (huiles de vidange, carburants, résidus de pneus et métaux lourds...).

En outre, lorsque le système d'assainissement est de type " unitaire ", les eaux pluviales se mélangent aux eaux usées domestiques, dans cette situation, les contraintes de préservation des installations d'épuration peuvent imposer un déversement ("délestage") de ce " mélange " très pollué dans le milieu naturel.

Enfin, dans les zones urbaines, la forte imperméabilisation des sols dans les zones urbaines augmente le risque d'inondation qui s'ajoute à celui de la pollution. Cette situation accentue la vulnérabilité du milieu [9].

I.2.4. Les eaux usées agricoles

Ce sont des eaux qui ont été polluées par des substances utilisées dans le domaine agricole. Dans le contexte d'une agriculture performante et intensive, l'agriculteur est conduit à utiliser divers produits d'origine industrielle ou agricole dont certains présentent ou peuvent présenter, des risques pour l'environnement et plus particulièrement pour la qualité des eaux. Il s'agit principalement :

- Des fertilisants (engrais minéraux du commerce ou déjections animales produites ou non sur l'exploitation) ;
- Des produits phytosanitaires (herbicides, fongicides, insecticides, ..., etc.) [10].

I.3. Caractéristique des eaux usées

Les normes de rejet des eaux usées, fixent des indicateurs de qualité physico-chimique et biologique. Ce potentiel de pollution généralement exprimés en mg/l, est quantifié et apprécié par une série d'analyses. Certains de ces paramètres sont indicateurs de modification que cette eau sera susceptible d'apporter aux milieux naturels récepteurs. Pour les eaux usées domestiques, industrielles et les effluents naturels, on peut retenir les analyses suivantes [11] :

I.3.1. Les paramètres physiques

I.3.1.1. Température

La température est un facteur écologique important du milieu. Sa connaissance doit être précise car elle joue un rôle dans la solubilité des sels dissous et surtout des gaz, donc sur la conductivité électrique et de la détermination du pH. Elle agit aussi comme un facteur physiologique agissant sur le métabolisme de croissance des micro-organismes vivant dans l'eau. Une température élevée peut favoriser des goûts et des odeurs désagréables. De plus elle accélère la plupart des réactions physico-chimiques [12].

I.3.1.2. Conductivité électrique (CE)

Elle permet de connaître le degré de minéralisation des eaux. La conductivité mesure la concentration des sels ioniques et nous informe sur le degré de salinité de l'eau. La conductivité d'une eau usée dépend essentiellement de la qualité de l'eau potable utilisée et des activités industrielles de la population. Le tableau suivant nous renseigne sur la minéralisation de l'eau en fonction de la conductivité [13].

Tableau I.1 : Minéralisation de l'eau en fonction de la conductivité [13]

Conductivité	Appréciation
Conductivité <100 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation très faible
100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ < CE < 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation faible
200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ < CE < 333 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation moyenne accentuée
333 $\mu\text{S}/\text{cm}$ < CE < 666 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation moyenne
666 $\mu\text{S}/\text{cm}$ < CE < 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation importante
Conductivité > 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation excessive

I.3.1.3. La turbidité

C'est la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de matières non dissoutes. La turbidité d'eau est due à la particule en suspension, notamment colloïdales : argiles, limons, grains de silice, matières organiques, l'appréciation de l'abondance de ces particules mesure sont degré de turbidité [14]. Le tableau suivant représente classes de turbidité usuelle (NTU néphélogéométrie turbidité unit) [15].

Tableau I.2 : Classes de turbidité usuelles (NTU néphélogéométrie turbidité unit) [15]

NTU < 5	Eau claire
5 < NTU < 30	Eau légèrement trouble
NTU > 50	Eau trouble

I.3.1.4. Matières en suspension (MES)

Elle représente, la fraction constituée par l'ensemble des particules organique (MVS) ou minérales (MMS) non dissoutes de la pollution. Elle constitue un paramètre important qui marque bien le degré de pollution d'un effluent urbain ou industriel. Les MES s'expriment par la relation suivante :

$$\text{MES} = 30\% \text{ MMS} + 70\% \text{ MVS}$$

- **Les matières volatiles en suspension (MVS)**

Elles représentent la fraction organique de MES et elles sont obtenues par calcination de ces MES à 525°C pendant 2 heures. La différence de poids entre les MES à 105°C et les MES à 525°C donne la « perte au feu » et correspond à la teneur en MVS en (mg/l) d'une eau.

- **Les matières minérales (MMS)**

Elles représentent le résultat d'une évaporation totale de l'eau, c'est-à-dire son < extrait sec > constitué à la fois par les matières en suspension et les matières solubles telles que les chlorures, les phosphates...etc. Elles représentent la différence entre les matières en suspension (MES) et les matières volatiles en suspension (MVS) et correspondent à la présence de sel et de la silice. L'abondance des matières minérales en suspension dans l'eau augmente la turbidité, réduit la luminosité et par ce fait abaisse la productivité d'un cours d'eau, entraînant ainsi une chute en oxygène dissous et freinant les phénomènes photosynthétiques qui contribuent à la réaération de l'eau. Ce phénomène peut être accéléré par la présence d'une forte proportion de matières organiques consommatrices d'oxygène [16].

I.3.1.5. Les matières décantables et non décantables

Les matières décantables sont composées des matières en suspension qui sédimentent en deux heures dans une éprouvette. Cette analyse est surtout réalisée sur les effluents de sortie de certains ouvrages d'épuration, pour estimer le taux d'élimination de la pollution.

Par contre les matières non décantables, sont celles qui restent dans le surnageant et qui sont donc être dirigées vers un procédé de traitement biologique ou chimique [17].

I.3.2. Les paramètres chimiques

I.3.2.1. Potentiel d'hydrogène

Le pH est un paramètre permettant de mesurer l'acidité, l'alcalinité d'une eau.

La mesure du pH doit se faire sur place, de préférence avec la méthode potentiométrique. La mesure électrique est délicate, mais donne une valeur exacte, parce qu'elle est indépendante du potentiel d'oxydoréduction, de la couleur du milieu, ou de la turbidité et des matières colloïdales.

La variabilité du pH, détermine le développement de la faune et de la flore aquatique, et exerce un rôle sur la mobilité des ions des métaux, et donc sur leur toxicité. Le pH joue un rôle important dans l'épuration de l'eau et le développement bactériens. Les microorganismes sont très sensibles aux variations du pH, et un développement correct de la faune et de la flore aquatique n'est possible que si sa valeur est comprise entre 6 et 9. La nitrification optimale se fait aux mêmes valeurs [18]. Le tableau suivant représente la classification des eaux selon leurs pH.

Tableau I.3: Classification des eaux selon leurs pH [15]

pH	Etat et type d'eau
pH < 5	Acidité forte => présence d'acides minéraux ou organiques dans les eaux naturelles
pH = 7	pH neutre
7 < pH < 8	Neutralité approchée => majorité des eaux de surface
5.5 < pH < 8	Majorité des eaux souterraines
pH = 8	Alcalinité forte, évaporation intense

I.3.2.2. La demande biologique en oxygène (DBO5)

La DBO5 comme étant la quantité d'oxygène consommée par les bactéries, à 20°C à l'obscurité et pendant 5 jours d'incubation d'un échantillon préalablement ensemencé, temps qui assure l'oxydation biologique d'une fraction de matière organique carbonée. Ce paramètre mesure la quantité d'oxygène nécessaire à la destruction des matières organiques grâce aux phénomènes d'oxydation par voie aérobie.

Elle se résume à la réaction chimique suivante :



Le tableau suivant représente volumes d'eau utilisés dans l'analyse de la DBO5 :

Tableau I.4 : Volumes d'eau utilisés dans l'analyse de la DBO5 [15]

Portée de mesure (mg/l)	Quantité (ml)	Facteur
0-40	432	1
0-80	365	2
0-200	250	5
0-400	164	10
0-800	97	20
0-2000	43.5	50
0-4000	22.7	100

I.3.2.3. La demande chimique en oxygène (DCO)

La DCO est la mesure de la quantité d'oxygène nécessaire pour la dégradation chimique de toute la matière organique biodégradable ou non contenue dans les eaux à l'aide du bichromate de potassium à 150°C. Elle est exprimée en mg O₂/l. La valeur du rapport DCO/DBO5 indique le coefficient de biodégradabilité d'un effluent, il permet aussi de définir son origine.

Généralement la valeur de la DCO est :

- DCO = 1,5 à 2 fois DBO Pour les eaux usées urbaines ;
- DCO = 1 à 10 fois DBO Pour tout l'ensemble des eaux résiduaires ;
- DCO > 2,5 fois DBO Pour les eaux usées industrielles.

La relation empirique de la matière organique (MO) en fonction de la DBO5 et la DCO est donnée par l'équation suivante : $MO = (2 \text{ DBO5} + \text{DCO}) / 3$ [20].

I.3.2.4. Oxygène dissous

La présence d'oxygène dissous dans l'eau est indispensable au développement de la vie animale (en particulier pour les poissons) et végétale (la photosynthèse). Sa concentration est contrôlée par plusieurs processus physiques et biologiques variables dans l'espace et dans le temps tels que la température, la photosynthèse, l'échange avec l'atmosphère et la charge des eaux en matière organique. L'organisation mondiale de la santé (OMS) recommande pour l'eau destinée à la consommation humaine une valeur limite de 5 à 7 mg/l, exprimée en CaCO_3 . Tandis que les normes algériennes recommandent une valeur limite de 30 mg/l [21].

I.3.2.5. La biodégradabilité

La biodégradabilité reflète la capacité des eaux usées à se décomposer ou à s'oxyder par des micro-organismes impliqués dans le processus de purification biologique de l'eau. La biodégradabilité est exprimée par un coefficient :

$$K = \text{DCO}/\text{DBO}.$$

- Si $K < 1.5$, cela signifie que les matières oxydables sont constituées en grande partie de matières fortement biodégradables.
- Si $1.5 < K < 2.5$, cela signifie que les matières oxydables sont moyennement biodégradables.
- Si $2.5 < K < 3$, les matières oxydables sont peu biodégradables.
- Si $K < 3$, les matières oxydables sont non biodégradables [22].

I.3.2.6. Carbone organique total (COT)

Le carbone organique est constitué d'une grande diversité de composés organiques, à plusieurs états d'oxydation, dont certains sont susceptibles d'être oxydés par des procédés chimiques ou biologiques. Ces fractions sont caractérisées par la demande chimique en oxygène (DCO) et la demande biologique en oxygène (DBO).

Certaines matières organiques échappent à ces mesures ; dans ce cas, le dosage du COT est mieux adapté. Il est indépendant de l'état d'oxydation de la matière organique et ne mesure pas les éléments inorganiques tels que l'azote et l'hydrogène qui peuvent être pris en compte par la DCO et la DBO.

La détermination porte sur les composés organiques fixés ou volatils, naturels ou synthétiques, présents dans les eaux résiduaires (celluloses, sucres, huiles, etc.).

Cette mesure permet de faciliter l'estimation de la demande en oxygène liée aux rejets, et d'établir éventuellement une corrélation avec la DBO et la DCO [23].

I.3.2.7. L'azote et le phosphore

Les teneurs en azote et en phosphore sont également des paramètres très importants. Les rejets excessifs de phosphore et d'azote contribuent à l'eutrophisation des lacs et des cours d'eau.

➤ L'azote

Dans les eaux usées domestiques, l'azote est sous forme organique et ammoniacale, on le dose par mesure du N-NTK et la mesure du N-NH₄. La concentration du N-NTK est de l'ordre de 15 à 20% de celle de la DBO. L'apport journalier est compris entre 10 et 15g par habitant.

➤ Phosphore

Le phosphore est présent dans l'eau sous plusieurs formes : phosphates, polyphosphates, phosphore organique ... ; les apports les plus importants proviennent des déjections humaines et animales, et surtout des produits de lavage. Les composés phosphorés sont indésirables dans les réservoirs de distribution d'eau potable, parce qu'ils contribuent au développement d'algues et plus généralement du plancton aquatique [24].

I.3.2.8. Salinité

Dans la plupart des pays, l'eau utilisée pour l'approvisionnement municipal est l'eau ayant la meilleure qualité disponible et elle est habituellement de faible salinité. Cependant, en conditions de pénurie en eau, la salinité peut être un problème. On estime que la concentration en sels de l'eau usée excède celle de l'eau du réseau d'alimentation en eau potable de quelques 200 mg /l, sauf dans le cas de pénétration d'eau saumâtre dans les réseaux d'assainissement ou lors de collecte d'eaux industrielles. La quantité et le type de sels présents sont importants pour évaluer si l'eau usée traitée convient pour l'irrigation. Des problèmes potentiels sont liés à la teneur en sels totaux, au type de sels ou à la concentration excessive d'un ou plusieurs éléments [25].

I.3. Paramètre organoleptiques

I.3.3.1. Gout-Odeur

Les eaux de consommation doivent posséder un gout et une odeur non désagréable. Les odeurs sont causées par la présence dans l'eau de substances relativement volatiles, ces substances peuvent être inorganiques comme le chlore, les hypo chlorures, le bioxyde de soufre (SO₂) ou le sulfure d'hydrogène (H₂S) ou organique comme les esters, les alcools.

Par ailleurs, une eau traitée peut avoir un gout plus prononcé qu'une eau non potable du chlore résiduel ou de la formation de certains dérivés chlorés. En outre, une eau soigneusement bouillie

si elle est stérile, n'en est pas moins très fade et de gout peut agréable en l'absence de CO₂ et d'oxygène dissous [26].

I.3.3.2. La couleur

La couleur peut être d'origine minérale ou organique. Les éléments minéraux susceptibles de colorer l'eau sont le fer (teinte rougeâtre) et le manganèse (teinte noirâtre). Les substances organiques comme les substances humiques, les algues et la décomposition des végétaux peuvent donner une coloration à l'eau [27].

I.3.4. Paramètre microbiologique

Certaines des bactéries, virus et parasites identifiés dans les eaux résiduaires sont pathogènes pour l'homme, Les micro-organismes comprennent, par ordre croissant de taille : les virus, les bactéries, les protozoaires et les helminthes.

- Les bactéries peuvent entraîner des maladies telles que le typhus, le paratyphus, Le Choléra, la gastro-entérite et la dysenterie ;
- Les virus peuvent entraîner des maladies telles que l'hépatite, la polio et la grippe ;
- Les parasites intestinaux peuvent entraîner des maladies telles que la dysenterie amibienne, la méningite, la gastro-entérite [28].

I.3.5. Paramètres bactériologiques

I.3.5.1. Coliformes totaux (CT)

Les coliformes totaux sont utilisés depuis très longtemps comme indicateurs de la qualité microbienne de l'eau parce qu'ils peuvent être indirectement associés à une pollution d'origine fécale. Les coliformes totaux sont définis comme étant des bactéries en forme de bâtonnet, aérobies ou anaérobies facultatives, possédant l'enzyme – galactosidase permettant l'hydrolyse du lactose à 35°C.

Les principaux germes inclus dans le groupe sont : *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Escherichia*, *Klebsiella* et *Serratia* [29].

I.3.5.2. Les coliformes fécaux

Les coliformes fécaux, ou coliformes thermotolérants, correspond à des coliformes qui présentent les mêmes propriétés de Les coliformes totaux (des organismes en bâtonnets, gram (-), facultativement anaérobies capables de fermenter le lactose à des températures 44°C. Les

coliformes fécaux comprennent les espèces d'*Escherichia Coli*, *Salmonella*...etc. La recherche et le dénombrement des coliformes fécaux sont un examen proposé en raison d'une concordance statistique entre leur présence et l'existence d'une contamination fécale quasi certaine

I.3.5.3. Streptocoques fécaux

Ces bactéries appartiennent à la famille de *Streptococcaceae*, au genre *Streptococcus* et au groupe sérologique D de LanceField. Ils sont définis comme étant des cocci sphériques légèrement ovales, gram positifs. Ils se disposent le plus souvent en diplocoques ou en chaînettes, se développent le mieux à 37°C et ils possèdent le caractère homofermentaire avec production de l'acide lactique sans gaz.

Il existe cinq (05) espèces reconnues parmi les SF : *S. bovis*, *S. equinus*, *S. avium*, *S. faecalis* et *S. faecium*. Ils sont des témoins de contamination fécale assez résistant y compris dans les milieux salés. Ils peuvent aussi se multiplier dans les milieux présentant des pH allant jusqu'à 9.6, on peut par conséquent les utiliser comme indicateurs d'organismes pathogènes qui ont une résistance similaire au pH élevé [31].

I.3.6. Les paramètres toxiques

Représentés par les métaux lourds (plomb ; nickel ; mercure, chrome, cadmium, arsenic ...) les cyanures, les pesticides et les hydrocarbures aromatique polycyclique ; On les trouve dans les eaux, suite à une dégradation des réseaux de distribution ou à une pollution industrielle [32].

I.4. Les étapes de traitement au niveau de la STEP de Guelma

Pour recycler les eaux usées dans le milieu naturel et les rendre propres et sécuritaires, l'épuration des eaux usées s'avère une nécessité primordiale. Elle est effectuée au niveau des stations d'épuration (STEP) [33].

L'épuration des eaux usées dans la STEP local de la ville de Guelma consiste à un prétraitement (dégrillage, dessablage et déshuilage), un traitement primaire par décantation, des traitements biologiques secondaires par boues activées et une décantation secondaires et enfin un traitement par chloration.

Le schéma suivant résume les étapes de traitement des eaux usées dans la STEP de Guelma.

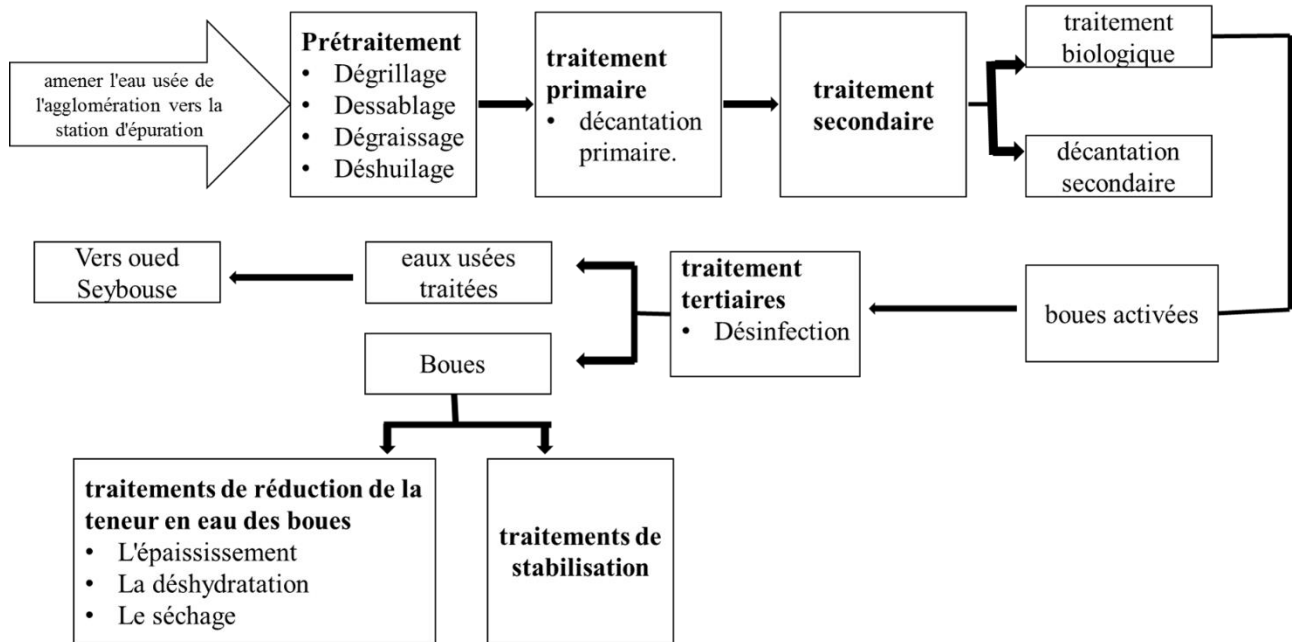


Schéma I.1: Schéma de principales voix de traitements des eaux usées et des boues [34]

I.4.1. Prétraitement

Les eaux usées brutes à leur arrivée à la station doivent généralement subir, un prétraitement qui composé d'un certain nombre d'opérations successives, uniquement physiques ou mécaniques. Il est destiné à extraire de l'eau usée, la plus grande quantité possible d'éléments dont la nature ou la dimension constitueront une gêne pour les traitements ultérieurs. Selon la nature des eaux à traiter et la conception des installations, le prétraitement peut comprendre les opérations : (le dégrillage), principalement pour les déchets volumineux, (le dessablage) pour les sables et graviers et (le dégraissage-déshuilage) pour les huiles et les graisses [35].

I.4.1.1. Dégrillage

Pour but d'éliminer les éléments solides ou particulières les plus grossiers, afin d'éviter les problèmes d'obstruction des pompes et les bouchages des conduites dans les différents organes de la STEP (Fig. I.2). Il consiste à faire passer les eaux usées au travers d'une grille constituée de barreaux de différents écartements selon l'usage [36].



Figure I.2 : Dégrillage

I.4.1.2. Dessablage

Le dessablage consiste à retirer de l'effluent les sables et les particules minérales plus ou moins fines, pour la protection des conduites et des pompes contre la corrosion et éviter même le colmatage des canalisations par les dépôts au cours du traitement, la technique classique du dessableur (Fig. I.3) consiste à circuler l'eau dans une chambre de tranquillisation avec une vitesse d'environ de 0.3m/s qui permet le dépôt d'une grande partie des sables [37].



Figure I.3 : Dessablage

I.4.1.3. Dégraissage– Déshuilage

Les opérations de dégraissage-déshuilage consistent à séparer de l'effluent brut, les huiles et les graisses par flottation. Ces derniers étant de densité légèrement inférieure à celui de l'eau. L'injection des micros bulle d'air permet d'accélérer la flottation des graisses (Fig. I.4).

Souvent ces opérations sont combinées dans un même ouvrage où la réduction de vitesse dépose les sables et laisse flotter les graisses ; enlève ainsi de l'eau les éléments grossiers et les

sables de dimension supérieure à 200 microns ainsi que 80 à 90% des graisses et matières flottantes (soit 30 à 40% des graisses totales) [38].



Figure I.4 : Dégraissage – Déshuilage

I.4.2. Traitement primaire (Décantation primaire)

Les procédés de traitement primaire sont de nature physique telle la décantation qui peut être associée à un traitement physicochimique. Ces procédés permettent d'une part, de retenir les matières en suspensions présentes dans l'eau usée (50% à 60% de MES) et d'autre part de réduire la pollution carbonée en aval (30% à 40% de la DBO5) [39].

Après les prétraitements, il reste dans l'eau une charge polluante dissoute et des matières en suspension [40]. 50 à 60 de ces polluants dissouts et matières en suspension sont éliminées par décantation.

La décantation est un procédé physique gravitaire qui vise l'élimination des particules en suspension de densité supérieure à celle de l'eau. Cette opération s'effectue dans les bassins de décantation [41]. Les bassins de décantation sont des bassins à ciel ouvert, l'effluent brut arrive par un point central (Fig. I.5), les matières décantables en suspension dans l'eau vont se séparer de l'effluent et se déposer au fond du bassin ou elles seront raclées par un pont radial tournant et les eaux de surface sont déversant [42], ne concerne que les particules de diamètre supérieur à 100 micromètres. Celle de diamètre inférieur à 100 micromètres ne décantent pas, mais seront entraînées vers les unités ultérieures de traitement [40].

Les matières décantables ainsi obtenues par séparation de l'effluent appelée les boues primaires, qui sont récupérées et orientées vers le traitement des boues. La décantation permet d'alléger les traitements biologiques ou chimiques ultérieurs, en éliminant une partie des particules solides en suspension (boues primaire). L'efficacité de ce traitement dépend du temps de séjour et de la vitesse ascensionnelle [42].



Figure I.5 : Décantation primaire

I.4.3. Traitement secondaire

C'est lors de ce traitement que s'élimine l'essentiel des agents polluants dans les eaux usées à savoir l'élimination de la pollution carbonée biodégradable [43]. Il comporte deux étapes principales :

I.4.3.1. Le traitement biologique

Ce traitement consiste à une consommation de la matière organique contenue dans les eaux usées et d'une partie des matières nutritives (azote et phosphore) par des microorganismes [44].

Le traitement biologique fait appel à deux types de procédés utilisant les floccs mobiles et les floccs fixés.

- ✓ Traitement par floc mobile (Le traitement par boues activées, Lagunage...)
- ✓ Traitements par floc fixé (Lit bactérien, Disque biologique..., etc.)

Dans la STEP de la ville de Guelma, la technologie de traitement biologique utilisée est la boue activée.

Au cours de ce traitement les eaux usées sont mises en contact avec des microorganismes bactériens en suspension, en condition aérobie (présence d'oxygène). Ces bactéries dites « épuratrices » vont utiliser la pollution de l'eau (matière organique biodégradable) comme source d'énergie pour leur croissance et leur développement. Il se produit des composés gazeux (CO_2) et de la biomasse qui va s'agglomérer sous forme de floccs bactériens formant ainsi des « boues secondaires » ou « boues activées ». Cette floculation naturelle permet la séparation des eaux épurées de la biomasse par simple décantation lors de l'étape suivante de « clarification » [45] (Fig. I.6).



Figure I.6 : Bassin d'aération

I.4.3.2. Une décantation secondaire (clarification)

Le clarificateur est un bassin circulaire, équipé d'un point racleur. La liqueur mixte, venant des bassins biologiques via la deuxième chambre de répartition est séparée en eau épurée et boues biologiques par décantation. Les boues décantées sont siphonnées par une pompe à vide, une partie sera acheminée vers la première chambre du répartiteur assurant la recirculation des boues contenant la culture bactérienne épuratrice. Afin de maintenir la concentration en biomasse nécessaire dans ce bassin, l'autre partie sera transmise au flotteur [46].

I.4.4. Désinfection

Les traitements primaires et secondaires ne détruisent pas complètement les germes présents dans les rejets. Des procédés d'élimination supplémentaires sont donc employés lorsque les eaux traitées sont rejetées en zone de baignade, de pisciculture ou d'élevage de coquillages, réutilisation d'effluents à des fins d'irrigation comme le cas d'effluent de la STEP Guelma.

Après la récupération des eaux clarifiées, ces dernières seront envoyées vers un bassin rectangulaire (Fig. I.7) formé des chicanes afin de recevoir des doses de javel qui sont préparés dans deux cuves de préparations de javel à partir de l'hypochlorite de calcium, cette javellisa Un contrôleur de chlore est installé à la sortie du bassin pour pouvoir. Contrôler le taux de la chloration permet de détruire tous germes avant le rejet [47].



Figure I.7 : Bassin de désinfection

I.4.5. Traitement des boues

Le traitement des boues est défini comme l'ensemble des opérations visant à modifier les caractéristiques des boues en excès afin de rendre leur destination finale fiable et sans nuisance.

Les boues à traiter sont la somme des boues primaires et secondaires, elles sont appelées boues mixtes.

On distingue deux grands types de traitement :

I.4.5.1. Des traitements de stabilisation

De type biologique, chimique ou thermique. Dont l'objectif est de réduire la fermentescibilité des boues (Fig. I.8) pour atténuer ou supprimer les mauvaises odeurs.

I.4.5.2. Des traitements de réduction de la teneur en eau des boues

Visant à diminuer la quantité de boues à stocker et à épandre, ou améliorer leurs caractéristiques physiques par :

- **L'épaississement**

Visé à augmenter la siccité (teneur en matière sèche) des boues sans pour autant modifier le caractère liquide de la boue qui peut se faire simplement par voie gravitaire dans un concentrateur ou par des moyens mécaniques (égouttage, flottation ou centrifugation).

- **La déshydratation**

Qui correspond en fait à une augmentation forte de siccité, modifie l'état physique des boues, celles-ci passant de l'état liquide à l'état pâteux ou solide.

- **Le séchage**

Élimine en grande partie ou en totalité l'eau par évaporation, soit par voie naturelle (lits de séchage), soit par voie thermique [48]



Figure I.8 : stabilisation des boues.

Conclusion

Les eaux usées de différentes compositions et de diverses origines constituent un problème pour la nature lors du rejet sans subir de traitements au préalable. Afin de montrer l'intérêt de leur épuration, nous avons présenté dans ce chapitre d'une part, les origines des eaux usées et leurs caractéristiques et d'autre part, les différentes méthodes utilisées pour leur épuration.

Référence bibliographique

- [1] Boudjehem H. Modélisation et optimisation du traitement des eaux usées de la ville de Guelma par électrocoagulation [Mémoire de Master]. [Université 08 Mai Guelma] ; 2013.
- [2] Benkaddour B. Contribution à l'étude de la contamination des eaux et des sédiments de l'Oued Cheliff (Algérie) [Thèse]. [Université De Perpignan Via Domitia, Et Université De Mostaganem] ; 2018.
- [3] <https://trustmyscience.com/wp-content/uploads/2021/02/traitement-eaux-usees-enjeu-essentiel-couv.jpeg>. Consulté le 30/01/2024.
- [4] Dauphin S. Connaissance et contrôle du fonctionnement des stations d'épuration, intérêt et limites des moyens métrologiques actuels application à la gestion hydraulique d'un décanteur secondaire [Thèse]. [Université Luis Pasteur De Strasbourg France] ; 1998.
- [5] Nemli A, Bouabdallah A E. Analyse du fonctionnement de la station d'épuration des eaux usées El Allelik- Annaba. [Mémoire de Master]. [Université Badji Mokhtar –Annaba] ; 2021.
- [6] Deroues N. Effet du substrat sur l'élimination des polluants des eaux usées de la ville de Biskra par filtres plantés [Mémoire de Master]. [Université Mohamed Khider – Biskra] ; 2020.
- [7] Baumont S. Réutilisation des eaux usées épurées : risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France [Étude a été réalisée à L'ors Ile-De-France]. [École Nationale Supérieure Agronomique De Toulouse (ENSAT)].
- [8] Metahri M S. Élimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées, par des procédés mixtes. Cas de la step est de la ville de tizi-ouzou [Thèse]. [Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou] ; 2012.
- [9] Nafaa D. Stratégie de mobilisation des ressources en eau non conventionnelle Approche méthodologique Etude prospective du cas des eaux usées épurées de la ville d'Annaba [Thèse]. [Université Badji Mokhtar-Annaba] ; 2019.
- [10] Khemis S A, Messaoudi A. Caractérisation et Optimisation du traitement chimique des eaux usées industrielles de la station déshuilage HBK [Mémoire de Master]. [Université Kasdi-Merbah Ouargla] ; 2021.
- [11] Meznad L, Messaoudi S. Evaluation des paramètres physico-chimiques et microbiologiques des eaux usées de la STEP de Sidi Ali IbharBéjaia[Mémoire de Master]. [Université A. Mira - Bejaïa] ; 2022.
- [12] Eulmi A. Traitement des eaux résiduaires de Laiterie par Electrocoagulation et Couplage en mode dynamique [Thèse]. [Université Badji Mokhtar-Annaba] ; 2020.
- [13] Djerouni A, Boukheza M. L'évaluation de la possibilité de réutilisation en agriculture les eaux épurées à partir de la STEP De Touggourt [Mémoire de Master]. [Université EchahidHamma Lakhdar D'EL-Oued] ; 2020.
- [14] Boumalek W. Etudes des possibilités de valorisation agricole des sous-produits d'épuration et l'amélioration de la gestion des processus épuratoires d'une station d'épuration [Thèse]. [École Nationale Polytechnique] ; 2020.

- [15] Khadraoui A, Moussaoui S. Traitement d'une eau usée par les procédés de photocatalyse et électrophotocatalyse [Mémoire de Master]. [Université De Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj] ; 2022.
- [16] Aissani A. Valorisation et la reutilisation des boues [Mémoire de Master]. [Université De Blida 1] ; 2020.
- [17] Ben hedid R. Epuration des eaux usées par lagunage aère de la région d'ouargla évolution et conditions optimales [Mémoire de Master]. [Université De Ghardaïa] ; 2015.
- [18] Meziani H. Qualité des eaux usées de la STEP Est de la ville de Tizi-Ouzou et possibilité de valorisation agricole [Mémoire de Master]. [Université Mouloud Mammeri Detizi-Ouzou] ; 2018.
- [19] Ben aissa A. Valorisation des eaux usées épurées dans l'irrigation [Mémoire de Master]. [Université KasdiMerbah-Ouargla] ; 2017.
- [20] Frioui R, Ghellab D. Etude comparative de l'efficacité du traitement des eaux usées par boues activées et électrocoagulation E.C [Mémoire de Master]. [Université 8 Mai 1945 Guelma] ; 2022.
- [21] Gaagai A. Etude de l'évolution de la qualité des eaux du barrage de Babar (Sud-Est Algérien) et l'impact de la rupture de la digue sur l'environnement [Thèse]. [Université Mostefa Benboulaïd –Batna 2] ; 2017.
- [22] Fehkeur I A, Fekir M F. Contrôle de qualité des eaux usées traitées au niveau de la STEP de Mostaganem [Mémoire de Master]. [Université Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem] ; 2023.
- [23] Benneni H, Bouarissa B. Epuration des eaux usées, analyse et synthèse des données scientifiques. Cas de la station d'épuration des eaux de la wilaya de Bordj Bou Arreridj : Prospection, évaluation du rendement épuratif [Mémoire de Master]. [Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi B.B.A.] ; 2020.
- [24] Boulahai H, Smaili O, Zerrouki S. Inventaire des normes existantes en matière de réutilisation des eaux usées en pisciculture [Mémoire de Master]. [Université KasdiMerbah, Ouargla] ; 2014.
- [25] Khali S, Sebaa N. Contribution à l'étude de l'efficacité du traitement des eaux usées de la station d'épuration de Ouargla (STEP Saïd Otba) [Mémoire de Master]. [Université KasdiMerbah, Ouargla] ; 2021.
- [26] Harrache D. Evaluation de la matière organique dans les eaux de surface des barrages de l'ouest d'Algérie et évolution des trihalométhanes et le plomb dans le réseau d'eau Potable [Thèse]. [Université DjillaliLiabes] ; 2019.
- [27] Asma A. Biomateriaux et leurs applications comme coagulants/floculants dans le traitement des eaux usées [Thèse]. [Université De Constantine 3 Salah Boubnider] ; 2022.
- [28] Guerrouf N. Etude comparative entre deux procédés du traitement : la phyto-épuration et la coagulation-floculation dans l'élimination des composés inorganiques présents dans les eaux usées de la ville de Biskra [Thèse]. [Université Mohamed Khider Biskra] ; 2023.
- [29] Slama I, Himri A, Rahdoun K. Analyse physico-chimique et bactériologique de l'eau des sources de la région de Guelma [Mémoire de Master]. [Université 8 Mai 1945 Guelma] ; 2021.
- [30] Bouallaoui M. Contribution à la caractérisation de la qualité physico-chimique et microbiologique des effluents traités de la station d'épuration (STEP). (Cas de la wilaya de Ghardaïa) [Mémoire de Master]. [Université de Ghardaïa] ; 2022.

- [31] Boumelik A. Approche statistique de la modélisation de la pollution côtière : Cas du littoral Ouest Algérien) [Mémoire de Magister]. [Université DjillaliLiabes De Sidi Bel Abbès] ; 2014.
- [32] Kebane K. Diagnostic et dimensionnement de la station de traitement d'eau potable taksebt (W.Tizi-Ouzou) [Mémoire de Master]. [Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzoi] ; 2021.
- [33] Belahmadi O. Etude de la biodégradation du 2,4-dichlorophénol par le microbiote des effluents d'entrée et de sortie de la station d'épuration des eaux usées d'ibn Ziad [Mémoire de Master]. [Université Mentouri-Constantine] ; 2011.
- [34] Boukheza M, djeroui A. l'évaluation de la possibilité de réutilisation en agriculture les eaux épurées à partir du step de touggourt [Mémoire de Master]. [Université EchahidHamma Al Akhdar D'El-Oued] ; 2020.
- [35] Bekkari N. Etude et suivi de procédé d'épuration des eaux usées sous climat aride (simulation par l'application des méthodes d'intelligence artificielle) cas de la station d'épuration de Touggourt [Thèse]. [Université KasdiMerbah – Ouargla] ; 2020.
- [36] Talhi A. Talbi F Z. Conception et dimensionnement de la station d'épuration de Mehalma [Mémoire de Master]. [Ecole Nationale Polytechnique] ; 2019.
- [37] Sersoub R. Les contraintes du mauvais fonctionnement de la rentabilité des lagunages naturelles [Mémoire de Master]. [Université De Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj] ; 2022.
- [38] Hacini H. Dimensionnement des ouvrages d'une nouvelle station d'épuration biologique des eaux usées domestiques de la base de vie de Gassitouil [Mémoire de Master]. [Université KasdiMerbah Ouargla] ; 2022.
- [39] Maref N. Traitement et épuration des eaux [Polycopié de cours]. [Université Djillaliliabés De Sidi Bel Abbés] ; 2020.
- [40] Tabet M. Etude physico-chimique et microbiologique des eaux usées et évaluation du traitement d'épuration [Thèse]. [Université 8 Mai 1945-Guelma] ; 2015.
- [41] <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.1h2o3.com/apprendre/decantation/&ved=2ahUKEwikWkWypSFaxWoTaQEHaHoCqEQFnoECBsQAQ&usg=AOvVaw3kA-BRFua4pTLNB9kscmrD>. Consulté le 15/02/2024.
- [42] Yakhlef S, Stiti C. Étude comparative entre le traitement des eaux usées par coagulation -floculation et le procédé d'épuration appliqué au niveau de la STEP de Guelma [Mémoire de Master]. [Université 08 Mai 1945 De Guelma] ; 2022.
- [43] Djehaichia R, Chebata B. Suivi de fonctionnement de la station d'épuration de la ville de Guelma [Mémoire de Master]. [Université 8 Mai 1945 Guelma] ; 2020.
- [44] Belghali M, Merabti N. Traitement des eaux usées huileuse de Cevital par le kaolin KT3B selon la méthode d'adsorption [Mémoire de Master]. [Université Abderahmane Mira – Bejaia] ; 2015.
- [45] Benoudjit F. Caractérisation et Valorisation des Boues Issues d'un Office d'Assainissement. Cas ONA Boumerdès (STEP Boumerdès) [Thèse]. [Université MohamedBougara-Boumerdes] ; 2016.
- [46] Tebib F. Evaluation des performances épuratoires de la STEP de Groupement Reggane Nord GRN. [Mémoire de Master]. [Université Ahmed Draïa Adrar] ; 2020.

[47] Haiahem R, Yassad K. Étude et suivi de fonctionnement de la STEP de Guelma : traitement et réutilisation des eaux usées [Mémoire de Master]. [Université 8 Mai 1945 Guelma] ; 2022.

[48] Azzedine A. Suivi du rendement épuratoire de la station d'épuration des eaux usées de la ville de Guelma [Mémoire de Mastère]. [Université 08 Mai 1945 De Guelma] ; 2016.

CHAPITRE II :

*Pollution chimique et méthodes
d'analyses des eaux usées*

Dans le contexte des fluctuations mystérieuses observées dans les réseaux d'assainissement, une catastrophe silencieuse et insidieuse se révèle chaque jour : la pollution des eaux usées par un nombre incalculable de substances organiques et minérales telles que les médicaments, les détergents, les pesticides, les hydrocarbures et les métaux lourds dangereux.

Ces polluants, provenant souvent de nos activités quotidiennes et industrielles, se déversent dans nos rivières, lacs et océans, créant un mélange toxique aux conséquences dévastatrices sur l'écosystème aquatique et la santé humaine.

Face à cette crise, la surveillance et le traitement des eaux usées revêt une importance stratégique incontestable. En effet, éliminer efficacement ces polluants est essentiel pour préserver la qualité de l'eau et protéger l'environnement.

Malgré l'existence de méthodes classiques d'analyse de l'eau, telles que la méthode de spectroscopie de masse, UV visible, méthodes volumétrique, ... etc., ces méthodes classiques sont souvent coûteuses et nécessitent un équipement complexe. Cependant, face au besoin de surveiller en temps réel la qualité de nos ressources en eau à moindre coût, une alternative innovante émerge : la méthode des capteurs in-situ. Cette approche moderne et économique offre de nombreux avantages en termes de simplicité, de rapidité et d'efficacité pour détecter les polluants et déterminer leur quantité en temps réel, au même endroit où ils sont émis, ouvrant la voie à une gestion plus efficace des ressources en eau et à une protection accrue de l'environnement.

II.1. Les différents types de pollutions

La pollution de l'eau est actuellement placée en tête des problèmes de l'environnement car l'eau est une interface entre l'air et le sol. Une eau est dite polluée lorsque son équilibre est modifié de façon durable par l'apport en quantités très importantes des substances plus ou moins toxiques, d'origines naturelles ou issues d'activités humaines.

Une pollution peut affecter directement l'homme, dans sa santé ou son environnement proche. Elle peut aussi l'affecter indirectement à travers la chaîne alimentaire ou l'environnement plus lointain [1].

La pollution se manifeste généralement sous formes physique, chimique, microbiologique :

II.1.1. La pollution physique

Elle résulte de divers éléments solides causés par des décharges domestiques et industrielles qui sont :

- **La pollution solide** : Elle est produite à partir de particules solides transportées dans les eaux industrielles.
- **La pollution thermique** : Généralement, causée par les eaux des circuits de refroidissement des usines. Elle engendre des conséquences importantes pour l'équilibre écologique de l'environnement aquatique naturel et de la survie des organismes vivants.
- **La pollution radioactive** : Elle est relative aux rejets d'éléments radioactifs par des installations nucléaires [2].

II.1.2. La pollution microbiologique

Les eaux usées contiennent tous les microorganismes excrétés avec les matières fécales. Cette flore entérique normale est accompagnée d'organismes pathogènes. L'ensemble de ces organismes peut être classé en quatre grands groupes, par ordre croissant de taille : les virus, les bactéries, les protozoaires et les helminthes. Les germes pathogènes susceptibles d'être présents dans les eaux sont données sur le tableau suivant [3] :

Tableau II.1 : Germes pathogène rencontrés dans les eaux usées [3]

Germes	Organisme	Maladie
Les bactéries pathogènes	Salmonella shigelles	Typhoïde Dysenterie
Entérobactérie vibrions	Colibacilles Leptospires Mycobactéries Vibrion coma	Tuberculose cholera
Les virus	Entérovirus Reovirus Adénovirus Rota Virus	Poliomyélite Méningite Affection respiratoire, diarrhée
Les parasites et Les champignons	Taenia, ascaris	Lésions Viscérales Eczéma, Maladie de la peau

II.2. La pollution chimique des eaux usées

La pollution chimique des eaux usées est un problème majeur qui touche toutes les régions du monde. Cette pollution a des conséquences désastreuses sur les écosystèmes aquatiques. Elle peut entraîner la mort d'animaux et de plantes, la contamination de la chaîne alimentaire et la destruction des habitats naturels. De plus, elle peut avoir des effets néfastes sur la santé humaine.

Elle survient lorsque des substances nocives, telles que les produits chimiques industriels, les médicaments, les pesticides et les produits ménagers, se retrouvent dans les eaux usées et ne sont pas correctement traitées avant d'être rejetées dans l'environnement [4]. La pollution chimique des eaux est regroupée dans deux catégories :

- Organique (hydrocarbures, pesticides, détergents, médicament...etc.).
- Minérale (métaux lourds...etc.) [5].

II.2.1. La pollution organique

Les polluants organiques sont généralement les substances chimiques qui persistent dans l'environnement, et la pollution par ces substances est perçue au travers de leur présence

dans les milieux aqueux (dans l'air ou le sol) ainsi que par leur accumulation dans les tissus des organismes vivants à travers la chaîne alimentaire.

Les polluants organiques sont classiquement les hydrocarbures, les pesticides, les colorants, les médicaments, ...etc. [6].

II.2.1.1. Les médicaments

Les changements démographiques et épidémiologiques, ainsi que l'évolution des modes de vie, tels que le vieillissement de la population et l'augmentation des maladies chroniques, ont entraîné une augmentation des prescriptions médicales et une expansion de leur utilisation. En plus le phénomène de consommation de drogues par des jeunes à des fins non médicales, tel que l'anesthésie (Erica, par exemple), a conduit à une augmentation significative de la quantité de médicaments utilisés et non utilisés [7].

Après avoir pris une pilule, son effet ne se termine pas nécessairement. En fait, c'est le début d'un processus médicamenteux. La plupart des médicaments ne sont absorbés que partiellement par le corps et finissent par être excrétés dans les toilettes, puis dans les égouts. La Figure II.1 représentée les médicaments polluent [8].

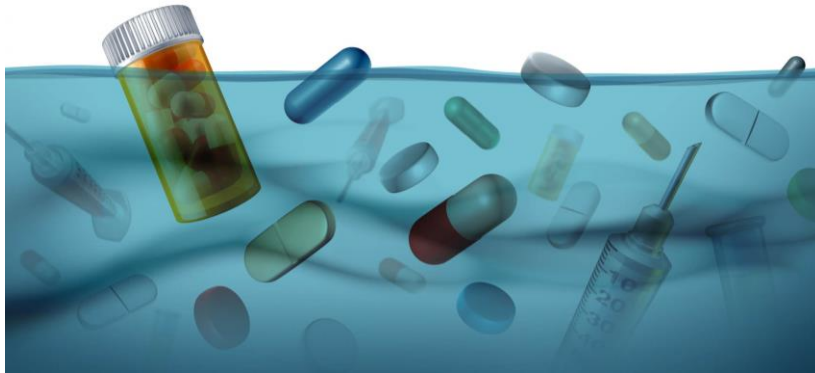


Figure II.1 : les médicaments polluent [9]

Les médicaments éliminés via le réseau d'égouts posent une menace pour tous les organismes vivants dépendants de l'eau. Les déchets pharmaceutiques peuvent également affecter l'environnement, car les stations d'épuration urbaines ne sont pas équipées pour éliminer ces produits. Ainsi, des quantités de déchets pharmaceutiques se retrouvent concentrées dans les boues d'épuration, qui sont parfois utilisées comme fertilisants pour les terres agricoles, augmentant ainsi le risque de contamination des écosystèmes par les sols et les eaux souterraines. De plus, certains médicaments ont des effets toxiques sur la faune sauvage, comme la destruction des tissus rénaux et squelettiques chez les poissons par les anti-

inflammatoires, ou la féminisation des poissons mâles par les œstrogènes chimiques, perturbant ainsi l'équilibre des sexes dans certaines espèces [10].

II.2.1.2. Les hydrocarbures

La densité croissante des voitures et des divers modes de transport au cours des dernières décennies est le résultat de plusieurs facteurs, notamment l'augmentation massive de la population et la facilité d'obtention de prêts automobiles. Il est remarquable que cette croissance démographique soit étroitement liée à une augmentation de la demande de services de lavage et de stations-service [11-13].

Les hydrocarbures sont des molécules composées d'atomes de carbone et d'hydrogène. Ils ont une solubilité variable dans l'eau en fonction de leur structure [14]. La (Fig. II.2) représentée une fuite de gasoil à la station de servies.



Figure II.2 : fuite de gasoil à la station de servies [15]

L'élimination des hydrocarbures est un processus extrêmement complexe via divers processus de traitement. Ces derniers peuvent fuir des réservoirs de stockage dans les stations-service en raison de la corrosion des réservoirs ou d'un entretien inadéquat. Des fuites peuvent également survenir à la suite d'accidents tels que des déversements de carburant, ainsi que pendant les opérations de lavage dans les stations de lavage. Ces fuites, évacuées à travers le réseau d'assainissement, représentent une menace pour tous les organismes vivants [16-19].

En effet, la station de traitement des eaux usées de la ville de Guelma ne réalise pas d'analyse des eaux traitées pour déterminer la quantité d'hydrocarbures résiduels et si elles sont appropriées pour un usage quelconque, ce qui soulève des préoccupations pour la santé publique.

II.2.1.3. Les détergents

Les détergents sont des produits spécialisés largement utilisés pour le lavage et le nettoyage domestique en général. Ils agissent efficacement pour éliminer la saleté, les taches et les odeurs des tissus et des surfaces. Les nettoyeurs offrent de nombreux avantages, tels que leur solubilité dans l'eau. Ils sont largement utilisés dans les environnements résidentiels et commerciaux, notamment dans les maisons, les hôtels, les hôpitaux et les blanchisseries en raison de leur polyvalence [20]. La (Fig. II.3) représentée quelques produits de nettoyage.



Figure II.3 : Produits de nettoyage [21]

Après utilisation, les détergents sont évacués via les canalisations d'égout. Les eaux usées des maisons et des bâtiments sont collectées dans un réseau de canalisations souterraines, puis dirigées vers les stations d'épuration des eaux usées. Après traitement, les eaux sont déversées dans des cours d'eau. La station de Guelma n'est pas également équipée pour ce type analysé.

Cependant, les détergents peuvent avoir un impact négatif sur l'environnement, en particulier s'ils ne sont pas correctement traités. Certains détergents contiennent des produits chimiques toxiques qui peuvent nuire aux organismes vivants dans l'environnement, et les résidus de nettoyeurs dans l'environnement peuvent entraîner la pollution des sols et des eaux [22]. Exemples de certains produits chimiques nocifs :

- Le chlore : Le chlore est utilisé dans certains détergents comme désinfectant. Il peut être toxique pour les plantes, causant des brûlures sur les feuilles et entravant leur croissance.
- Les phosphates : Les phosphates sont utilisés dans certains détergents comme adoucissants pour l'eau. Ils peuvent entraîner une pollution des eaux de surface en favorisant considérablement la croissance des algues, ce qui réduit les niveaux d'oxygène dans l'eau et nuit aux plantes [23].

II.2.1.4. Les pesticides

Un pesticide est une substance ou association de substances destinée à repousser, détruire ou combattre les ravageurs, y compris les vecteurs de maladies humaines et animales, et les espèces indésirables de plantes ou d'animaux [24]. (Fig. II.4) représentée les pesticides.



Figure II.4 : les pesticides [25]

Plus de 50 % des composants des eaux usées sont constitués de particules de pesticides, et l'origine des engrais provient de plusieurs sources, notamment du ruissellement excessif qui entraîne le déversement des engrais excédentaires dans les cours d'eau, de l'érosion due aux fortes pluies qui emporte les engrais du sol, des reliefs des zones en pente qui augmentent le risque d'érosion des engrais, en plus des déchets animaux qui contiennent des quantités importantes d'azote et de phosphore. Le déversement inapproprié des déchets animaux entraîne la pollution des eaux souterraines et de surface. Ces eaux sont ensuite transportées vers une station d'épuration des eaux usées [26-29].

On désigne généralement comme des produits utilisés en agriculture les conséquences néfastes dues aux pesticides sont liées aux caractères suivants :

- Rémanence et stabilité chimique conduisant à une accumulation dans les chaînes alimentaires.
- Rupture de l'équilibre naturel [30].

II.2.2. La pollution minérale

La pollution minérale des eaux usées se réfère à la présence excessive de composés minéraux, notamment les métaux lourds. Ces substances peuvent avoir plusieurs conséquences néfastes :

- Elles peuvent entraîner des problèmes de santé chez les individus exposés.

- Elles perturbent l'activité bactérienne dans les stations d'épuration, compromettant ainsi le processus de traitement des eaux usées.
- Elles peuvent sérieusement affecter les cultures en contaminant les sols et les sources d'eau d'irrigation [31].

II.2.2.1. Les métaux lourds

D'un point de vue purement scientifique et technique, les métaux lourds peuvent être définis comme suit :

- Tout métal ayant une densité supérieure à 5 g/cm³.
- Tout métal avec un numéro atomique élevé, généralement supérieur au sodium (Z=11).
- Tout métal pouvant être toxique pour les systèmes biologiques [32].

Vous trouverez ci-dessous les métaux lourds les plus importants et leur toxicité :

II.2.2.1.1. Le mercure

Le mercure, de symbole **Hg** et de numéro atomique 80, est un élément chimique de la famille des métaux lourds. C'est le seul métal liquide à température ambiante et pression atmosphérique normale. Les gouttes de mercure liquide sont brillantes et de couleur blanc argenté (Fig.II.5) [33].



Figure II.5 : le mercure [34]

Le mercure est un métal lourd toxique qui peut s'infiltrer dans l'environnement à partir de diverses sources, notamment les eaux usées, et sa présence dans les eaux usées présente un risque pour la santé humaine et l'environnement.

Son impact sur les cultures agricoles est la pollution des sols, car il s'accumule dans les sols irrigués par des eaux usées polluées, réduisant ainsi la fertilité des sols et la qualité des

récoltes. Les plantes peuvent également absorber le mercure du sol et le transférer vers les parties comestibles, entraînant une contamination de la chaîne alimentaire et un effet toxique sur la croissance et la productivité des plantes [35-36].

Son impact sur la Terre consiste notamment à affecter la microflore et la faune du sol, à perturber les processus biologiques de base et à décomposer la matière organique. La pollution par le mercure réduit également la capacité du sol à retenir l'eau, affectant la santé des plantes, augmentant le risque de corrosion, contribuant à l'acidification du sol et réduisant la disponibilité des nutriments pour les plantes [37-38].

Son impact sur la chaîne alimentaire est son accumulation dans les organismes aquatiques et terrestres, ce qui augmente sa concentration à tous les niveaux de la chaîne alimentaire et conduit à la contamination des poissons et des animaux et à l'accumulation de fortes concentrations de mercure dans leurs tissus [39-40].

Enfin, le mercure provoque plusieurs maladies chez l'homme comprennent des troubles du langage et de la vision, des troubles neurologiques tels que l'hydrargyrie, ainsi que la maladie de Minamata et d'autres empoisonnements massifs, pouvant entraîner des symptômes graves voire la mort [41].

II.2.2.1.2. Le plomb

Le plomb est un élément chimique de symbole **Pb** et de numéro atomique 82, C'est un métal lourd gris bleuâtre malléable et très dense (Fig.II.6), moins biodisponible que les autres métaux [42].



Figure II.6 : le plomb [43]

Le plomb, en tant que métal lourd toxique, a des répercussions dévastatrices sur l'environnement. Il pénètre dans les écosystèmes via les eaux usées, affectant gravement les cultures agricoles, les animaux, les plantes, les humains et le sol [44].

Dans les cultures agricoles, il entrave la croissance et le rendement des plantes en altérant la photosynthèse et l'absorption des nutriments, tout en contaminant les parties comestibles [45].

Les animaux subissent une toxicité aiguë et chronique, pouvant entraîner la mort ou des troubles neurologiques, digestifs et reproductifs, tandis que la contamination de la chaîne alimentaire les expose, ainsi que les humains, à des risques de santé [46].

Chez l'humains, le saturnisme, causant plusieurs maladies, notamment une perturbation de la biosynthèse de l'hémoglobine et anémie, une augmentation de la pression artérielle, des problèmes rénaux, des perturbations du système nerveux, un déclin de la fertilité masculine, et des perturbations du comportement chez les enfants [47].

Enfin, le plomb contamine le sol, réduisant sa fertilité et sa capacité à soutenir la vie végétale, et pollue les eaux souterraines, les rendant dangereuses pour la consommation humaine [48].

II.2.2.1.3. Le cadmium

Anciennement appelé Carbonate de Zinc, est un élément chimique de symbole **Cd** et de numéro atomique 48, est un métal blanc argenté (Fig.II.7), ayant des propriétés physiques proches de celle du zinc. Il fond à 320,9 °C et bout à 767 °C [49].



Figure II.7 : le cadmium [50]

La toxicité du cadmium a des répercussions significatives sur de nombreux aspects. Tout d'abord, il compromet la croissance des plantes en altérant la photosynthèse, la respiration et l'absorption des nutriments, ce qui entraîne une baisse de la productivité agricole. De plus, il

peut s'accumuler dans les racines, restreignant ainsi l'absorption de l'eau et des nutriments, et provoquer des dommages aux feuilles [51-52].

Sur le plan environnemental, le cadmium contribue à la pollution des sols en contaminant les cultures futures et en réduisant la fertilité du sol par la perturbation de la microflore et la décomposition de la matière organique. Il peut également acidifier le sol, ce qui affecte la disponibilité des nutriments pour les plantes. Le cadmium est toxique pour les plantes et les organismes aquatiques, sans aucune fonction biologique connue. Ses effets sur les plantes comprennent l'inhibition de la croissance, la chlorose, la nécrose et des perturbations de la photosynthèse. Chez les poissons, il perturbe le métabolisme et le système nerveux, réduisant leur capacité de nage et affectant la reproduction [53].

Enfin, pour la santé humaine, la consommation d'aliments contaminés par le cadmium peut entraîner des symptômes gastro-intestinaux, tandis qu'une exposition à long terme peut causer des dommages graves aux reins, aux poumons, aux testicules ou à la prostate. Le cadmium est classé comme cancérigène par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) [54].

II.2.2.1.4. Le nickel

Le Nickel est un élément chimique de symbole **Ni** et de numéro atomique 28, est un métal blanc argenté (Fig.II.8), l'un des éléments de transition, dur, plus dur que le fer, ferromagnétique et très résistant à la rouille et à la corrosion [55].



Figure II.8 : le nickel [56]

Le nickel présent dans les eaux usées peut avoir des effets néfastes sur l'environnement et la santé.

Dans les cultures agricoles, il peut réduire la croissance et le rendement des plantes en perturbant l'absorption des nutriments essentiels, endommager les racines, et contaminer les parties comestibles des plantes [57-58].

Chez les animaux, des concentrations élevées de nickel peuvent causer la mort, des problèmes de reproduction, et la bioaccumulation dans la chaîne alimentaire [59-60].

Pour les plantes, le nickel perturbe la photosynthèse, provoque la chlorose et la nécrose des feuilles [61-62].

Chez les humains, l'exposition à des environnements fortement pollués par le nickel peut entraîner des allergies cutanées, des maladies cardiovasculaires, de l'asthme, une fibrose pulmonaire, une insuffisance rénale et même un cancer des voies respiratoires [63].

Sur le sol, le nickel réduit la fertilité, perturbe la microflore et contribue à l'acidification du sol [64-65].

II.2.2.1.5. Le cuivre

Le cuivre est un élément chimique de symbole **Cu** et de numéro atomique 29. Métal de couleur rougeâtre (Fig.II.9), il possède une haute conductivité thermique et électrique à température ambiante. Sa couleur rougeâtre le diffère au même titre que l'or par la couleur généralement grise des métaux [66].



Figure II.9 : le cuivre [67]

Le cuivre est un élément vital pour la vie, mais sa présence à des concentrations élevées peut devenir toxique, notamment dans les eaux usées domestiques et industrielles.

Cette toxicité peut avoir des répercussions importantes sur la vie aquatique, provoquant la mort des poissons et d'autres organismes aquatiques à des niveaux élevés, ainsi que des perturbations de la reproduction, du développement et de la croissance à des niveaux plus

faibles. De plus, le cuivre peut s'accumuler dans les organismes aquatiques, les rendant toxiques pour leurs prédateurs [68-70].

Sur le plan humain, l'ingestion d'eau contaminée par le cuivre peut entraîner des problèmes gastro-intestinaux tels que des nausées, des vomissements et de la diarrhée, tandis qu'une exposition prolongée peut endommager le foie et affecter le développement neurologique des enfants [71-73]. Le tableau II 2 montre les normes de rejet d'eaux usées chargés en métaux lourds en Algérie et dans d'autres pays.

Tableau II.2 : Normes de rejet d'eaux usées chargés en métaux lourds dans les pays [49]

Métal Normes (mg/L)	Cd	Ni	Pb	Cu	Hg
CEE	0.2	5	1	2	0.05
France	0.2	0.5	0.5	0.5	0.5
Belgique	1	3	1	2	0.1
Allemagne	0.2	0.5	0.5	0.5	-
Suisse	1	2	1	1	0.1
Algérie	0.2	2	0.5	2	0.01

II.3. Normes de rejet des eaux usées

Les normes de rejet sont des valeurs des paramètres polluants d'une eau usées à ne pas dépasser.

La norme est représentée par un chiffre qui fixe une limite supérieure à ne pas dépasser ou une limite inférieure à respecter un critère donné est rempli lorsque la norme est respectée pour un paramètre donné. Une norme est fixée par une loi, une directive, un décret de loi [74]. On distingue les normes de l'OMS, les normes européennes et normes algérien :

II.3.1. Normes de l'OMS :

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) est considérée comme la plus haute autorité dans Le domaine de la santé et donne des recommandations au niveau mondial. Elle propose des normes sanitaires depuis des décennies et elle est en passe de les modifier pour les rendre plus sévères et diminuer les risques sanitaires. Ces normes sont destinées à une utilisation internationale et sont adaptées aux pays en voie de développement [75].

Tableau II.3: Normes de rejet des eaux usées (OMS) [74]

Caractéristiques	Normes	Unités
PH	6,5-8,5	-
Température	<30	°C
DBO5	<30	mg/l
DCO	<90	mg/l
MES	<20	mg/l
NH ₄ ⁺	<0,5	mg/l
NO ₂	1	mg/l
NO ₃	<1	mg/l
P ₂ O ₅	<2	mg/l
Couleur	Incolore	-
Odeur	Incolore	-

II.3.2. Normes européennes

Une directive européenne relative aux eaux urbaines résiduaires a été adoptée par le Conseil des Ministres de la Commission Économique Européenne le 21 mai 1991. Cette directive réglemente les niveaux des rejets des stations d'épuration des eaux usées urbaines [76].

Tableau II.4: Normes européenne de rejet des eaux usées [76]

Paramètre	Normes	Unités
PH	5,5 <pH<9,5	-
Température	< 30 °C, un écart de 5°C est toléré	°C
DBO5	25	mg/l
DCO	125	mg/l
MES	35	mg/l
Azote	15 mg/l pour une charge brute de pollution entre 600 et 6 000 kg/jour. 10 mg/l pour une charge brute de pollution > 6 000 kg/jour.	mg/l
Phosphore	2 mg/l pour une charge brute de pollution entre 600 et 6 000 kg/jour. 1 mg/l pour une charge brute de pollution > 6000 kg/jour.	mg/l
Plomb	0.1	g/l
Hydrocarbures totaux	5	g/jour
Composées phénoliques	5	g/jour

II.3.3. Normes algériennes

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 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, les valeurs limitent 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 ci- dessous [77].

Tableau II.5 : Normes algérienne de rejet des eaux usées [77]

PARAMETRES	VALEURS LIMITES	UNITES
Température	30	C°
pH	6,5 à 8,5	-
MES	30	mg/l
DBO5	30	mg/l
DCO	90	mg/l
Azote	30	mg/l
Phosphates	2.0	mg/l
Phosphore total	10	mg/l
Cyanures	0.5	mg/l
Aluminium	20	mg/l
Cadmium	0.05	mg/l
Fer	20	mg/l
Manganèse	10	mg/l
Mercure total	0.01	mg/l
Nickel total	2.0	mg/l
Plomb total	0.5	mg/l
Cuivre total	0.5	mg/l
Zinc total	10	mg/l
Huiles et Grasses	20	mg/l
Hydrocarbures totaux	20	mg/l
Indice phénols	0.3	mg/l
Fluor et composés	15	mg/l
Etain total	2.0	mg/l
Composés organiques chlorés	5.0	mg/l
Chrome total	1.0	mg/l
(*)Chrome III+	3.0	mg/l
(*)Chrome VI+	0.1	mg/l
(*)Solvants organiques	20	mg/l
(*)Chlore actif	1.0	mg/l
(*)PCB	0.001	mg/l
(*)Détergents	2.0	mg/l
(*)Tensioactifs anioniques	10	mg/l

II.4. Importance stratégique des traitements des eaux usées

L'eau ne peut être considérée comme un simple produit commercial, elle doit être classée comme un patrimoine universel qui doit être protégée, défendue et traitée. Elle est une ressource pour l'homme, sa survie, sa santé, son alimentation [78].

De tout temps et dans différentes régions du monde, l'eau et sa gestion ont été l'objet de nombreux enjeux politiques et géopolitiques. L'Afrique n'a pas été historiquement un théâtre majeur de conflits hydro politiques, mais elle est devenue ces dernières années confrontée à des défis sans précédent dans le domaine de la gestion des ressources en eau [79]. Par exemple, nous parlons du conflit égypto-éthiopien sur le bassin du Nil, où l'Éthiopie a lancé un énorme projet de construction d'un très grand barrage affectant le débit d'eau, notamment en Égypte. Cela a entraîné des tensions géopolitiques entre les deux pays, avec la possibilité de militariser le conflit et l'utilisation de l'expression "guerre de l'eau" pour le décrire [80].

La région de l'Afrique du Nord est l'une des régions du monde qui souffre le plus de l'insécurité hydrique, avec l'augmentation de la pénurie d'eau et la détérioration de la qualité de l'eau. La demande en eau est en constante augmentation, sous l'effet d'une combinaison de facteurs, tels que la croissance démographique, l'augmentation de la demande alimentaire, l'évolution des habitudes alimentaires vers davantage de protéines animales, l'étalement urbain et le développement social et économique global. Dans le même temps, la région connaît une diminution continue de la disponibilité de l'eau en raison de taux de précipitations faibles et variables, d'une utilisation irrationnelle de l'eau et de la détérioration de sa qualité.

Quant à l'Algérie, les ressources en eau sont limitées et injustement réparties, et la situation s'est aggravée, notamment au cours des deux dernières décennies, en raison de la sécheresse, de la pollution et d'une mauvaise gestion. Par conséquent, le traitement des eaux usées est devenu l'une des options les plus importantes toujours présentées dans les plans de développement, car les eaux usées traitées constituent la deuxième option stratégique après l'eau dessalée en tant que source non conventionnelle d'eau souterraine [79].

La ville de Guelma, située dans l'est de l'Algérie, fait face aux mêmes défis que le reste du pays en matière de gestion des ressources en eau. La disponibilité limitée et la répartition inégale de l'eau ont un impact significatif sur la vie quotidienne des habitants. De plus, la région de Guelma a connu une pression croissante sur ses ressources en raison de la croissance démographique et des activités industrielles. Par conséquent, la nécessité de traiter efficacement les eaux usées est particulièrement pressante dans cette région [81].

Le traitement des eaux usées permet d'économiser des quantités d'eau supplémentaires, d'assurer l'équilibre du cycle naturel de l'eau et de protéger l'environnement. L'un des domaines les plus importants dans lesquels les eaux usées traitées peuvent être utilisées : Irrigation agricole pour les cultures vivrières comestibles, Irrigation des espaces verts résidentiels et publics, Lutte contre les incendies structurels/non structurels, Eau de toilette, Fontaines décoratives, Eau traitée industrielle pouvant entrer en contact avec les travailleurs, Réfrigération ou climatisation industrielle ou commerciale, Faire de la neige artificielle, Nettoyage et assainissement, Eau bouillante pour cuisiner [82].

II.5. Méthodes analytiques utilisées pour l'analyse de l'eau

II.5.1. Les méthodes classiques

Les méthodes d'analyse classique font référence aux techniques utilisées pour la détection, l'identification, la caractérisation et la quantification des composés chimiques. Ces méthodes sont couramment utilisées en le domaine de chimie pour la recherche, le développement et le contrôle de qualité des produits comme les métaux lourds et les composés organiques toxiques [83].

Il existe plusieurs méthodes tel que (La spectrométrie de masse, Spectrophotométrie UV-visible, La chromatographie Liquide à Haute Performance (HPLC), Le titrage Spectroscopie Absorption atomique etc...).

II.5.1.1. La spectrométrie de masse

La spectrométrie de masse est une technique analytique puissante développée par *Joseph John Thomson* en 1898, ce qui lui a valu le prix Nobel en 1906. Elle est utilisée pour quantifier des matériaux connus, identifier des composés inconnus dans un échantillon et élucider la structure ainsi que les propriétés chimiques de différentes molécules. Le processus implique la transformation de l'échantillon en ions gazeux, avec ou sans fragmentation, qui sont ensuite caractérisés par leurs rapports masse/charge (m/z) et leurs abondances relatives [84].

Le principe d'une mesure en spectrométrie de masse repose toujours sur trois étapes primordiales (Fig.II.10) :

- **L'ionisation**, dont le rôle est de faire passer les molécules en phase gazeuse et de les ioniser
- **L'analyse**, qui sépare les ions en fonction de leur rapport masse-sur-charge (m/z)

- **La détection**, Le détecteur est couplé à un système informatique, qui assure le traitement des données et l'élaboration des spectres de masse [85].

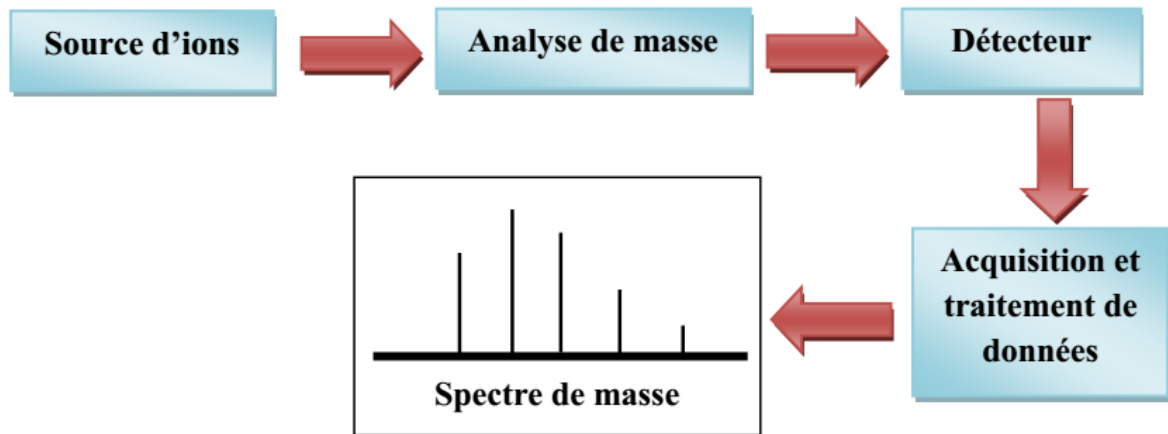


Figure II.10 : Représentation schématique d'un spectromètre de masse [85]

La spectrométrie de masse est une méthode précieuse utilisée pour identifier efficacement des molécules organiques telles que des médicaments. Elle est employée en pharmacie pour diverses applications, notamment la découverte de médicaments, la chimie combinatoire, la pharmacocinétique et le métabolisme des médicaments. De plus, elle est utilisée en clinique pour des applications telles que le dépistage néonatal, l'analyse de l'hémoglobine et dépistage de drogues [86].

II.5.1.2. Spectrophotométrie UV-visible

La spectrophotométrie d'absorption dans l'UV et le visible est une méthode physique non destructive dans les laboratoires d'analyses, qui est basée sur la propriété des molécules d'absorber des radiations lumineuses de longueur d'onde déterminée.

Elle est largement exploitée en analyse quantitative, depuis fort longtemps dans le domaine du visible. Les mesures reposent sur la loi de *Beer et Lambert* qui relie dans certaines conditions, l'absorption de la lumière à la concentration d'un composé en solution. Cette loi est présentée sous la forme actuelle :

$$A = \epsilon l C$$

Où **A** : désigne l'absorbance, paramètre optique sans dimension, accessible au moyen du spectrophotomètre ;

l : est l'épaisseur (en cm) de la solution traversée ;

C : est la concentration molaire ;

ϵ : est le coefficient d'absorption molaire (L/mol.cm) à la longueur d'onde à laquelle on fait la mesure.

La spectrophotométrie UV-visible comprend quatre parties essentielles (Fig.II.11) :

- **Source lumineuse** : Elle est toujours constituée par soit une lampe à décharge au deutérium soit une lampe à filament tungstène ou bien une lampe à décharge xénon.
- **Monochromateur** : L'élément de base est un prisme, un réseau ou un filtre coloré, le rôle du monochromateur est d'isoler le rayonnement sur lequel on fait la mesure.
- **La cuve** : Elle contient soit la référence soit l'échantillon, avec une longueur allant de 1-5 cm, elle doit être transparente aux radiations d'études, elle est faite de quartz elle ne peut être ni en plastique ni en verre
- **Détecteur** : Il peut être une photodiode, une barrette de diode ou bien un photomultiplicateur [87].

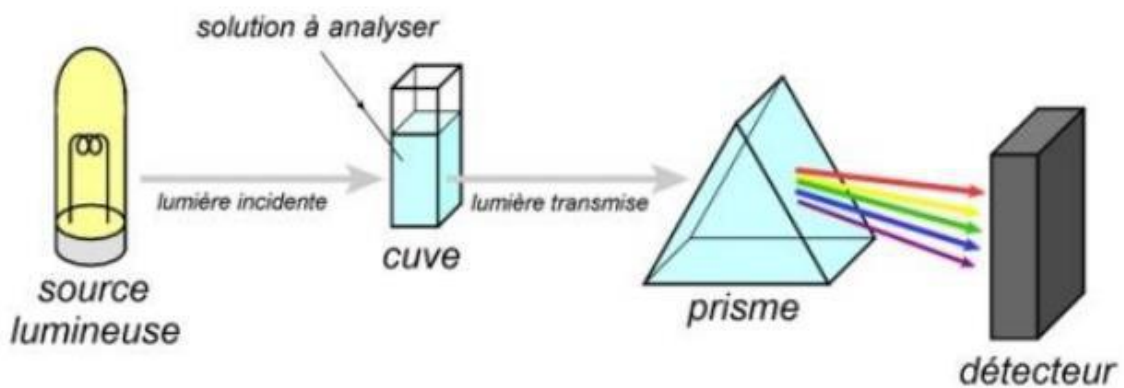


Figure II.11 : Principe de la spectrophotométrie UV-visible [87]

La spectrophotométrie UV-visible est largement utilisée dans l'analyse des composés organiques, notamment dans les domaines pharmaceutique, agricole et chimique. Cette technique permet de quantifier la concentration des composés tels que les médicaments, les pesticides, les détergents et les hydrocarbures. Son application dans ces secteurs permet un contrôle de qualité efficace, une détection de contaminants et une évaluation de la pureté des échantillons, contribuant ainsi à garantir la sécurité et la qualité des produits [88-91].

II.5.1.3. La chromatographie Liquide à Haute Performance (HPLC)

La Chromatographie liquide haute performance (HPLC) est une technique qui permet de séparer les différents composants d'un mélange. Elle implique l'utilisation d'une phase stationnaire et d'une phase mobile liquide.

De façon générale, la phase mobile circule à travers la phase stationnaire en entraînant avec elle les différents composants de l'échantillon.

Les composés subissent deux effets antagonistes, l'un d'entraînement par la phase mobile dans laquelle ils sont solubles et l'autre de rétention exercée par la phase stationnaire.

La rétention des composés dépend de leurs propriétés physicochimiques et de leurs interactions avec la phase stationnaire et la phase mobile. Ainsi, la séparation des composés repose sur leur différence d'affinités entre les phases stationnaire et mobile.

Une chaîne HPLC est constituée de 5 éléments majeurs (Fig.II.12) : un système de pompage de la phase mobile, une colonne, un système d'injection, un détecteur et un système de traitement des données :

- Le système de pompage permet de faire circuler la phase mobile à l'intérieur du système et permet de réguler avec précision le débit et la composition de celle-ci.
- La colonne contient la phase stationnaire qui permet de séparer les constituants d'un mélange en fonction de leur polarité, leur charge ou bien encore leur taille. Il est également possible de faire varier la température des colonnes chromatographiques afin de d'améliorer le profil des pics chromatographiques et faire varier la sélectivité.
- Le système d'injection permet d'introduire un volume précis d'échantillon dans le système qui dépend des paramètres géométriques de la colonne et la sensibilité souhaitée.
- C'est ce qui permet d'obtenir les chromatogrammes et parmi les détecteurs les plus utilisés, on peut citer les détecteurs spectroscopiques dans l'ultraviolet (UV) et le visible, fluorimétriques ou le couplage avec les spectromètres de masse (MS).
- L'analyse des données se fait à partir d'un logiciel qui donne des informations qualitative et quantitative de l'analyse réalisée [92].

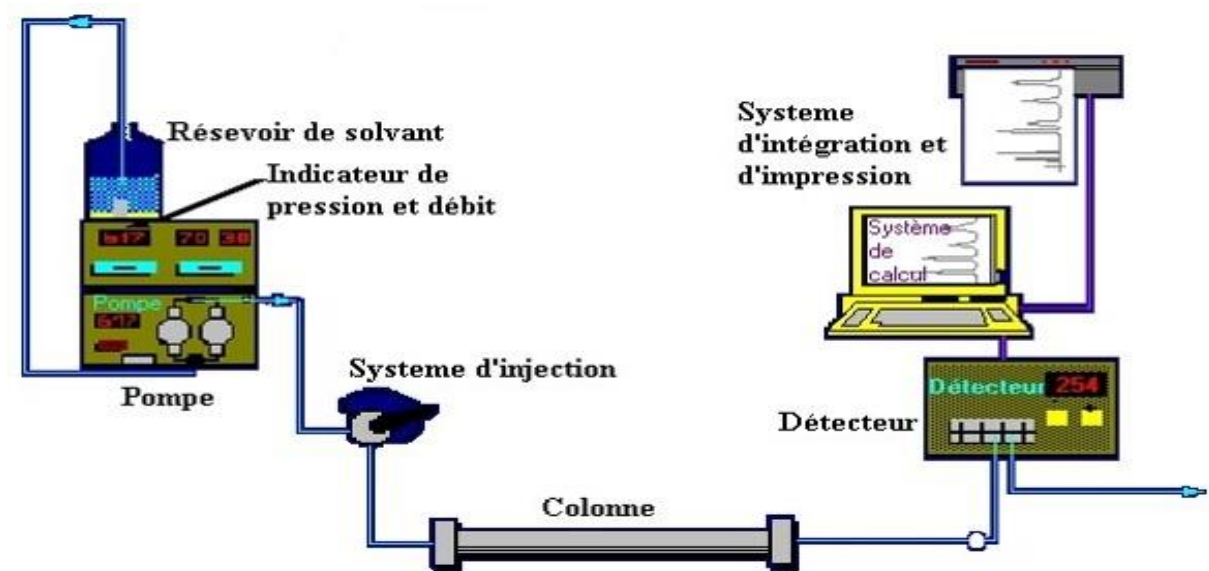


Figure II.12 : Principe de fonctionnement d'une chaîne HPLC [93]

L'HPLC est une technique essentielle pour l'analyse des molécules organiques dans divers domaines tels que la pharmacie, l'agriculture, l'environnement et l'industrie des détergents. Elle est utilisée pour analyser les principes actifs des médicaments, détecter les résidus de pesticides, surveiller les polluants hydrocarburés et analyser la composition des détergents. En résumé, l'HPLC joue un rôle crucial dans la garantie de la qualité, de la sécurité et de la conformité des produits dans ces industries [94].

II.5.1.4. Le titrage

Le titrage (aussi appelé titrimétrie) est toujours couramment pratiqué dans l'eau ou en milieu non aqueux. La simplicité des équipements et de mise en œuvre, la rapidité d'analyse, la justesse des résultats grâce aux progrès de l'instrumentation de mesure et la facilité des calculs sont la raison de sa popularité.

Le titrage est une méthode d'analyse quantitative ayant pour objet le dosage de divers composés contenus dans un mélange. La prise d'essai de substance à doser réagit exactement avec une quantité de réactif en solution de concentration connue. Il reste juste à déterminer le volume de réactif nécessaire pour que la réaction soit complète, totale.

Le titrage consiste à faire entrer en réaction la substance à doser (analyte) dissoute avec un réactif défini de concentration connue. Si la fin de la réaction peut être déterminée avec exactitude, il est aisé de calculer la concentration de l'analyte.

L'analyse titrimétrique consiste donc en la détermination du volume de réactif antagoniste. Connaissant l'équation de la réaction immédiate ainsi que le volume du réactif ajouté, on déduit facilement la concentration de l'espèce chimique inconnue.

Les titrages sont basés sur des réactions chimiques et ces réactions doivent répondre aux conditions suivantes :

- ✓ La réaction doit être simple et s'exprimer par un équilibre chimique ;
- ✓ Les deux réactifs antagonistes doivent réagir complètement et en proportions stoechiométriques ou équivalentes ;
- ✓ La réaction doit être instantanée ou s'effectuer à une vitesse suffisamment rapide ;
- ✓ La fin de la réaction doit pouvoir être déterminée avec exactitude. Le point d'équivalence correspond au volume de réactif nécessaire pour que le dosage soit complet. Il est révélé soit par un indicateur chimique (changement de couleur d'un indicateur coloré...) soit par une variation brutale d'une propriété physique (pH, redox...) [95].

La figure suivant représente un dispositif de titrage :

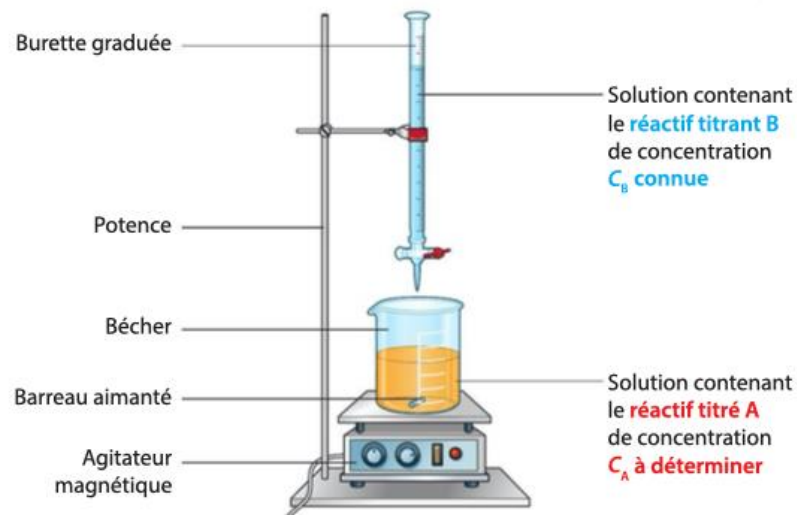


Figure II.13 : un dispositif de titrage [96]

La méthode de titrimétrie est souvent utilisée pour identifier et quantifier les métaux lourds toxiques dans les eaux usées dans le domaine de l'analyse environnementale et de la gestion des déchets. Cela permet de surveiller et de contrôler la contamination des eaux et de prendre des mesures appropriées pour protéger l'environnement et la santé publique [97].

II. 5.1.5. Spectroscopie Absorption atomique

La spectrométrie d'absorption atomique (AAS) est une technique décrite pour la 1^{ère} fois par *Walsh* en 1955.

AAS étudie les absorptions de lumière par l'atome libre. C'est une des principales techniques mettant en jeu la spectroscopie atomique dans le domaine UV-visible utilisée en analyse chimique. Elle permet de doser une soixantaine d'éléments chimiques (métaux et non-métaux). Les applications sont nombreuses étant donné qu'on atteint couramment des concentrations inférieures au mg/L (PPm) [98].

Le principe de fonctionnement de la technique de spectroscopie d'absorption atomique repose sur le fait qu'un élément atomisé absorbera la lumière d'une longueur d'onde caractéristique, le faisant quitter l'état fondamental vers un état excité.

La quantité d'énergie lumineuse absorbée est proportionnelle au nombre d'atomes analytes dans le trajet optique.

La technique est étalonnée en introduisant des concentrations connues d'atomes analytes dans le trajet optique et en faisant un graphique d'absorption par rapport à la concentration.

En pratique, l'AAS est réalisée à l'aide d'une spectroscopie d'absorption atomique qui comprend les éléments suivants (Fig.II.14) :

- **Une source de lumière** : une lampe à cathode creuse qui émet une lumière spécifique à l'élément d'intérêt.
- **Un atomiseur** : un dispositif qui convertit l'échantillon liquide en atomes libres qui absorbent l'énergie de la lampe.
- **Un monochromateur** : un système qui permet de sélectionner une longueur d'onde spécifique de la lumière.
- **Un détecteur** : un dispositif qui mesure l'intensité de la lumière transmise à travers la vapeur atomique [99].



Figure II.14 : Installation générale de la spectroscopie d'absorption atomique [99]

La spectroscopie d'absorption atomique est une technique précieuse pour l'identification et la quantification des métaux lourds toxiques dans les eaux usées. Sa sensibilité, sa sélectivité

et sa capacité à analyser une large gamme d'éléments en font un outil essentiel pour la surveillance de la qualité des eaux usées et la protection de l'environnement [100].

II. 5.2. Méthodes modernes des capteurs in-situ

Les méthodes classiques d'analyse de l'eau, qui nécessitent souvent un laboratoire et des employés spécialisés en raison de la complexité de l'utilisation des équipements ainsi que de leur coût élevé, ont conduit à envisager des approches nouvelles, simples, fiables et peu coûteuses.

La combinaison de propriétés spécifiques de reconnaissance moléculaire avec l'extrême sensibilité des transducteurs optiques, électrochimiques ou gravimétriques a conduit à l'émergence d'une nouvelle génération d'outils analytiques : les capteurs. Le développement des capteurs connaît une expansion majeure en raison des applications industrielles potentielles dans le domaine de l'environnement (dosage in situ des polluants). Récemment l'essor des technologies en microélectronique a offert de nouvelles opportunités pour la miniaturisation des capteurs [101].

Les technologies modernes offrent des options idéales. Facilement utilisables, elles ne nécessitent aucune expertise particulière, ce qui les rend accessibles à un large public. Leur caractère portable et compact permet des analyses sur site, in situ, et en temps réel, offrant ainsi une flexibilité inégalée. De plus, leur coût réduit les rend nettement plus abordables que les méthodes classiques, ouvrant ainsi de nouvelles opportunités dans de nombreux domaines d'application [102-103].

Dans de nombreux domaines tels que l'industrie, le domaine médical, l'environnement, la recherche scientifique, les services, les loisirs, etc., il est nécessaire de contrôler différents paramètres physico-chimiques à l'aide de capteurs spécialisés [104].

II. 5.2.1. Définition de capteur

Un capteur est un dispositif qui transforme une grandeur (physique, chimique, biologique...etc.) entrée, appelée mesurande (m), en une grandeur utilisable de nature électrique (en général) appelée réponse (s) (Fig.II.15) [105].

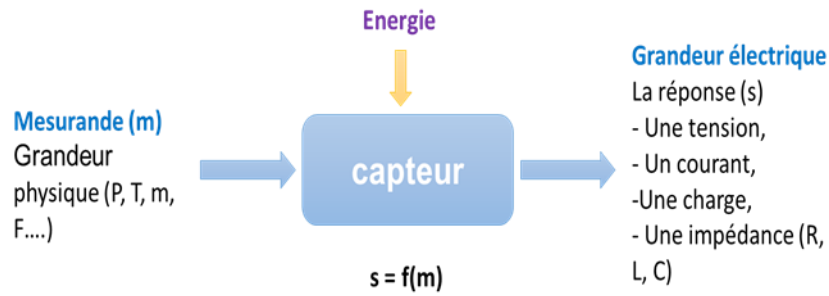


Figure II.15 : Principe d'un capteur [106]

La relation qui lie (s) à (m), soit $s = F(m)$, dépend de :

- la loi physique régissant le capteur
- la construction pratique du capteur
- l'environnement du capteur [107].

II.6. Méthodes d'élimination des métaux lourds est les molécules organiques

II.6.1. Électrodéposition

L'électrodéposition joue un rôle crucial dans l'élimination des métaux lourds, une pratique essentielle pour réduire la pollution environnementale et protéger la santé publique.

Ce processus repose sur le principe de la séparation électrochimique, où les ions métalliques présents dans une solution sont réduits à l'état solide sur une électrode lorsqu'une tension électrique est appliquée (fig.II.14) [108].

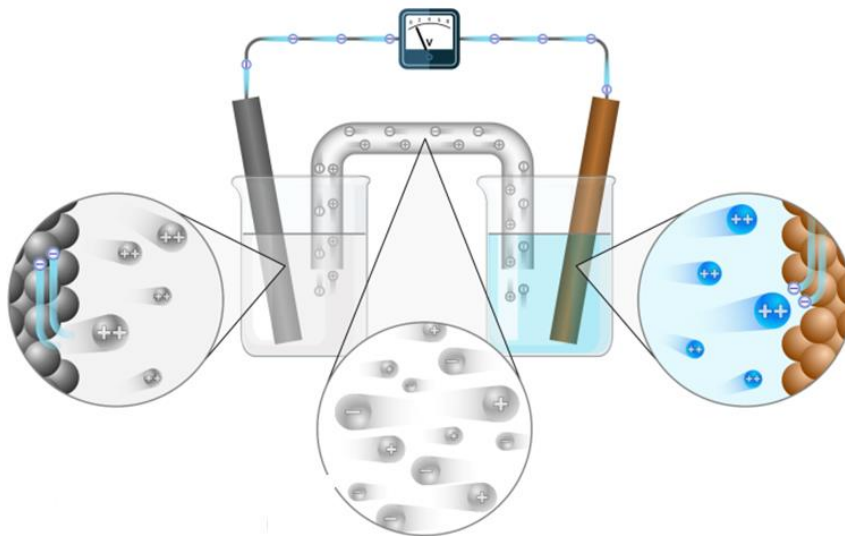


Figure II.16 : Montage d'une cellule d'électrolyse [109]

Dans le contexte de l'élimination des métaux lourds, les ions métalliques indésirables sont souvent présents dans les eaux usées industrielles ou les effluents chimiques. En appliquant

une tension électrique adéquate à travers une solution contenant ces ions, on peut favoriser leur dépôt sur une électrode appropriée, généralement en matériaux spécifiquement conçus pour capter ces métaux (dans notre travail nous avons utilisés le graphite). Ce processus permet ainsi de concentrer les métaux lourds indésirables dans un matériau solide, qui peut ensuite être récupéré et éliminé de manière appropriée, contribuant ainsi à réduire leur présence dans l'environnement et à limiter leurs effets néfastes sur la santé et les écosystèmes.

L'électrodéposition représente donc une méthode efficace et précise pour traiter les effluents contenant des métaux lourds, contribuant ainsi à promouvoir une gestion durable des ressources naturelles et à préserver la qualité de l'environnement [110].

Conclusion

En conclusion, sensibiliser aux problèmes de pollution des réseaux d'égouts par les matériaux lourds et les molécules organiques est crucial pour promouvoir des solutions environnementales et réaliser un développement durable. Des méthodes telles que l'électrodéposition sont prometteuse pour éliminer ces polluants et préserver la santé de nos écosystèmes aquatiques. En investissant davantage dans la recherche et en encourageant l'adoption de ces technologies, nous pouvons collaborer pour construire un avenir où nos ressources hydriques sont préservées pour les générations futures.

Références bibliographiques

- [1] Alia S, Athamnia w, Derdech S. Évaluation de la qualité bactériologique et physicochimique des eaux de sources d'Ain Djemel et d'Ain Souda (Wilaya Guelma) [Mémoire de Master]. [Université 8 Mai 1945 Guelma] ; 2018.
- [2] Aboubacar Barmou H. Adsorption des cations métalliques sur un déchet agricole [Mémoire de Master]. [Université 8 Mai 1945 Guelma] ; 2023.
- [3] Mehammedia A, Touati Tliba k. Evaluation de l'efficacité de la station d'épuration des eaux usées (STEP) de Guelma [Mémoire de Master]. [Université 8 Mai 1945 Guelma] ; 2020.
- [4] <https://www.cieau.com/connaitre-leau/la-pollution-de-leau/pollution-ressource-eau-comment-reduire/>. Consulté le 01/03/2024.
- [5] Derras A, Tabeni B. Epuration des eaux usées de la ville de Guelma à la STEP de Guelma [Mémoire de Master]. [Université 8 Mai 1945 Guelma] ; 2015.
- [6] BenahmedDaidj k. Traitement de la pollution organique dans l'eau par des procédés physico-chimiques [Thèse]. [Faculté Des Sciences Exactes Sidi Bel-Abbès] ; 2018.
- [7] Sninate I, Bennanal A. L'impact du vieillissement démographique sur la consommation médicale : assurance maladie obligatoire au Maroc. Pan African Medical Journal; 2020.
- [8] <https://questionsexualite.fr/choisir-sa-contraception/tous-les-modes-de-contraception/la-pilule-comment-ca-marche>. Consulté le 03/03/2024.
- [9] Bourgault L. Pharmaceutical pollution of the world's rivers [Institut national de la recherche agronomique (INRAE)] ; 15 février 2022.
- [10] <https://aawsat.com/>. Consulté le 03/03/2024.
- [11] Mekhalif F. Reutilisation des eaux résiduaires industrielles épurées comme eau d'appoint dans un circuit de refroidissement [Mémoire de Magister]. [Université du 20 Août 1955 Skikda] ; 2009.
- [12] Babai C, Al Saidi N. Pollution résultant des stations-service en zone urbaine [Mémoire de Master]. [Université Kasdi-Merbah Ouargla] ; 2021.
- [13] Ghrairi B, Hkom M. Etude d'impact environnemental des stations de lavage et de lubrification des voitures urbaine [Mémoire de Master]. [Université Kasdi-Merbah Ouargla] ; 2021.
- [14] Djeddar F, Briki F Z. Valorisation des boues d'épuration dans le traitement des eaux huileuses au niveau de la région de HaoudBerkaoui [Mémoire de Master]. [Université Kasdi-Merbah Ouargla] ; 2020.
- [15] <https://www.afrigatenews.net/static/files/20221229-143939jpg>. Consulté le 05/03/2024.
- [16] <https://www.iaea.org/>. Consulté le 07/03/2024.
- [17] <https://www.sciencedirect.com/>. Consulté le 07/03/2024.
- [18] <https://www.researchgate.net/>. Consulté le 07/03/2024.
- [19] <https://www.eau-et-rivieres.org/>. Consulté le 07/03/2024.

- [20] Les produits utilisés pour la détergence, la désinfection et l'antisepsie [Guide pour la formation de nouveaux professionnels en établissements de soins CCLIN Sud-Ouest] ; 2017.
- [21] <https://eco2net.ch/blog/detail/comment-choisir-ses-produits-de-nettoyage>. Consulté le 10/03/2024.
- [22] détergent. Encyclopaedia britannica ; 2024.
- [23] https://environment.ec.europa.eu/index_en. Consulté le 10/03/2024.
- [24] Organochlorés [Polycopié de cours]. [Université des Frères Mentouri Constantine 1] ; 2021.
- [25] <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/themes/pesticides/fr/>. Consulté le 13/03/2024.
- [26] Aziz Hamid Al Mosawi K, Abd el djalil Abd el karim B. Effect of iron and zinc paper spraying on growth and yield of white maize The effect of the conventional and modified subsoiler on the Saturated hydraulic conductivity in clay soil during different periods and growth and yield sun flower crop (Helianthus annus L.) [Al-Muthanna journal of agricultural sciences]. [University of Basra,Iraq] ; 2017.
- [27] Rapport sur la situation de la sécurité alimentaire dans les pays arabes [Organisation arabe pour le développement agricole]. [Université des états arabes]; 2018.
- [28] Ali Ahmed Al-badrani W, Talaat Chaker I. Effect of organig and phosphorus fertilizer on growth and yield of rapeseed (Brassica napus L.) [College of Agric. And Forestry Mosul University] ; 2013.
- [29] <https://ar.environmentgo.com/effects-of-water-pollution-on-animals/>. Consulté le 13/03/2024.
- [30] Bentahnane A. Traitement des eaux usées urbaines par les boues activées au niveau de la ville de Mostaganem effectué par la station d'épuration des eaux [Mémoire de Master]. [Abdel Hamid Ibn BadisUniversity – Mostaganem] ; 2021.
- [31] Bouabdallah F. Utilisation des biomatériaux dans le traitement des eaux [Mémoire de Master]. [Université Abou-BekrBelkaid - Tlemcen] ; 2018.
- [32] Denideni Y, Maghne H. Etude de l'adsorption des ions manganèse et chrome sur la biomasse « Pleurotus mutilus » [Mémoire de Master]. [Ecole Nationale Polytechnique] ; 2017.
- [33] Olivier P. La problématique du mercure dans les eaux usées de Montréal [Essai]. [Université De Sherbrooke] ; 2015.
- [34] <https://www.carlroth.com/fr/fr/mercure/mercure/p/7594.1>. Consulté le 16/03/2024.
- [35] Claudia Santiago A.C, Sylvio R.B.F, Ciro.C, Marcos W, Marcelo O.L, Paulo C.B. Health Risk Assessment Attributed to Consumption of Fish Contaminated with Mercury in the Rio Branco Basin, Roraima, Amazon, Brazil ; 2022.
- [36] <https://all.accor.com/brands/mercure.en.shtml>. Consulté le 16/03/2024.
- [37] Marnane I. Le mercure une menace persistante pour l'environnement et la santé des citoyens ; 2018.
- [38] <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>. Consulté le 16/03/2024.
- [39] Le mercure [Santé environnementale-Série de feuillets d'information sur les contaminants] ; Octobre 2016.

- [40] Alexander V.Z, Alexander V.K, Ulmas R, Solijon M.U, Tatiana Y, Igor V.S, Richard D.R, Daniel A.Z, Scott Z, Evgenia A.K, Yana A.K, Lyudmila S.K, Timothy D.J, Dilshod M.M, Elmurodjon D.A, Igor K.V. Legacy Contamination from Mercury Mining in the Fergana Valley Region of Central Asia. ACS Chem. Health Saf ; 2023.
- [41] Maruszczak N. Etude du transfert du mercure et du méthylmercure dans les écosystèmes lacustres alpins [Thèse]. [Université De Grenoble] ; 2010.
- [42] Fares R, Sédairia L. Stress abiotique sur *Atriplexhalimus L* : Effet des métaux lourds et caractérisation des biomarqueurs [Mémoire de Master]. [Université Larbi Tébéssi -Tébessa] ; 2021.
- [43] Rahmani N. Le saturnisme intoxication au Plomb [Cours de médecine du travail 6^{ème} années médecine]. [Université Ferhat Abbas-Sétif 1].
- [44] Key scientific findings for lead [an excerpt from Final review of scientific information on lead]. [United Nations Environment Programme] ; December 2010.
- [45] <https://www.lenntech.fr/data-perio/pb.htm>. Consulté le 19/03/2024.
- [46] <https://www.canada.ca/errors/404.html>. Consulté le 19/03/2024.
- [47] Marzougui Z. Élaboration de Latex magnétique fonctionnalisée pour le traitement des eaux usées par adsorption [Thèse]. [Université De Sfax, Université Claude Bernard Lyon 1] ; 2016.
- [48] Gérard M. Les effets des métaux lourds sur la santé et l'environnement [Rapport d'information n° 261]. [Paris] ; 2001.
- [49] Doillon D. Déterminants moléculaires de la tolérance au zinc des microorganismes eucaryotes [Thèse]. [Université D'Henri Poincaré, Nancy-Université] ; 2010.
- [50] Chebli I. Cadmium [Cours de 5^{ème} année Pharmacie]. [Faculté de médecine de Constantine-département de pharmacie] ; 2022.
- [51] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065211320301036,%20INRAE,%202018>. Consulté le 22/03/2024.
- [52] Aboulfadl S. Effet de l'accumulation du cadmium chez les plantes [livre] ; 2022.
- [53] Benariba R, Mokhtari R, Bougherara N. La toxicité de cadmium et ses risques sur la santé humaine [Mémoire de Master]. [Université Des Frères Mentouri Constantine] ; 2016.
- [54] Rousselet E. Réponse cellulaire vis-à-vis de l'exposition au cadmium chez les animaux [Thèse]. [Université Joseph Fourier] ; 2011.
- [55] <https://www.britannica.com/summary/nickel-chemical-element>. Consulté le 25/03/2024.
- [56] <https://www.laboratuvar.com/fr/tekstil-testleri/kimyasal-ve-ekolojik-testler/nikel-miktari-tayini>. Consulté le 25/03/2024.
- [57] <https://www.ft.com/content/cd1fd7f3-b3ea-4603-8024-db75ec6e1843>. Consulté le 25/03/2024.
- [58] <https://substances.ineris.fr/fr/substance/getDocument/2812>. Consulté le 25/03/2024.

- [59] Fiche incluse dans rapport 'Evaluation des risques sanitaires liés aux situations de dépassement des limites et références de qualité des eaux destinées à la consommation humaine [Saisine n°2004-SA-0068] ; Octobre 2005.
- [60] Nickel et composés (*) [Fiche toxicologique n°68]. [Institut national de recherche et de sécurité En France] ; 2021.
- [61]<https://www.plantes-et-sante.fr/articles/on-en-parle/1503-recolter-le-nickel-par-les-racines>. Consulté le 25/03/2024.
- [62]<https://www.tela-botanica.org/>. Consulté le 25/03/2024.
- [63] Boulila I. Effets reprotoxiques du nickel chez la rate gestante Wistar [Thèse]. [Université Mustapha Ben Boulaid-Batna 2] ; 2022.
- [64]<https://www.pthorticulture.com/fr/zone-du-savoir/role-du-nickel-en-horticulture/>. Consulté le 26/03/2024.
- [65] <https://www.achilles.com/uncategorised/green-energy-dangers-the-social-impact-of-battery-mining-for-nickel/>. Consulté le 26/03/2024.
- [66] Salvarredy Aranguren M M. Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers Approches géochimique, minéralogique et hydrochimique [Thèse]. [Université De Toulouse] ; 2008.
- [67]<https://fr.wikipedia.org/wiki/Cuivre>. Consulté le 29/03/2024.
- [68]<https://www.lanouvellerepublique.fr/niort/en-quoi-le-sulfate-de-cuivre-est-il-nocif>. Consulté le 29/03/2024.
- [69] Robert R. Etudes sur les causes de la perturbation de la reproduction et du développement larvaire chez *crassostrea gigas* dans le bassin d'arcachon. [Thèse]. [Université De Bretagne Occidentale] ; 1983.
- [70] Dangers pour l'environnement. [Polycopie de cours]. [Commission économique pour l'Europe des Nations unies]
- [71] Pierre A, letarte A. changements à la direction médicale du centre antipoison du Québec. insstitut nationale de santé publique du québec. Vol.31, numéro3 ; 2015.
- [72]<https://fastercapital.com/fr/contenu/Toxicite-du-cuivre---separer-les-faits-de-la-fiction.html> Consulté le 29/03/2024.
- [73] Laurence N.M. Statut en cuivre de l'organisme maternel et développement neuropsychologique des enfants jusqu'à l'âge scolaire. John Libbey Eurotext. Vol. 18, pages 371 à 372 ; 2019.
- [74] Traitement et épuration des eaux [polycopié de Cours]. [Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès]; 2021
- [75] <https://www.who.int/fr>. Consulté le 31/03/2024.
- [76] Benali A, Thamer O. Diagnostic de Fonctionnement de la station D'épuration de Kouinine : Solutions Proposées [Mémoire de Master]. [Université D'El-Oued] ; 2019.
- [77] Journal Officiel de la République Algérienne réglementant les rejets d'effluents liquides ; 2006.

- [78] Boucenina H. Analyse bactériologique des eaux de certaines écoles à la wilaya de Mila [Mémoire de Master]. [Université des Frères Mentouri Constantine] ; 2018.
- [79] Bouamama Z. Transboundary water disputes in Africa; A geopolitical approach through the concept of the regional hydropolitical complex [Journal de pensée politique]. [Université de Tipaza] ; 2022.
- [80] <https://misterprepa.net/egypte-ethiopie-nil-conflit/>. Consulté le 21/02/2024.
- [81] <https://lestrepublicain.com/2024/02/17/station-depuration-des-eaux-usees-de-guelma-derbal-alloue-100-milliards-pour-lassainissement/>. Consulté le 24/02/2024.
- [82] <https://www.worldwatercouncil.org/en>. Consulté le 27/02/2024.
- [83] Boudouaia N. Les methodes de dosage [Polycopie de cours de chimie analytique]. [Université Djillali Liabes - Sidi Bel Abbes] ; 2021.
- [84] Bray F. La spectrométrie de masse haute résolution : Application à la FT-ICR bidimensionnelle et à la protéomique dans les domaines de l'archéologie et la paléontologie [Thèse]. [Université De Lille 1] ; 2017.
- [85] Canon F. Contribution de la spectrométrie de masse à l'étude des interactions entre les protéines salivaires riches en proline et les tanins [Thèse]. [Centre international d'études supérieures en sciences agronomiques] ; 2010.
- [86] <http://www.astbury.leeds.ac.uk/facil/MStut/mstutorial.htm>. Consulté le 07/04/2024.
- [87] Makhlof F Z. Développement d'un capteur sériographié à base de nanoparticules de platine pour la détection simultanée de l'acide ascorbique et du paracétamol [Mémoire de Master]. [Université 8 Mai 1945 Guelma]; 2021.
- [88] Hrishikesh R. Ultraviolet spectroscopy and its pharmaceutical applications- A brief review. Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research. Vol 11, Issue 2; 2018.
- [89] Rachna R, Poonam R.K, SudhirD, MonikaT, VinayG, PundirC.S.A comprehensive review of bilirubin determination methods with special emphasis on biosensors.Process Biochemistry.Vol. 89, February 2020, Pages 165-174 ; 2020.
- [90] <https://www.shimadzu.com/an/literature/uv/apa118042.html>. Consulté le 09/04/2024.
- [91] Toni M, Natasha S, Frank P, Cory M, Marina D, Heinz W.S. Rapid Determination of the Total Petroleum Hydrocarbon Content of Soils by Handheld Fourier Transform Near-Infrared Spectroscopy. Analytical chemistry. Vol. Chem. 2023, 95, 6888–6893 ; 2023.
- [92] Saïda B. Développement de nouvelles stratégies de préparation de l'échantillon et d'analyse pour la recherche de traces de pesticides et de contaminants dans diverses matrices agroalimentaires [Thèse]. [Université De Rouen Normandie] ; 2021.
- [93] Ben saad L. Étude de la séparation des fluoroquinolones par HPLC : application à l'étude de leur dégradation par rayonnement gamma [mémoire de master], [Université D'el Manar, Tunis] ; 2013.
- [94]. Sheppard A. J, O'Dell R. G, Pennington J.A.T. CHOLESTEROL | Properties and Determination. Vol. 2003, Pages 1220-1226 ; 2023.

- [95] <https://lavallab.com/wp-content/uploads/2014/11/Titreurs-automatiques.pdf>. Consulté le 16/04/2024.
- [96] https://jullien-phychim.fr/docs/cours/jullienphychim_cours_20200905143424.pdf. Consulté le 16/04/2024.
- [97] Michela Salvatore M, Francesco S. Understanding Complexometric Titrations of Metal Cations with Aminopolycarboxylic Acids (EDTA and Analogs) within the frame of the Notion of Reactions between Groups of Chemical Species. World Journal of Chemical Education. Vol. 3, No. 1, 5-21 ; 2015.
- [98] Elhajji A. Spectrometrie d'absorption atomique [Polycopié de cours].
- [99] Fundamentals de la Spectroscopie atomique : Hardware [Agilent technologies] ; 2016.
- [100] Nedjar R. Dosage des métaux lourds Cd, Cr, Pb dans les rejets liquides de trois industries de la wilaya de Constantine [Mémoire de Master]. [Université Des Frères Mentouri Constantine] ; 2016.
- [101] Mecheri N. Elaboration de nouveaux capteurs à base d'ionophores sélectifs pour la détection des métaux lourds dans l'eau [Thèse]. [UniversiteBadji Mokhtar-Annaba] ; 2018.
- [102] Peter K. Review on water quality sensors. Journal of Physics D: Applied Physics. Vol. 51, Number 20 ; 2018.
- [103] Bozhi W, Huayang C, Qi J, Huimin P, Bo L, Linxi F. Smart Temperature Sensor Design and High-Density Water Temperature Monitoring in Estuarine and Coastal Areas ; 2023.
- [104] <http://www.mytopschoool.net/mysti2d/activites/polynesie2/ETT/C044/32/Capteurs1/Introduction.html>. Consulté le 23/04/2024.
- [105] Mehidi A. Capteurs Et Instrumentation [Polycopie de cour]. [Abdelhamid Ibn Badis University of Mostaganem]; 2022.
- [106] <http://www.mytopschoool.net/mysti2d/activites/polynesie2/ETT/C044/32/Capteurs1/Introduction.html>. Consulté le 25/04/2024.
- [107] Bendjerad A. capteurs [Polycopie de cours]. [Université Mustapha Ben Boulaid Batna 2].
- [108] Mekkaoui A. Electrodeposition et caracterisation des couches minces nanostructurees a base d'oxydes [Thèse]. [Universite Mohamed Khider-Biskra] ; 2018.
- [109] <https://www.nagwa.com/fr/explainers/172172026301/>. Consulté le 27/04/2024.
- [110] Eschrougui O. électrodeposition de revetemetmuticouche [Mémoire de Master]. [Université Saad Dahleb De Blida] ; 2015.

CHAPITRE III :

Procédures expérimentales et techniques de caractérisation





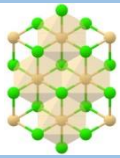

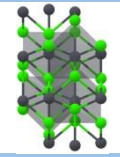

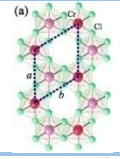



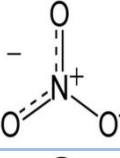

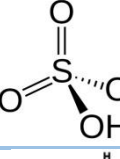

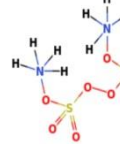

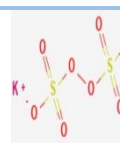

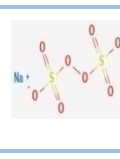

Dans ce chapitre, nous allons détailler la stratégie mise en œuvre pour conduire cette étude. Dans la première section, nous présenterons les produits chimiques utilisés ainsi que le dispositif expérimental. Ensuite, dans la deuxième partie, nous décrirons les techniques et les équipements électrochimiques sélectionnés, ainsi que les outils de caractérisation morphologique et structurelle. Enfin, dans la troisième partie, nous expliciterons le protocole et les techniques de détection et d'élimination des métaux lourds et molécules organique employés dans cette recherche.

III.1. Produits chimiques et montage expérimental

III.1.1. Produits chimiques

Dans le cadre de cette étude, les produits chimiques ont été utilisés sans recourir à aucune purification quelle que soit leur nature. Les produits que nous avons utilisés sont listés dans le tableau III.1 ci-dessous :

Tableau III.1 : Produits chimiques utilisés dans la partie expérimentale

Nom du produit	Formule brute	Masse molaire (g/mol)	Structure	Forme	Pureté	Fournisseurs
Chlorure de mercure (II)	HgCl ₂	271.52			99.5%	Fluka
Chlorure de cadmium(II)	CdCl ₂	183.32			98%	Fluka
Chlorure de plomb(II)	PbCl ₂	278.1			99.99%	Fluka
Chlorure de chrome(III)	CrCl ₃	158.36			98%	Fluka
Chlorure d'hydrogène	HCl	36.46	H—Cl 		99.99%	Merck
Acide nitrique	HNO ₃	63.01			99.99%	Merck
Acide sulfurique	H ₂ SO ₄	98.079			95%	Fluka
Persulfate d'ammonium	(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈	228.2			98%	Fluka
Persulfate de potassium	K ₂ S ₂ O ₈	270.3			99%	Fluka
Persulfate de sodium	Na ₂ S ₂ O ₈	238.1			98%	Fluka
Mercure	Hg	200.59 u			99.99%	Sigma
Cadmium	Cd	112.411u			99.95%	Sigma
Plomb	Pb	207.2 u			99.97%	Sigma
Chrome	Cr	51.996 u			99%	Sigma

III.1.2. Solutions utilisées

Pour mener notre étude nous avons préparé les solutions suivantes :

- Une solution tampon d'acétate (ABS) 0,1 M pH= 4,7 servant d'électrolyte support, préparée à partir de l'acide acétique (99,9%, Fluka®).et l'acétate desodium ($\geq 99,9\%$, Fluka®).
- Les solutions étalon de métaux utilisées ont été préparées à partir des solutions suivantes :
 - Cadmium (Atomic adsorption, standard solution. 1000 mg.mL⁻¹dans 2 wt %HNO₃. Fluka®).
 - Plomb (Atomic adsorption, standard solution. 1000 mg.mL⁻¹dans 2 wt % HNO₃. Fluka®).
 - Mercure (Atomic adsorption, standard solution. 1000 mg.mL⁻¹dans 2 wt % HNO₃. Fluka®).
 - Cuivre (Atomic adsorption, standard solution. 1000 mg.mL⁻¹dans 2 wt %HNO₃. Fluka®).

Toutes les solutions aqueuses ont été préparées à partir d'eau distillée. Le matériel utilisé (propipettes, verreries, balances, bain ultrasons...) est soumis à des vérifications de fonctionnalité régulières et à des validations de performances.

III.2. Dispositif expérimental

III.2.1. Montage expérimental pour l'étude électrochimique

Le dispositif expérimental utilisé pour les études électrochimiques (Fig. III.1) est composé d'une cellule électrochimique, à une seule plateforme sérigraphie (SPE) comportant les trois électrodes :

Électrode de référence notée «E_R» : une électrode dont le potentiel est constant et bien défini. Dans notre étude toutes les mesures de potentiel sont prises par rapport à l'électrode d'argent chlorure d'argent Ag/AgCl. Son potentiel par rapport à l'électrode normale à hydrogène (ENH) est égal à 0,22 V.

Électrode auxiliaire notée «E_A» : une électrode qui ne participe pas directement à la réaction électrochimique de mesure, mais qui est nécessaire pour maintenir le courant constant dans la cellule. Dans cette étude, une électrode en graphite a été utilisée.

Électrode de travail notée «E_T» : une électrode sur laquelle se produit la réaction électrochimique de mesure. L'électrode de travail utilisée est une électrode en graphène de 3 mm de diamètre [1].

Cette cellule est reliée à un Potentiostat-Galvanostat de la marque Princeton Applied Research, modèle PAR 273A par l'intermédiaire d'un électromètre. Le logiciel permettant le pilotage du potentiostat est le Power Suite software.



Figure III.1 : Représentation du dispositif expérimental

III.2.2. Montage expérimental pour l'élimination des métaux lourds

Le dispositif expérimental utilisé pour l'élimination des métaux lourds (Fig. III.2) est composé :

- Une alimentation stabilisée, connecté à un multimètre.
- Un agitateur magnétique menu d'un thermocouple pour le réglage de la température.
- Deux substrats en graphite branchés au pôle négatif et au pôle positif du générateur.
- Un support mobil utilisé pour l'ajustement de la surface immergé.
- Un chronomètre utilisé pour mesurer le temps d'obtention de dépôt.



Figure III.2 : Le dispositif expérimental utilisé pour l'élimination des métaux lourds

III.2.3. Équipements secondaires

III.2.3.1. Agitateur magnétique à plaque chauffante MS-H-Pro+

Un agitateur magnétique numérique à plaque chauffante circulaire MS-H-Pro-Plus (SCIOGEX, USA) a été utilisé dans ce travail (Fig. III.3).

Cet agitateur possède des multiples caractéristiques telles qu'une régulation numérique de la vitesse de rotation jusqu'à 1500 tr/min, une régulation numérique de la température avec une température maximum de 340°C, une plaque de travail en acier inoxydable avec revêtement céramique pour une bonne résistance aux produits chimiques et une stabilité à basse température [2].



Figure III.3 : Agitateur magnétique à plaque chauffante MS-H-Pro Plus (SCIOGEX, USA) utilisé dans ce travail

III.2.3.2. Étuve U de Memmert

Une étuve/armoire de séchage de marque Memmert a été utilisée dans ce travail (Fig. III.4).

Cette étuve offre des performances incomparables en matière de précision, d'homogénéité et de qualité de son contrôle thermique et aussi des avantages uniques comme un réglage électronique du taux de changement d'air et de la position du clapet d'air, une utilisation conviviale et intuitive, un préchauffage de l'air frais pour empêcher les variations de température et un caisson intérieur et paroi extérieure fabriqués quasi-exclusivement à partir d'acier inoxydable de grande qualité, résistant à la corrosion et facile d'entretien [3].



Figure III.4 : Étuve U de Memmert utilisée lors de ce travail

III.2.3.3. Bain de nettoyage Ultrason-H

Le bain à ultrasons est une procédure accélérée de nettoyage de pièces ou de dissolution de produits par l'effet mécanique d'ondes ultrasonores de fréquence généralement comprises entre 20 kHz et 400 kHz. Il est utilisé dans des laboratoires, les techniques dentaires et médicales, la micro-électronique, l'ingénierie de précision, la cosmétique, l'optique et l'industrie automobile [4].

Dans ce travail, un bain de nettoyage Ultrason-H de marque J.P Selecta, France a été utilisé (Fig. III.5). Ce bain présente de multiples caractéristiques telles qu'un récipient à double corps, entièrement en acier inoxydable, un dispositif de vidange, un filtre anti-bruit, une déconnexion temporisée et un chauffage réglable, selon le modèle. Des éléments chauffants, fixés à la cuve, à fort pouvoir de diffusion [5].



Figure III.5 : Ultrason-H de marque J.P Selecta utilisé dans ce travail

III.3. Nettoyage de la verrerie

Pour réaliser des expériences d'électrochimie et afin d'obtenir des résultats précis et fiables, il est important d'utiliser une verrerie très propre, impeccable et exempte de toute contamination. La présence de molécules organiques résiduelles peut entraîner des erreurs dans les résultats des expériences électrochimiques de deux façons : en s'adsorbant sur l'électrode de travail bloquant des sites actifs, en réagissant avec le capteur impliquant un transfert de charges menant à des pics d'oxydation ou de réduction indésirables sur nos courbes [6].

Pour préparer la verrerie utilisée dans les expériences d'électrochimie, elle est d'abord nettoyée, lavée, puis rincée à l'eau du robinet et une seconde fois à l'eau distillée ultrapure. Après un rinçage à l'acétone, toute la verrerie est mise à sécher dans une étuve à 50°C. Elle est ensuite prête à être utilisée pour l'étude des réactions électrochimiques.

III.4. Techniques et matériels de caractérisation

L'analyse des eaux usées est une étape cruciale pour garantir la qualité de l'eau et la protection de l'environnement. La détection et la quantification des contaminants présents dans les eaux usées sont essentielles pour évaluer leur impact potentiel sur la santé humaine et l'environnement.

Pour ce faire, nous avons sélectionné trois techniques de caractérisation : la voltampérométrie cyclique, la voltamétrie différentielle à ondes carrées et la spectroscopie d'absorption atomique. Ces méthodes offrent une approche complète pour l'analyse des échantillons, permettant une détection précise et fiable des contaminants ciblés.

III.4.1. Voltampérométrie cyclique

La voltampérométrie cyclique est l'une des techniques les plus utilisées pour l'étude des systèmes électrochimiques. La principale propriété de cette méthode est sa capacité à donner des informations qualitatives sur une réaction se produisant à l'électrode de travail. Elle permet aussi la détection d'intermédiaires réactionnels labiles et contribue à préciser des cinétiques de réaction. Lors de l'analyse, seules les concentrations en espèces électroactives à la surface de l'électrode subissent d'importantes variations, tandis que les concentrations au sein de la solution ne sont pratiquement pas affectées.

La voltampérométrie cyclique est une technique impliquant un balayage triangulaire de potentiel c'est à dire un balayage aller à partir d'un potentiel à courant nul, E_i , jusqu'à une valeur finale, E_f , suivi du balayage retour au potentiel initial E_i (Fig.III.6). Le courant est mesuré, à l'électrode de travail, en milieu non agité, pendant le balayage en potentiel. La courbe résultant de l'enregistrement du courant en fonction du potentiel imposé est appelée voltampérogramme cyclique [7].

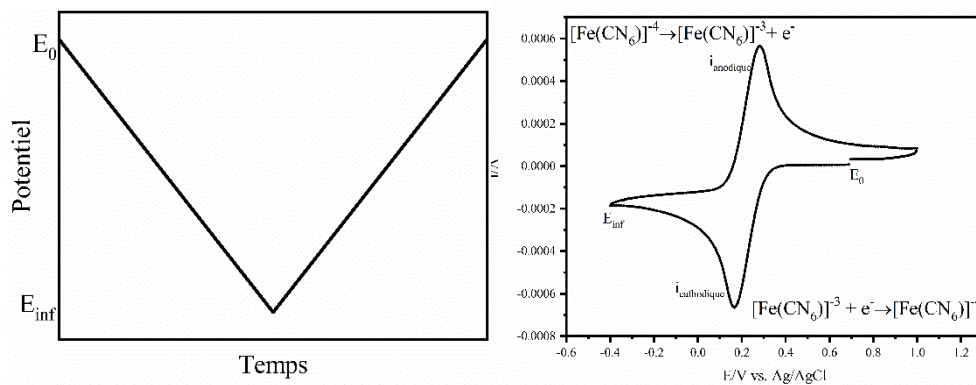


Figure III.6 : (a) Signal potentiel-temps typique de la voltampérométrie cyclique (b) Exemple d'un voltampérogramme cyclique [8]

III.4.2. Voltamétrie différentielle à ondes carrées

La voltammétrie à vague carrée (ou SWV pour l'anglais square wave voltammetry) utilise des impulsions rectangulaires de potentiel d'amplitude constante et de durée égale à la moitié de la période de la « vague ». La hauteur de l'impulsion de la vague ou amplitude est notée A .

La hauteur du pas de potentiel qui correspond à la différence de hauteur entre deux impulsions consécutives s'écrit ΔE . Le courant est mesuré à la fin de l'impulsion (I_1) et avant l'impulsion suivante (I_2).

Sur la figure III.7, nous pouvons voir comment varie le potentiel en fonction du temps lors d'une voltammétrie à vague carrée. De manière générale, la différence $\Delta I = I_1 - I_2$ est tracée en fonction de $E + A/2$, où E est le potentiel du début de la vague. Un exemple se trouve sur la figure III.8 [9].

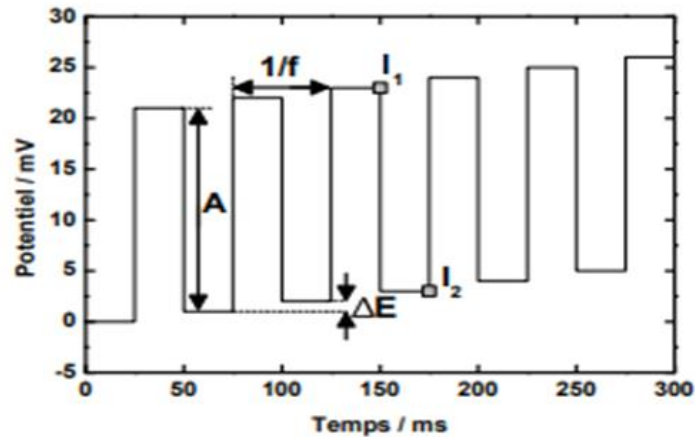


Figure III.7 : Variation du potentiel au cours du temps lors d'une voltammétrie à vague carrée [9]

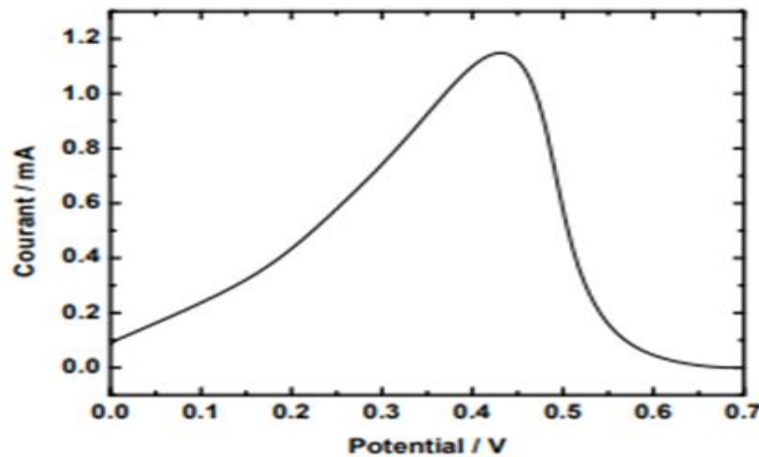


Figure III.8 : Réponse en courant en fonction du potentiel lors d'une voltammétrie à vague carrée [10]

III.4.3. Spectroscopie d'absorption atomique

La spectrométrie d'absorption atomique (SAA) est une technique décrite pour la 1^{ère} fois par Walsh (1955). La SAA étudie les absorptions de lumière par l'atome libre. C'est une des principales techniques mettant en jeu la spectroscopie atomique dans le domaine UV-visible utilisée en analyse chimique. Elle permet de doser une soixantaine d'éléments chimiques (métaux et non-métaux). Les applications sont nombreuses étant donné qu'on atteint

couramment des concentrations inférieures au mg/L (PPm). Cependant, on peut noter un certain nombre de limites :

- Pour des raisons technologiques, certains éléments ne peuvent être analysés.
- L'existence parfois d'interférences chimiques sévères.
- L'aspect non qualitatif de la technique impose la connaissance des éléments à doser afin de choisir la source adaptée.
- Ne permet pas l'analyse simultanée d'éléments.
- Nécessité d'avoir des concentrations assez faibles (afin de respecter le domaine de linéarité de la loi de Beer-Lambert) [11].

Le spectromètre utilisé dans ce travail est représenté sur la figure est de la marque Perkin Elmer AA400.



Figure III.9 : Spectroscopie d'absorption atomique de la marque Perkin Elmer AA400

III.5. Matériels de caractérisation morphologique et structurale

Les caractéristiques morphologiques et structurales de l'électrode de graphène ont été observées à l'aide d'un microscope à balayage électronique (MEB) et d'une spectroscopie de rayons X à dispersion en énergie (EDX).

III.5.1. Microscopie électronique à balayage

Microscopie électronique à balayage (MEB) en anglais, « *Scanning Electron Microscopy* » (*SEM*) est une technique puissante d'observation utilisée pour obtenir des images de la surface de l'échantillon [12].

Le principe du MEB consiste en un faisceau d'électrons balayant la surface de l'échantillon à analyser qui, en réponse, réémet certaines longueurs d'ondes issues de l'interaction électrons-matière qui sont analysées par différents détecteurs permettant ainsi de

reconstruire une image virtuelle de l'objet observé par MEB en trois dimensions de la surface [13].

Ce sont les électrons secondaires émis et rétrodiffusés qui permettent de reconstituer l'image de l'objet. L'image est alors obtenue grâce aux électrons transmis et diffractés, les électrons adsorbés déterminent le contraste d'amplitude de l'image [14].

Les images ont été réalisées dans ce travail avec un microscope haute résolution de marque JEOL. JSM – IT. 100, une photographie de ce MEB est représentée sur la figure III.10



Figure III.10 : Microscope électronique à balayage JEOL. JSM – 7500F

III.5. 2. Spectroscopie de rayons X à dispersion en énergie (EDX)

La spectroscopie dispersive en énergie, (ou EDX : Energy Dispersive X-ray) est une technique qui permet de déterminer la composition et la distribution des différents éléments atomiques composant l'échantillon analysé. Une analyse élémentaire peut être effectuée en un point précis ou en moyenne sur une surface, de constituer un profil de concentrations, ou de réaliser la cartographie élémentaire d'une surface. Cette technique est basée sur les réactions d'ionisation des atomes de l'échantillon lorsqu'il est soumis au bombardement électronique (les interactions inélastiques). La structure de l'atome est constituée de niveaux électroniques d'énergie discrète, appelées couches (K, L, M, etc...) et sous couches (L1, L2, L3, etc...). K est le niveau électronique de cœur, le plus profond et le plus lié au noyau.

Cette technique de caractérisation est largement utilisée étant donné que l'émission de photons X constitue la majeure partie des signaux émis lorsqu'un échantillon est soumis à un

bombardement électronique. Ces photons X qui donnent des informations chimiques qualitatives et quantitatives de l'atome cible sont ensuite collectés pour la détermination des éléments présents dans la zone analysée. La largeur d'un spectre allant des raies provenant des éléments les plus légers aux plus lourds. L'hydrogène n'étant pas détectable en EDX [15-18]. Cette méthode comporte certaines limites dans l'analyse élémentaire. Tout d'abord, la spectrométrie à rayons X détecte les éléments et n'est pas capable de faire la distinction entre les espèces ioniques et non ioniques.

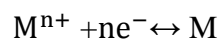
De plus, dans le cas de l'EDX, il est nécessaire que tous les échantillons soient analysés sous un vide relatif, ce qui a évidemment de sérieuses implications pour la préparation des spécimens, car les électrons et les rayons X sont fortement absorbés par les molécules d'air. En général, la détection des rayons X n'est pas influencée par l'état chimique des éléments, mais elle est influencée par l'interférence inter-éléments, connue en spectrométrie des rayons X sous le nom de " peak over lap ", ce qui entraîne de sérieux problèmes dans l'analyse élémentaire. Par conséquent, il est possible de détecter les éléments dont le numéro atomique est supérieur à 10. La concentration élémentaire minimale détectable est d'environ 0,1 mmol par kg de spécimen sec (c'est-à-dire 10 ppm), alors que la résolution spatiale va d'environ 10 nm à quelques micromètres [19].

III.6. Techniques d'élimination utilisées

III.6.1. Electrodeposition

L'électrodeposition de métaux est une technique appréciée dans l'industrie en raison de sa facilité de mise en œuvre et surtout en raison de son faible coût. Ces deux avantages la distinguent d'autres méthodes concurrentes comme le dépôt chimique ou les techniques de dépôt en phase gazeuse (PVD Physical Vapor Deposition ou CVD Chemical Vapor Deposition).

Les métaux (M) sont déposés électrochimiquement par réduction d'un ion métallique (M^{n+}) à la surface d'un substrat conducteur [20].



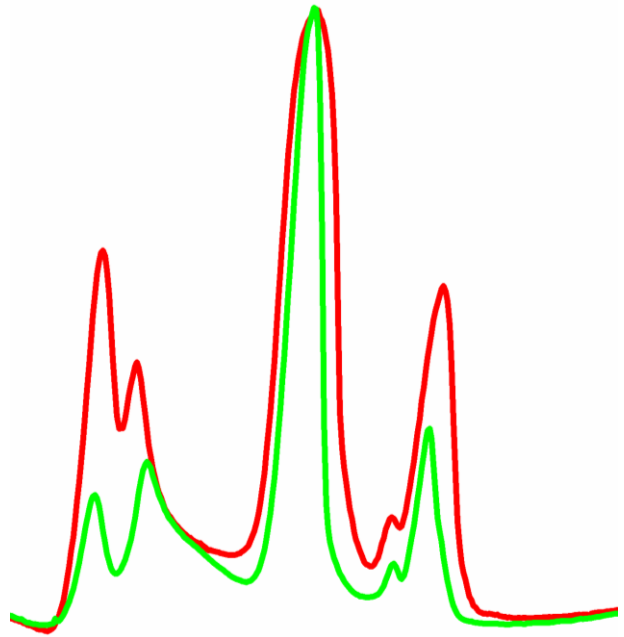
Conclusion

Dans ce chapitre, le matériel et les techniques expérimentales d'analyse et les méthodes utilisés pour l'élimination dans la partie expérimentale de ce travail ont été présentés.

Références bibliographiques

- [1] Bhargav D, Mansuriya, Altintas Z. Screen-printed electrochemical sensor platforms. Vol. 146, January 2021, 106272 ; 2023.
- [2]<https://www.medicalexpo.fr/prod/scilogex/product-104235-675883.html>. Consulté le 29/04/2024.
- [3]<https://www.memmert.com/fr/produit/etuvesetuves%20desechage/etuveuniverselle/#!filters=%7B%7D,%20C>. Consulté le 30/04/2024.
- [4]<https://tjfu.eu/prestations-industrielles/procedes-maitrises/nettoyage-a-ultrasons/>. Consulté le 31/04/2024.
- [5] Abbes S, Betihi B. Préparation et caractérisation d'un catalyseur supporté [Mémoire de Master]. [Université 8 Mai 1945 Guelma] ; 2022.
- [6] Rafaïdeen T. Étude de l'activation électro-catalytique de composés issus de la biomasse [Thèse]. [Université de Poitiers] ; 2019.
- [7] Sbartaï A. Conception et développement de nouveaux microcapteurs chimiques pour la détection des métaux lourds dans les eaux [Thèse]. [Université D'Annaba Et De l'Université Claude Bernard Lyon1] ; 2014.
- [8]<https://images.app.goo.gl/TShCALAHYUdSRAZX7>. Consulté le 01/05/2024.
- [9] Tennah F. Conception d'une nouvelle électrode modifiée à base de composite graphite-magnite en vue de la détection des métaux lourds à l'état de traces (plomb et cadmium) [Thèse]. [Université Ferhat Abbas -Sétif-1] ; 2018.
- [10]<https://www.researchgate.net/publication/235639908/figure/fig29/AS:667106018353159@1536061877456/voltammogramme-a-onde-carree.png> . Consulté le 03/05/2024.
- [11] Maghchiche. Spectrométries d'absorption et d'émission atomiques [Polycopie de cours]. [Université Batna 2].
- [12] Chelaghmia M L. Vieillessement et dégradation des matériaux [Polycopie de cours]. [Université 8 Mai 1945 Guelma] ; 2018.
- [13] Serge M F. Élaboration de procédés innovants pour l'électroanalyse et la dépollution d'eaux contaminées par des résidus médicamenteux (exemple du paracétamol) [Thèse]. [Université de Dschang] ; 2017.
- [14] Guemache A. Synthèse et propriétés électrochimique du système $\text{La}_{1-x}\text{M}_x\text{AlO}_3$ (Sr, Ca) [Thèse]. [Université de Mohamed Khider, Biskra] ; 2017.
- [15] Sérégé M. Développement d'une nouvelle technique d'analyse pour les nanostructures gravées par plasmas : (S)TEM EDX quasi in-situ [Thèse]. [Université Grenoble Alpes] ; 2017.
- [16] Puttichaem C. Scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy characterization of ultra-thin Diamond-like carbon film on magnetic recording head [Thèse]. [Thammasat University] ; 2021.

- [17] Chen Z, D'Alfonso AJ, Weyland M, Taplin DJ, Allen LJ, Findlay SD. Energy dispersive X-ray analysis on an absolute scale in scanning transmission electron microscopy. *Ultramicroscopy*. 157:21–6. 2015.
- [18] Sahli M. Synthèse, élaboration et caractérisation des nanocomposites à base de magnésium pour le stockage solide d'hydrogène [Thèse]. [Université des frères Mentouri de Constantine]; 2015.
- [19] Scimeca M, Bischetti S, Lamsira H K, Bonfiglio R, Bonanno E. Energy Dispersive X-ray (EDX) microanalysis: A powerful tool in biomedical research and diagnosis. *Eur J Histochem*. 2018 15.
- [20] Chelaghmia M L. Elaboration et caractérisation d'electrocatalyseurs pour l'oxydation anodique des alcools [Thèse]. [Université 8 Mai 1945 Guelma] ; 2013.



CHAPITRE IV :
Résultats et discussions

Dans ce chapitre, nous présentons les caractéristiques structurales et morphologiques, ainsi que les propriétés électrochimiques du capteur utilisé. Nous analysons la qualité des eaux usées en utilisant des méthodes électrochimiques ainsi que l'absorption atomique et démontrons l'efficacité de la technique d'électrodéposition pour l'élimination des métaux lourds présents dans ces eaux.

IV.1 Caractérisation structurale et morphologique des matériaux d'électrode en graphène

IV.1.1 Analyses Morphologique par MEB

Un microscope à balayage électronique (MEB) a été utilisé pour la caractérisation morphologique de la surface de l'électrode de graphène utilisée dans l'investigation électrochimique (Fig. IV.1).

Comme le montre la figure IV.1, la surface du graphène était presque plate et composée principalement de grandes irrégularités.

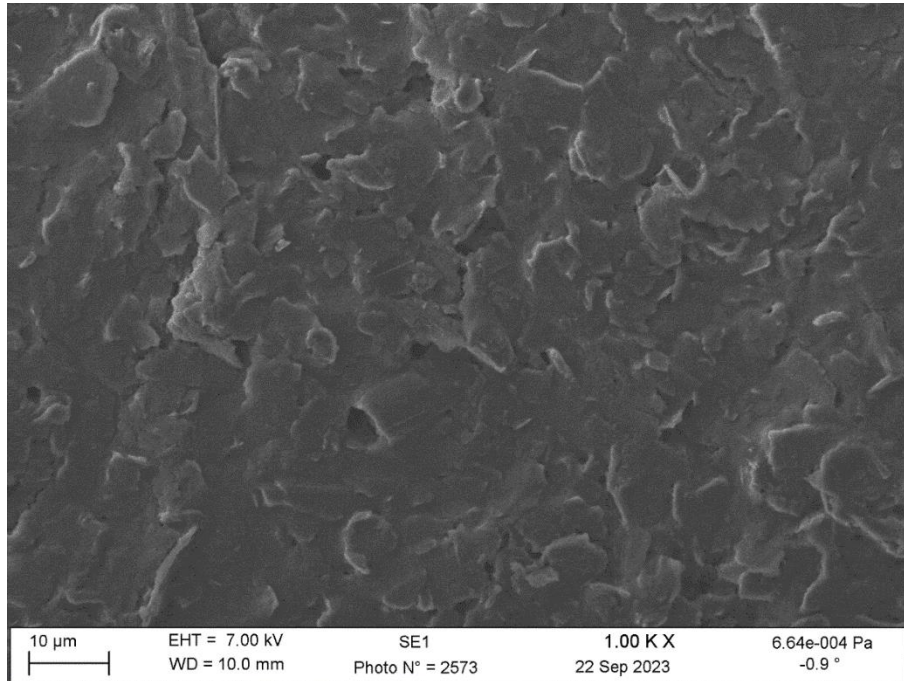


Figure IV.1 : Image MEB obtenue sur l'électrode de Graphène

L'architecture en deux dimensions (2D) de cette électrode donne lieu à une grande surface sur laquelle des réactions électrochimiques peuvent se produire, faisant du graphène un matériau très attractif pour diverses applications.

IV.1.2 Analyses chimique élémentaire par EDX

Pour confirmer la structure en graphène et déterminer la quantité et la qualité des différents éléments atomiques qui composent le capteur utilisé, l'analyse par rayons X à dispersion d'énergie (EDX), a été effectuée. Comme le montre la figure IV.2, les spectres EDX révèlent la présence des éléments carbone, oxygène et chlore avec un pourcentage massique de 95,3 %, 2,45 % et 2,25 %, respectivement. La forte présence de carbone montre que presque toute la totalité de la surface du capteur est en carbone.

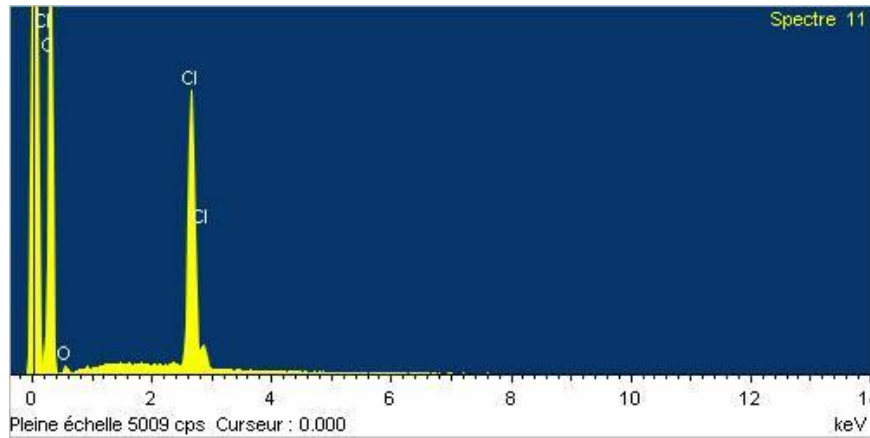


Figure IV.2 : Spectre EDX du capteur utilisé

IV.2 Étude électrochimique

IV.2.1 Étude voltampérométrique du couple $[\text{Fe}(\text{CN}_6)]^{-3}/[\text{Fe}(\text{CN}_6)]^{-4}$ sur le graphène

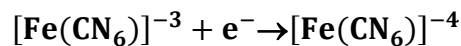
Pour étudier la possibilité d'utiliser une électrode de graphène comme une électrode indicatrice, nous avons choisi le couple $[\text{Fe}(\text{CN}_6)]^{-3}/[\text{Fe}(\text{CN}_6)]^{-4}$, généralement utilisé comme un couple de test vu son comportement réversible et son transfert de charge très simple.

Afin d'évaluer l'adéquation d'une électrode en graphène en tant qu'électrode indicatrice, nous avons sélectionné le couple $[\text{Fe}(\text{CN}_6)]^{-3}/[\text{Fe}(\text{CN}_6)]^{-4}$, couramment utilisé comme son comportement réversible et son transfert de charge simple le justifient. Un voltampérogramme obtenu sur graphène à partir d'une solution contenant ce couple rédox est présenté dans la figure IV.3.

Deux pics sont observés : le premier en direction anodique et le second en direction cathodique. Le pic anodique correspond à l'oxydation suivante :



Alors que le pic cathodique correspond à la réaction de réduction suivante :



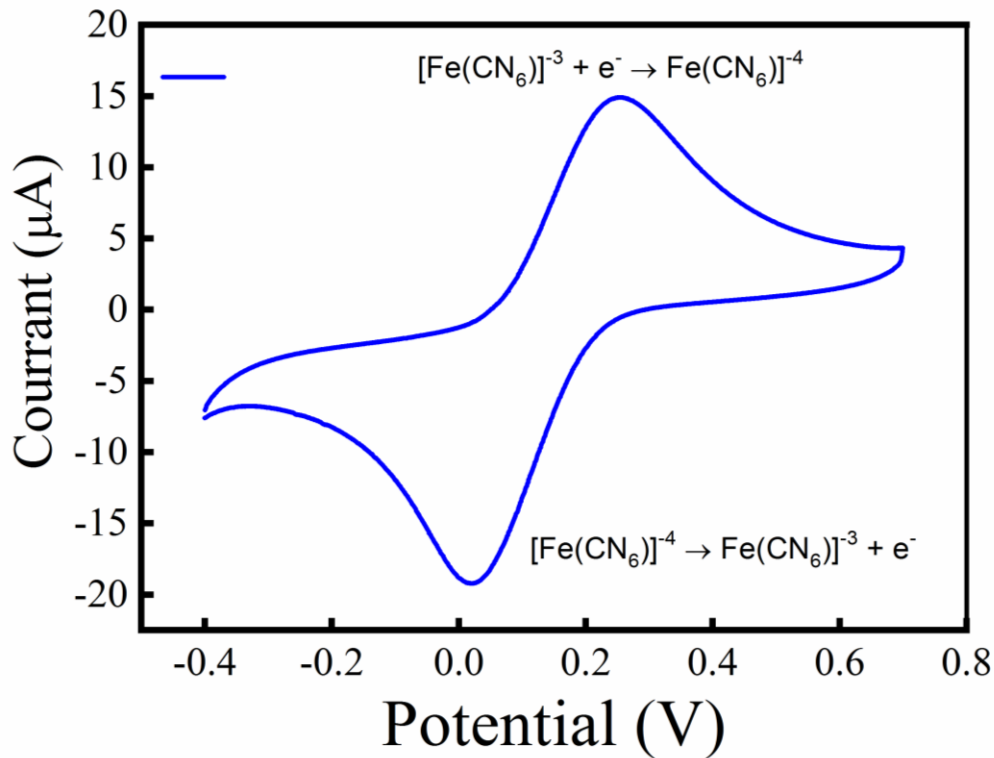


Figure VI.3: Voltampérométrie relative à l'oxydoréduction des ions $[\text{Fe}(\text{CN}_6)]^{-3} / [\text{Fe}(\text{CN}_6)]^{-4}$ obtenu sur une électrode de graphène

Il est également à noter que la différence de potentiel entre les pics anodique et cathodique (ΔE_p) est de 120 mV. Il est connu que des valeurs plus basses de ΔE_p correspondent à une vitesse de transfert d'électrons plus élevée. Les faibles valeurs de ΔE_p et les densités de courant élevées obtenues démontrent les propriétés électrochimiques prometteuses du graphène. Cela peut être attribué à la structure bidimensionnelle du graphène, qui offre une grande surface électro-active.

IV.2.2 Analyses avec la voltamétrie cyclique

Nous avons tout d'abord réalisé une étude voltampérométrique avec une solution contenant du Cd(II) à forte concentration (200 PPb). Les manipulations sont réalisées avec des solutions tampon d'acétate 0,1 mol. L⁻¹ (pH = 4,7).

Un premier voltampérométrie (figure IV.4) tracé entre -1.6 V et 0.7 V dans la solution électrolytique ABS 0,1 mol. L⁻¹, permet d'observer le domaine d'électroactivité du solvant, délimité par l'oxydation et la réduction de l'eau sur l'électrode de graphène. Lorsqu'un ajout de 200 PPb de Cd(II) est réalisé, on observe l'apparition de deux pics :

Un pic d'oxydation vers 0.62 V, associé au pic de réduction à -1.3 V lors du balayage retour.

Le pic de réduction observé vers -1.3 V est associé à la réduction du Cd(II) en Cd métallique. Inversement, l'oxydation présente à 0.62 V est attribuée à la réoxydation du Cd métallique précédemment déposé en Cd(II). La réaction redox mis en jeu ici est la suivante :

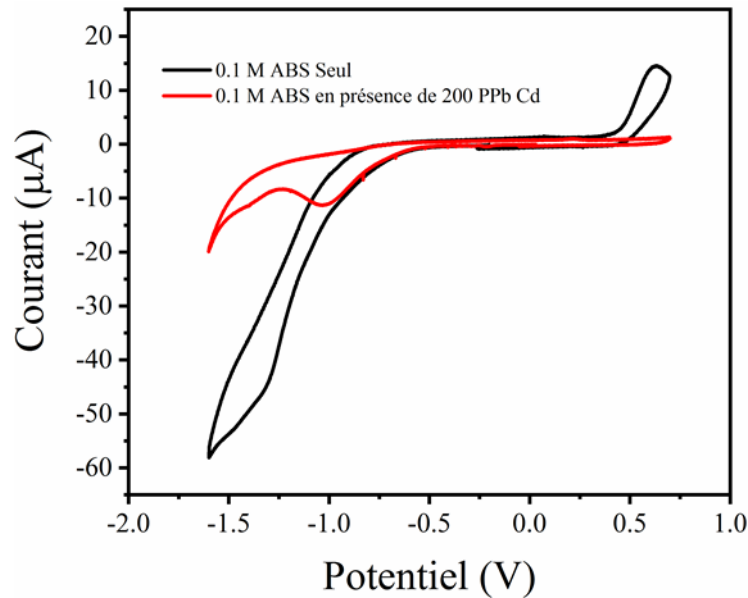
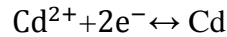
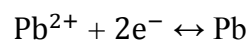


Figure VI.4 : Voltampérogrammes obtenus en absence (noir) et en présence (rouge) des cations de Cadmium

L'analyse de Pb^{2+} par VC est réalisée avec la même procédure que celles utilisées pour le Cd^{2+} . Le même électrolyte support a été choisi pour l'étude de détection du $\text{Pb}(\text{II})$. La figure IV.5 présente les voltammogrammes cycliques tracés dans solution acide nitrique 0.1 M en absence et en présence de 200 PPb de $\text{Pb}(\text{II})$. Lors du balayage retour vers la borne anodique (-0.66 V), nous observons clairement qu'en présence 200PPb de $\text{Pb}(\text{II})$ l'apparition d'un pic anodique lorsque le Pb est ajouté. Ce pic correspond à l'oxydation du plomb déposé à partir de -0.7 V lors du balayage allé vers la borne cathodique. La réaction redox mis en jeu ici est la suivante :



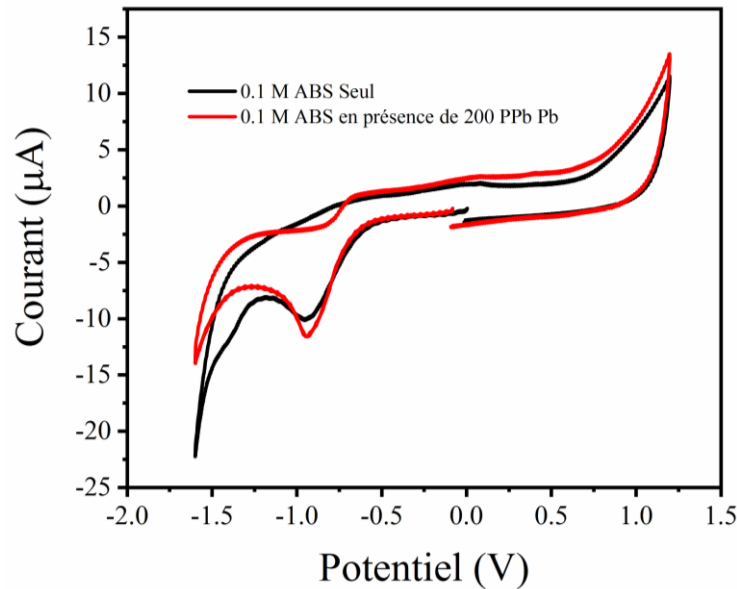


Figure VI.5 : Voltampérogrammes obtenus en absence (noir) et en présence (rouge) des cations de Plomb

Le voltampérogramme de mercure montrent deux pics, un premier pic apparaît vers -0.68 V dans la direction cathodique correspond à la réduction des ions Hg(II), tandis que le pic qui apparaît vers le potentiel 0.049 V correspond à la réoxydation Hg déposé lors du balayage cathodique. La réaction redox mis en jeu ici est la suivante :

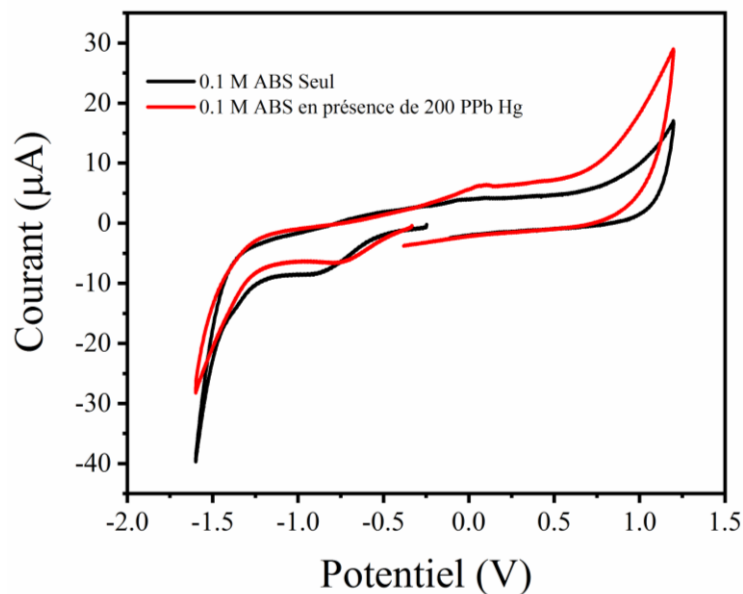
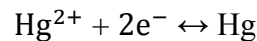


Figure VI.6 : Voltampérogrammes obtenus en absence (noir) et en présence (rouge) des cations de Mercure

Le comportement électrochimique du cuivre révèle deux pics distincts lors de la voltammétrie cyclique. Le premier pic, observé à environ -1.2 V dans la direction cathodique,

correspond à la réduction des ions Cu^{2+} , tandis que le pic suivant, vers -0.55 V , est attribué à la réoxydation du cuivre déposé précédemment lors du balayage cathodique. Cette réaction redox peut être représentée comme suit :

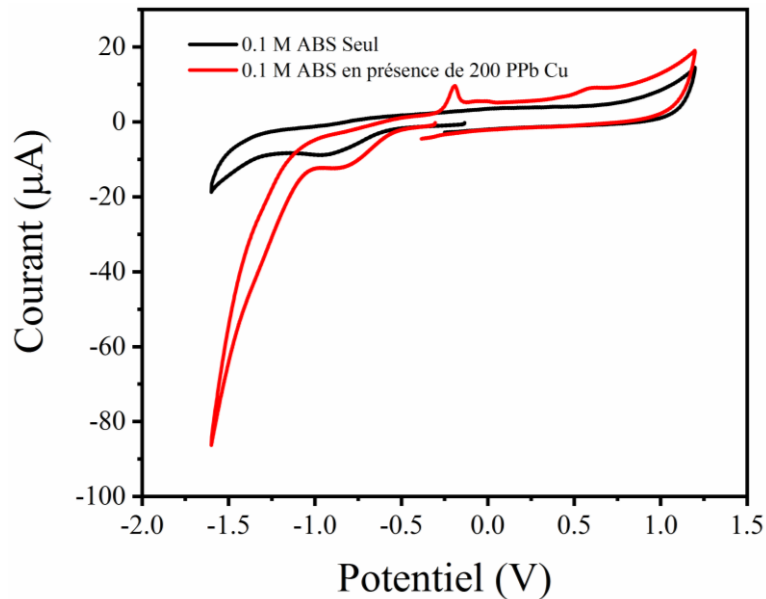
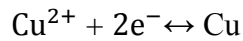


Figure VI.7 : Voltampérogrammes obtenus en absence (noir) et en présence (rouge) des cations de cuivre

IV.2.3 Analyses électrochimique par la voltamétrie à onde carrée (SWV)

Dans les milieux réels, les cations métalliques de Cd^{2+} , Pb^{2+} , Hg^{2+} et de Cu^{2+} peuvent exister à des teneurs très faibles qui ne peuvent pas être atteintes par des méthodes voltammétriques à balayage linéaire des potentiels.

Pour satisfaire les exigences de mesure, des méthodes électrochimiques impulsionnelles sont utilisées, connues pour améliorer la sensibilité des mesures.

Nous avons utilisé la voltamétrie à onde carrée. La figure IV.8 montre les voltampérogrammes impulsionnels à ondes carrées obtenus dans une solution tampon d'acétate 0.1 M , avec et sans l'ajout de 100 PPB des cations de Cd^{2+} , Pb^{2+} , Hg^{2+} et de Cu^{2+} sur une électrode de graphène.

Les figures IV.8 a, b, c et d montrent qu'aucun pic mesurable n'a été observé avant l'addition des cations métalliques. Cependant, dans les mêmes conditions, un pic anodique clair est apparu à -1.05 V , -0.79 V , 0.08 V et -0.13 V avec une densité de courant respective de 32.1 mA , 7.53 mA , 0.2142 mA et 39.75 mA après l'addition des cations de Cd^{2+} , Pb^{2+} , Hg^{2+} et de

Cu^{2+} respectivement. Ces pics correspondent à la réoxydation des métaux (Cd, Pb, Hg et Cu) précédemment déposés sur l'électrode de graphène.

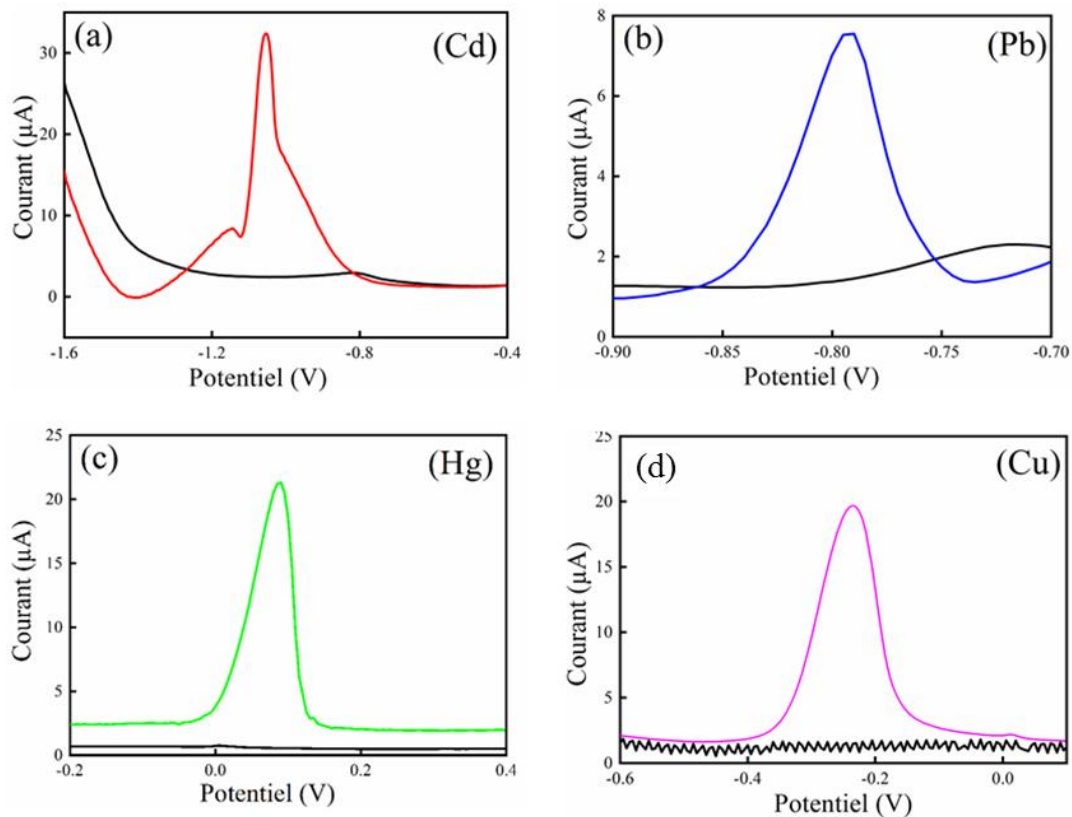


Figure VI.8 : voltampérogrammes impulsifs à ondes carrées obtenus dans une solution tampon d'acétate 0.1 M, avec et sans l'ajout de 100 μM . L^{-1} des cations de Cd^{2+} , Pb^{2+} , Hg^{2+} et Cu^{2+}

Ces valeurs de courant sont plus importantes que celles récupérées en voltampérométrie cyclique, et la SWV est choisie comme méthode électrochimique de dosage des métaux pour la suite de l'étude.

IV.2.4 Dosage par la voltamétrie à onde carrée

Nous avons également étudié la possibilité et la fiabilité d'utiliser cette technique impulsienne dans le dosage des métaux lourds par le suivi de l'évolution des voltampérogrammes à ondes carrées en fonction de la concentration des cations métallique de Cd^{2+} , Pb^{2+} , Hg^{2+} et de Cu^{2+} . Les voltampérogrammes à ondes carrées sont présentés sur les figure IV.9a, b, c et d.

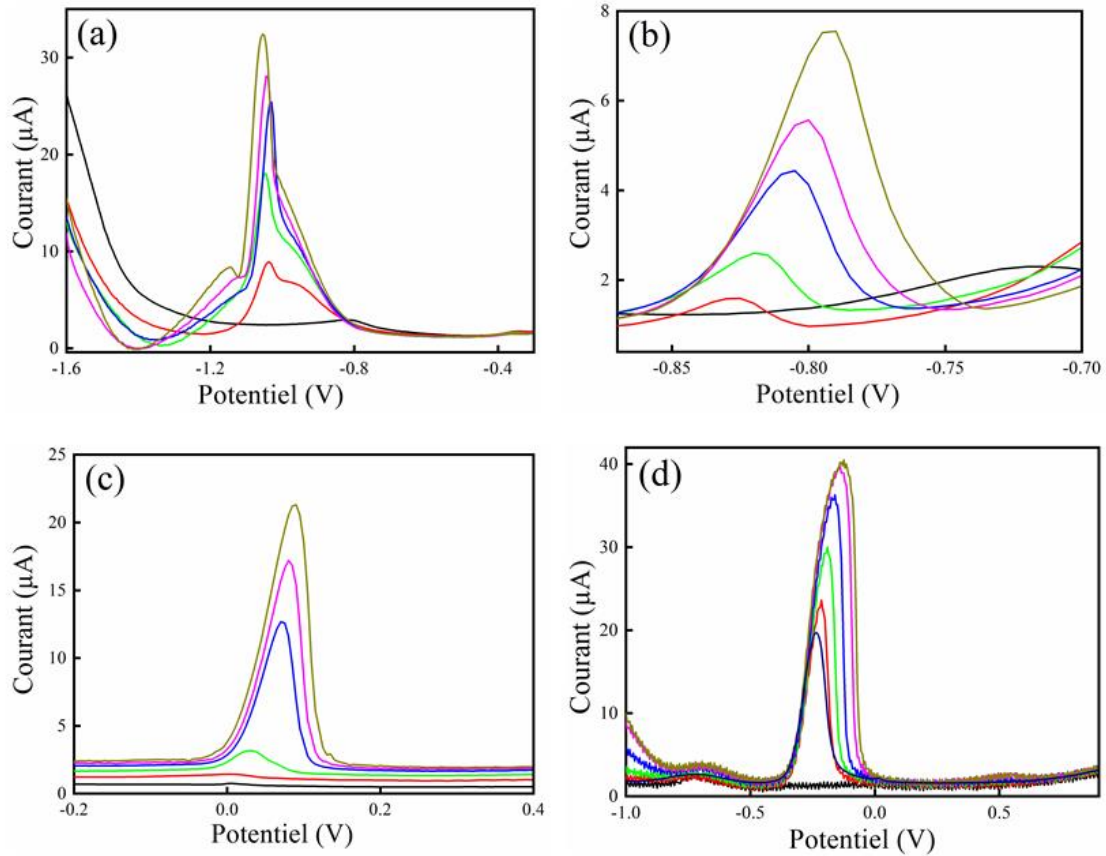


Figure VI.9: Voltampérométries à ondes carrées en fonction de la concentration des cations métalliques de Cd^{2+} , Pb^{2+} , Hg^{2+} et Cu^{2+}

Nous observons sur la figure VI.10 que les courbes d'étalonnage du courant de pic de redissolution en fonction de la concentration sont augmentées linéairement dans les plages de 0.02 à 0.1 mg/L, pour le Cd (Fig.VI.10a), Pb(Fig.VI.10b) et Cu(Fig.VI.10d). Les équations de régression linéaire sont :

$$I_p (\mu\text{A}) = 285,25 [\text{Cd}^{2+}] (\text{mg/L}) + 5,489 (\mu\text{A}) ;$$

$$I_p (\mu\text{A}) = 74.6 [\text{Pb}^{2+}] (\text{mg/L}) - 0.134 (\mu\text{A}) ;$$

$$I_p (\mu\text{A}) = 265,95 [\text{Cu}^{2+}] (\text{mg/L}) + 13.983 (\mu\text{A}).$$

Tandis que pour Hg^{2+} (Fig.VI.10c) la courbe d'étalonnage est linéaire dans une plage allant de 0.02 à 0.35 mg/L avec une équation de régression linéaire :

$$I_p (\mu\text{A}) = 66.082 [\text{Hg}^{2+}] (\text{mg/L}) - 0.4484 (\mu\text{A})$$

La plus grande sensibilité observée pour le cuivre peut être due à une plus grande affinité du graphène pour les Cu^{2+} .

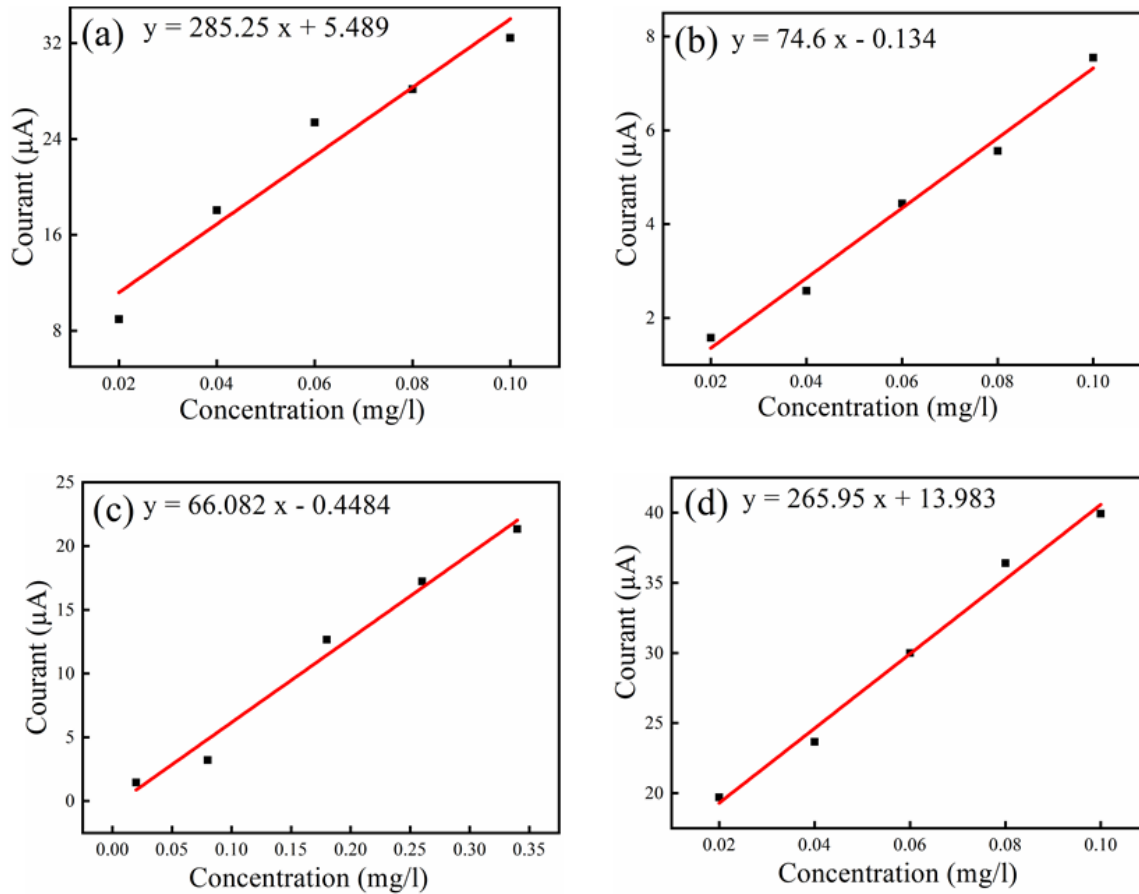


Figure VI.10: Courbe d'étalonnage du courant de pic de redissolution en fonction de la concentration des cations métalliques

Enfin, nous avons testé cette technique électrochimique sur des échantillons réels prélevés à l'entrée et à la sortie de la station d'épuration (STEP). Les résultats obtenus montrent qu'aucun pic mesurable correspondant à la réoxydation des ions métalliques n'a été observé, comme le montrent la figure IV.11. Cela pourrait être dû à l'absence de rejets contaminés par des métaux le jour des prélèvements.

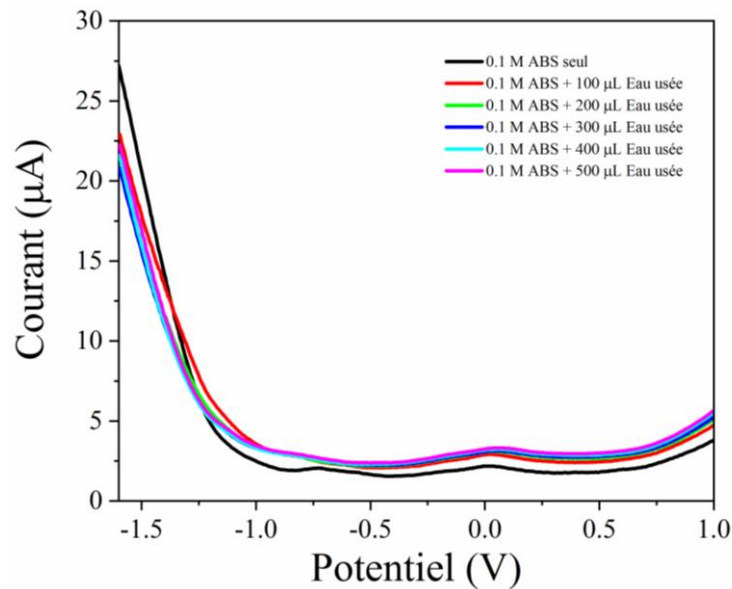


Figure VI.11: Voltampérogrammes à ondes carrée en fonction de la concentration des échantillons réels des eaux usées

Nous avons ensuite introduit des traces de métaux lourds (200 PPb de chaque élément) dans ces eaux pour tester l'efficacité de cette technique de capteurs électrochimiques. L'objectif était de valider la capacité de ces capteurs à détecter rapidement et précocement la présence de métaux lourds, particulièrement dans le cas de contamination de l'eau par des rejets métalliques, compte tenu de la dangerosité extrême de ces substances.

Nous avons observé que, dans les mêmes conditions, des pics anodiques clairs sont apparus à 17 mV, 19 mV, 10 mV et 32 mV, avec des densités de courant respectives de 0,15 mA, 0,10 mA, 0,11 mA et 0,03 mA. Ces pics correspondent respectivement à la réoxydation des métaux Cd, Pb, Cu et Hg. Cela démontre l'efficacité de l'utilisation des capteurs électrochimique pour la détection des métaux lourds dans les eaux usées.

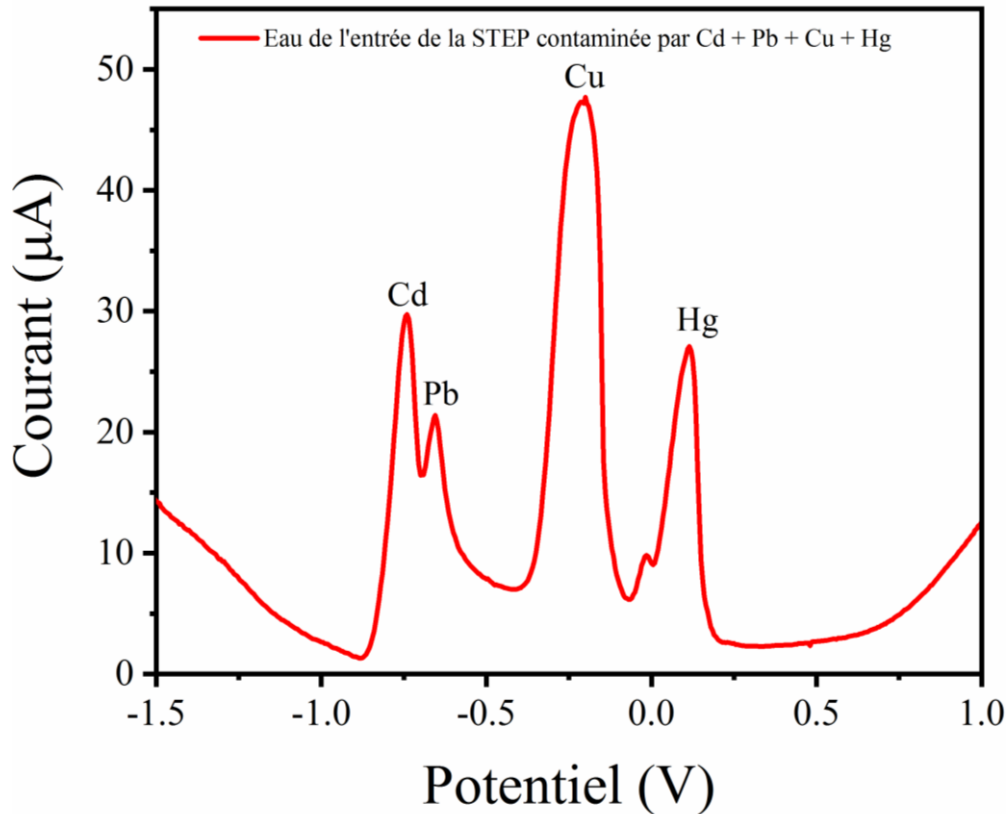


Figure IV.12: Voltammogrammes à ondes carrées obtenus dans des échantillons réels prélevés à l'entrée de la station d'épuration (STEP) contaminés par 200 PPb.

Enfin pour l'élimination des métaux lourds dans les eaux usées, une différence de potentiel de 2.5 V pendant 30 min est appliquée entre l'électrode de travail en graphite et la contre-électrode en graphite aussi à l'aide d'une alimentation électrique ou d'un potentiostat. Cela crée un courant électrique qui permet ainsi de concentrer les métaux lourds indésirables de la solution électrolytique vers l'électrode de travail, où ils se réduisent et se déposent sous forme de matériau solide qui peut ensuite être récupéré et éliminé de manière appropriée, contribuant ainsi à réduire leur présence dans l'environnement et à limiter leurs effets néfastes sur la santé et les écosystèmes.

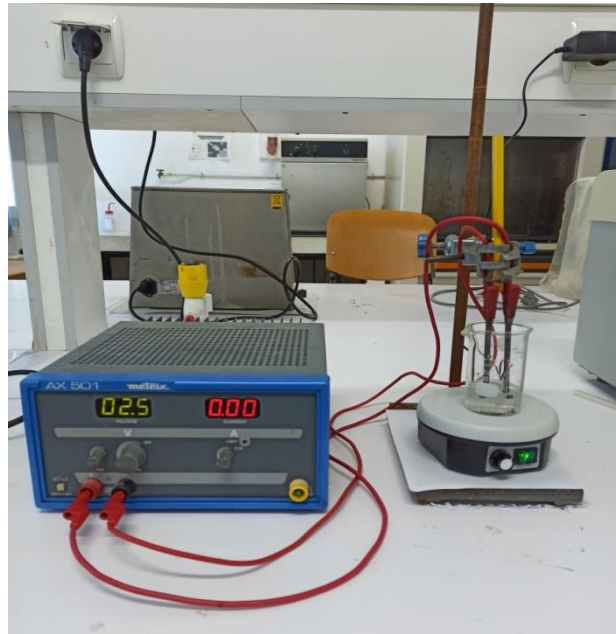


Figure IV.13 : Alimentation électrique utilisée pour élimine les métaux lourds par l'électrodéposition

Nous avons ensuite analysé par notre capteur l'effet de l'élimination des métaux lourds par électrodéposition sur un échantillon en utilisant la technique de voltampérométrie à a onde carrée. L'analyse a été réalisée avant et après l'application de l'électrodéposition.

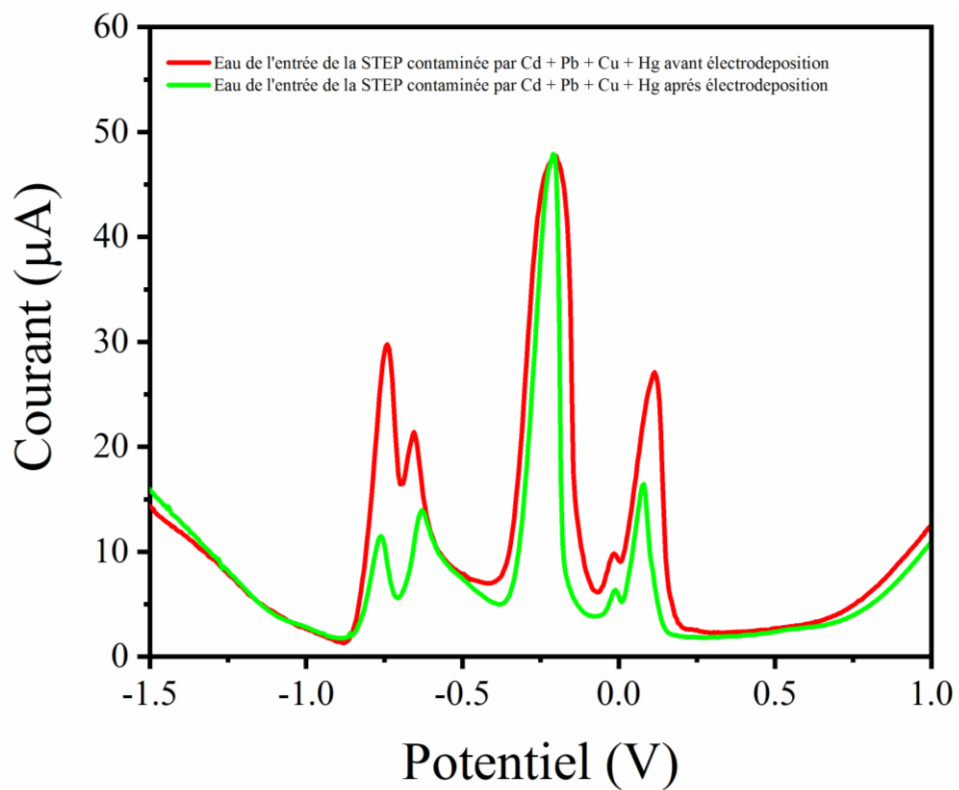


Figure VI.14 : l'élimination des métaux lourds par électrodéposition sur un échantillon en utilisant la technique de voltampérométrie à a onde carrée

Nous pouvons observer sur la figure VI.14 d'après l'application de l'électrodéposition, la densité de courant des pics d'oxydation diminue respectivement de 58 %, 40%, 1 % et 51 % pour les ions Cd^{2+} , Pb^{2+} , Cu^{2+} et Hg^{2+} . Ces résultats démontrent l'efficacité de cette technique d'élimination sur l'amélioration de la qualité des eaux contaminées, indiquant une réduction significative de la concentration des métaux lourds après traitement.

IV.2.5. Analyses électrochimique par l'absorption atomique

Nous avons également utilisé la technique de l'absorption atomique (AAS) pour analyser une éventuelle présence du cadmium, le cuivre et chrome dans des échantillons réels (fig. VI.15).



Figure VI.15 : Spectroscopie d'absorption atomique de la marque Perkin Elmer AA400

Les résultats d'analyse des échantillons réels ont été répertoriés dans le tableau IV.1. D'après ces résultats, nous observons qu'il y a un très bon accord entre les résultats obtenus par voltampérométrie impulsionnelle et les résultats obtenus par AAS pour le cuivre. Cependant l'AAS montre la présence Cd^{2+} dans l'eau d'entrée de la STEP contrairement au SWV. Ceci est dû à la sensibilité très élevée de l'AAS pour le Cd^{2+} . L'AAS montre également la présence d'une très petite quantité de Cr^{3+} .

Tableau IV.1 Résultats d'analyse des échantillons pharmaceutiques commerciaux

Échantillon	Les métaux lourds	Analyse par AAS $\mu\text{g/l}$
L'eaux d'entrées	Cd^{2+}	205
	Cu^{2+}	-
	Cr^{+3}	21
L'eaux d'sorties	Cd^{2+}	8
	Cu^{2+}	-
	Cr^{+3}	19

VI .4. Conclusion

Les résultats obtenus dans ce chapitre démontrent que l'électrode de graphène présente une excellente activité catalytique pour l'analyse qualitative et quantitative des métaux lourds.

L'utilisation de la voltampérométrie impulsionnelle comme méthode de dosage électrochimique a permis d'atteindre des performances supérieures par rapport à la voltampérométrie cyclique.

Les résultats obtenus ont également démontré que l'électrodéposition est une méthode précise et efficace, permettant de récupérer les métaux lourds à des concentrations très faibles.

Conclusion général



Conclusion général

Les stations d'épuration des eaux usées jouent un rôle crucial dans la protection de l'environnement et de la santé publique. Leur mission principale est de traiter les eaux usées provenant des foyers, des industries et des activités agricoles avant de les rejeter dans les milieux naturels. Ces installations utilisent diverses méthodes d'analyse, telles que la spectrométrie et la chromatographie, pour surveiller et optimiser le traitement de l'eau.

Ces techniques permettent de détecter et quantifier les micropolluants, y compris les métaux lourds et les composés organiques persistants, assurant que l'eau traitée respecte les normes environnementales avant son rejet.

Cependant, ces méthodes sont souvent complexes, coûteuses, volumineuses et difficiles à mettre en œuvre.

Les travaux réalisés dans le cadre de ce mémoire de master visaient à utiliser des capteurs sérigraphiés en graphène, sensibles et sélectifs, pour la détection de micropolluants métalliques dans les eaux usées de la station d'épuration de Guelma.

Dans ce travail, nous avons utilisé des techniques voltampérométriques sur des capteurs en graphène pour la détection de Cd^{2+} , Pb^{2+} , Hg^{2+} et Cu^{2+} . L'utilisation de la voltampérométrie cyclique nous a permis d'identifier les pics d'oxydation du cadmium, du plomb, du mercure et du cuivre sur le capteur en graphène.

La voltampérométrie impulsionnelle a également été utilisée pour la détection et la détermination de ces cations métalliques. Les résultats montrent que le capteur en graphène présente une bonne activité catalytique pour l'analyse qualitative et quantitative des métaux lourds. L'utilisation de la voltampérométrie impulsionnelle comme méthode de dosage électrochimique a permis d'atteindre de meilleures performances par rapport à la voltampérométrie cyclique.

Pour l'élimination de ces métaux lourds des eaux usées, l'électrodéposition est utilisée. Ce processus électrochimique implique l'application d'un courant électrique pour réduire les ions métalliques dissous et les déposer sous forme solide sur une électrode. Les résultats obtenus montrent que l'électrodéposition offre une grande précision et efficacité, permettant de récupérer les métaux lourds à des concentrations très faibles tout en minimisant les déchets secondaires. De plus, les métaux récupérés peuvent être recyclés et réutilisés, contribuant ainsi à une gestion plus durable des ressources.

Des travaux complémentaires sont nécessaires pour confirmer les concepts et résultats de cette étude.