

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département du Génie de l'environnement

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Science et Génie de l'environnement

Spécialité : Génie de procédés de l'environnement

Par

- **Bouktir Souaad**
- **Guerna Dalila**

Intitulé

Etude de l'effet des paramètres du traitement de l'eau polluée par méthode électrochimique

Soutenu le : 29/06/2022

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
Mr. Messis	MCA	Président	Univ-BBA
Mme. Faid Hayette	MCA	Encadreur	Univ-BBA
Mme. Maghraoui	MAA	Examineur	Univ-BBA

Année Universitaire 2021/2022

REMERCIEMENTS

Remerciements

Au nom d'Allah le plus grand merci lui revient de

Nous avoir guidés vers le droit chemin, de nous avoir aidées

Tout au long de nos années d'étude.

Nous adressons notre profond remerciement

A Mme Faïd Hayat notre encadreur qui nous a aidés.

Ainsi, nous adressons nos remerciements les plus

Chaleureux à toutes les personnes qui ont aidé de

Près ou de loin par le fruit de leur connaissance pendant

Toute la durée de notre parcours éducatif.

DÉDICATIONS

Je dédie ce travail à :

*Ce qui sont les plus chers au monde, mes parents, aux quels je
N'arriverai jamais à exprimer ma gratitude et ma reconnaissance,
Pour leurs amours, leur soutiens tout au long de mes études.*

A mes frères.

A mes sœurs.

A mes collègues et mes amis.

A toutes la famille.

A tous ceux qui me sont chers.

Souaad & Dalila.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Synthèse Bibliographique.	2
I.1.La pollution	2
I.1.1. introduction	2
I.1.2. histoire de la pollution	2
I.1.3. Origine de la pollution	3
I.2. Les différents types de pollution	3
I.2.1. Pollution de l'air	3
I.2.2. Pollution de sol	4
I.2.3. Pollution chimique	4
I.2.4. Pollution de l'eau	5
I.2.4.1. Définition des eaux usées	5
I.2.4.2.Origine et nature des eaux usées	5
I.2.4.3. Les principaux polluants de l'eau	5
I.3. Les type de traitement de l'eau polluée	6
I.3.1. Les principaux procédés de traitement physique	6
I.3.2. Les principaux procédés de traitement chimique	7
I.3.3. Les principaux procédés de traitement biologique	7
I.3.4. Les procédés de traitement physico-chimique	7
I.3.5. Les procédés de traitements électrochimiques	8
I.4. La technologie ou procédé électrochimique	9
I.4.1. Contexte historique et développement du procédé électrochimique	9
I.4.2. Principales réactions d'électrolyse	9
I.4.2.1. Principales lois de l'électrolyse	9
I.4.2.1.1. La loi de Faraday	10
I.5. Electrocoagulation	10
I.5.1. Introduction	10
I.5.2.Théorie de l'électrocoagulation	11
I.5.3. Origine et évolution du procédé d'électrocoagulation(EC)	11
I.5.4. Les réactions de l'électrocoagulation	11
I.5.5. Avantages et inconvénients du procédé électrocoagulation	12
I.5.6. Application du procédé d'électrocoagulation	13
I.5.7. Technologie du procédé d'électrocoagulation	13
I.6. La corrosion	13
I.6.1.Introduction	13

Sommaire

I.6.2. Généralités sur la Corrosion.....	14
I.6.2.1. Définition.....	14
I.6.3. Types de la corrosion.....	14
I.6.4. Rappels sur la Corrosion électrochimique.....	14
I.6.4.1. Définition.....	14
I.6.4.2. Les facteurs de corrosion.....	15
I.6.4.3. Morphologie de la corrosion.....	15
I.6.4.3.1. Corrosion généralisée.....	16
I.6.4.3.2. Corrosion localisée.....	16
I.6.4.4. Aspect thermodynamique de corrosion électrochimique.....	17
I.6.4.5. Phénomène de polarisation	20
I.7. Les aciers.....	23
I.7.1. Définition.....	23

Chapitre 2 : Techniques Expérimentales

II.1. Essai.....	24
II.1.1. Principe.....	24
II.1.2. Manipulation.....	25
II.1.2.1. Condition de travail.....	25
II.1.2.2. Préparation d'échantillon.....	25
II.1.2.3. Protocole	25
II.1.2.4. Matériel utilisé de travail	26
II.2. Conditions et technique électrochimique	26
II.2.1. Technique électrochimique.....	26
II.2.1.1. Les électrodes.....	27
II.2.2. Méthodes électrochimiques.....	28
II.3. Méthodes d'analyse.....	29
II.3.1. Mesures de la conductivité	30
II.3.1.1. Mesures de la conductivité de l'eau.....	30
II.3.1.2. La conductivité d'une solution.....	31
II.3.2. Mesure de la salinité.....	31
II.3.3. Mesure de la TDS.....	31
II.3.4. Mesure de la turbidité.....	31
II.3.4.1. La turbidité de l'eau.....	31

Sommaire

II.3.5. Mesure de PH	32
II.3.6. Mesure de DCO	33

Chapitre 3 : Résultats et Discussions

III.1. Traitement par électrocoagulation.....	34
III.1.1. Effet du temps d'électrocoagulation.....	35
III.1.2. Effet d'intensité du courant.....	38
III.2. Etude de la corrosion de l'acier dans l'eau traitée.....	38
III.2.1. Courbes de polarisation.....	39
III.2.1.1 Diagrammes d'impédance électrochimique.....	41
III.3. Détermination de la quantité d'électricité.....	42

Liste Des Figures

Chapitre I

Figure I.1 : Pollution aérienne aux états unis, 1973.....	2
Figure I.2 : Eau pollué dans station.....	7
Figure I.3 : Coagulation et floculation	8
Figure I.4 : (a) La distribution homogène des demi-réactions anodiques et cathodiques génère une corrosion uniforme. (b) La localisation d'une des demi-réactions anodique ou cathodique génère une corrosion localisée.....	15
Figure I.5 : Diagramme potentiel-pH simplifié du fer à 25°C (Conditions théoriques d'immunité et de passivation du fer à 25°C (pour $[Fe^{2+}] = [Fe^{3+}] = 10^{-6}$ mol/L).....	18
Figure I.6 : Suivi du potentiel –schéma.....	20
Figure I.7 : Densité de courant anodique et cathodique en valeur absolue et droites de Tafel d'une réaction d'électrode (échelle semi-logarithmique).....	21
Figure I.8 : Détermination de la résistance de polarisation.....	23

Chapitre II

Figure II.1 : Un dispositif expérimental d'un générateur de courant relié avec deux électrodes d'acier.....	24
Figure II.2 : La manipulation après l'agitation.....	26
Figure II.3 : Electrode de travail ET.....	27
Figure II.4 : Contre électrode.....	27
Figure II.5 : L'électrode de référence.....	28
Figure II.6 : Electrochimical impédance spectroscopy (EIS).....	28
Figure II.7 : Dispositif expérimental de cellule électrochimique.....	29
Figure II.8 : Un conductimètre.....	30
Figure II.9 : Turbidimètre.....	32
Figure II.10 : PH mètre.....	32
Figure II.11 : Spectrophotométrie.....	33

Chapitre III

Figure III.1 : Variation de la conductivité en fonction du temps.....	35
Figure III.2 : Variation de la turbidité en fonction du temps.....	36
Figure III.3 : Variation de TDS en fonction du temps.....	36
Figure III.4 : Variation de la salinité en fonction du temps.....	37
Figure III.5 : Variation de DCO en fonction du temps.....	37
Figure III.6 : Détermination des paramètres électrochimiques, courbes de Tafel (a) avant traitement, (b) après traitement, (c) courbe de polarisation (résistance de polarisation).....	40
Figure III.7 : Diagrammes d'impédance de l'acier obtenus dans l'eau a) avant traitement, b) après traitement.....	41

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I.1 : les facteurs de corrosion.....	15
-----------------------------------------------------	-----------

Chapitre III

Tableau III.1 : paramètres caractéristiques de l'eau de l'ONA.....	34
---------------------------------------------------------------------------	-----------

Tableau III.2 : Variation des paramètres physico-chimiques en fonction du temps d'électrolyse.....	35
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

Tableau III.3 : Paramètre après le traitement en fonction de l'intensité de courant.....	38
-------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

Tableau III.4 : Valeurs des paramètres électrochimiques déterminés à partir des courbes de Tafel.....	41
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

Tableau III.5 : Valeurs des paramètres électrochimiques obtenues par le fit des courbes d'impédance.....	42
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

Tableau III.6 : Calcul de la quantité d'électricité.....	42
-----------------------------------------------------------------	-----------

Tableau III.7 : regroupent les valeurs des différents paramètres.....	43
------------------------------------------------------------------------------	-----------

LISTE DES ABREVIATIONS

ONA : Office National d'Assainissement

EF: Electro-flotation

EO: Electro-Oxidation

EC: Electro coagulation

EA: Electro-adsorption

EF : Electro-Floculation

MES : Matière En Suspension

ET : Electrode de Travail

DCO : La demande chimique en oxygène

AEE : Agence européenne pour l'environnement

DBO : la demande biologique en oxygène

Introduction générale

Introduction Générale

Introduction

Les eaux usées chargées en matière organique doivent être traitées avant d'être rejetées dans l'environnement. Par conséquent, la matière organique doit être correctement éliminée avant d'être rejetées dans l'environnement en raison des restrictions légales et de la conservation de la vie naturelle dans le monde [1,2]

Plusieurs méthodes sont utilisées pour traiter les polluants (adsorption, coagulation, fenton, etc..). Des recherches récentes ont montré que les techniques électrochimiques peuvent offrir une bonne possibilité de prévenir et de remédier aux problèmes de pollution dus à des réglementations environnementales strictes.

Les processus d'électrocoagulation (EC) sont des méthodes simples et efficaces qui ont attiré beaucoup d'attention pour le traitement de diverses eaux usées industrielles telles que, effluents de traitement de pâte à papier[3], eaux usées agro-industrielles [4], eaux de rinçage de galvanoplastie[5] et les eaux usées textile[6].

Les processus EC sont respectueux de l'environnement et ne génèrent pas de polluants.

Certains avantages de ce procédé par rapport aux méthodes conventionnelles sont la facilité d'utilisation, moins temps de rétention, coûts d'exploitation réduits ou absence d'ajout de produit chimique, sédimentation rapide des floccs électro générés et moins de production de boues et nécessite une équipement simple.

Le but de ce travail est l'étude de l'effet des paramètres de traitement tels que le courant et le temps ; par électrocoagulation (EC), sur les propriétés physicochimiques d'une eau usée en utilisant des électrodes de fer.

Ce manuscrit est composé :

Chapitre 1 présente une Synthèse bibliographique, regroupent des généralités sur la pollution des eaux et leur origines ; un intérêt a été donné ensuite pour les différents traitements des eaux qui sont appliqués aujourd'hui, ainsi une présentation de procédé de traitement d'électrocoagulation. Une partie théorique sur le phénomène de corrosion.

Chapitre 2 : présente les techniques expérimentales et conditions de travail.

Chapitre 3 : regroupe les résultats expérimentaux obtenus discutés et interprétés.

En fin une conclusion générale résumant l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus au cours de ce travail.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

I.1. La pollution

I.1.1. Introduction

La pollution est la destruction ou dégradation d'un écosystème ou de la biosphère par l'introduction, généralement humaine, d'entités (physiques, chimiques ou biologiques), ou de radiations altérant le fonctionnement de cet écosystème [07]

I.1.2. Histoire de la pollution

La pollution commence dès la préhistoire, avec la maîtrise du feu : « la suie trouvée sur le plafond des grottes préhistoriques est une preuve évidente de ce que les foyers entraînaient un niveau élevé de pollution faute d'une ventilation insuffisante » [08]



Figure 1 : Pollution aérienne aux états unis, 1973.

« Les eaux usées sortent des maisons pour couler dans les caniveaux, dégagant une puanteur épouvantable. Il n'y a pas de toilettes publiques dans les rues ; les gens de passages, et particulièrement les femmes, sont souvent sans ressource quand la nature rappelle ses exigences. Dans les bâtiments publics, les installations sanitaires étaient incroyablement primitives. En tant que métropole, ce n'est qu'après 1870 que Berlin est passée de la barbarie à la civilisation » [09].

En Amérique, Chicago et Cincinnati furent les deux premières villes à passer des réglementations pour lutter contre la pollution de l'air. Vers le milieu du XX^e siècle, le smog provoqué par les échappements automobiles était devenu un problème majeur dans des villes comme Los Angeles [10], ou Donora [11]. Londres connut son pire épisode de pollution atmosphérique avec le Grand Smog de 1952, dont on estime qu'il a pu faire 12 000 morts.

D'autres catastrophes environnementales dues à de la pollution chimique massive conduisirent à une sensibilisation croissante de l'opinion : scandale de Love Canal, intoxications massives au mercure de Minamata au Japon, etc.

I.1.3. Origine de la pollution

Les pollutions d'origine humaine, dites aussi anthropiques, ont de nombreuses formes en pouvant être locales, culturelles, ponctuelles, accidentelles, diffuses, chroniques, génétiques, volontaires, involontaires, etc.

Cette pollution est une diffusion directe ou indirecte dans l'environnement de polluants. Ce sont souvent des sous-produits involontaires d'une activité humaine, comme les émissions des pots d'échappement ou des installations de combustion. Les déchets de produits de consommation courante (emballages, batteries usagées) jetés sans précautions dans l'environnement biophysique et dans l'environnement humain, constituent également une source de pollution très fréquente. Il peut aussi s'agir de phénomènes physiques (comme la chaleur, la lumière, la radioactivité, l'électromagnétisme, etc.).

Des pollutions d'origine environnementale peuvent être dues :

- aux conséquences directes ou indirectes de catastrophes naturelles, tels que le volcanisme ;
- à une pollution liée à des phénomènes naturels, tels que les éruptions solaires ;
- à une pollution d'un captage d'eau potable par un animal qui fera ses besoins à proximité, ou qui serait mort et en décomposition dans l'eau ;
- à la production de toxines lors du phénomène d'efflorescence algale

I.2. Les différents types de pollution

- La pollution de l'air.
La pollution du sol terrestre.
- Pollution de l'eau.
- La pollution des déchets nucléaires et chimiques.
- Les autres formes de pollution. [12].

1. Pollution de l'air

La pollution de l'air, provoquée par des polluants dits atmosphériques est souvent diffuse et donc plus délicate à réglementer efficacement dans un cadre local ou national que beaucoup d'autres formes de pollutions (de même pour les pollutions marines). Des conventions mondiales visent les polluants destructeurs de la couche d'ozone ou les gaz à effet de serre (tous capables de modifier le fonctionnement planétaire du monde vivant). Elle intègre la pollution

biologique induite par des taux anormaux ou anormalement allergènes de microbes, virus, pollens ou de spores fongiques. Les effets allergènes (rhinite, conjonctivite, asthme) de ces particules biologiques sont en augmentation, et ils semblent souvent exacerbés par les polluants urbains, routiers et de l'industrie [13].

Une mauvaise qualité de l'air peut tuer de nombreux d'organismes pollue-sensibles et causer des morts prématurées, via notamment des complications respiratoires, des maladies cardiovasculaires. Elle cause aussi une inflammation de la trachée, des douleurs abdominales et une congestion. Les enfants, les personnes âgées et les personnes ayant des problèmes pulmonaires ou cardiovasculaires y sont beaucoup plus vulnérables. Ainsi les enfants exposés aux pollutions automobiles développeraient plus facilement asthme, allergies respiratoires et cancers, les enfants en poussette étant particulièrement exposés à ce type de pollution [14].

En mars 2014, une grande partie de la France (30 départements) est en état d'alerte maximale [15], et Paris est plongé dans un épaisse brume de pollution, au point que la Tour Eiffel n'est presque plus visible [16]. En 2017, l'AEE (Agence européenne pour l'environnement) concluait que 500 000 européens mourraient chaque année prématurément (avant 65 ans) à cause de la pollution de l'air et une autre étude[17], de la revue médicale The Lancet a porté cette estimation à 6,5 millions de morts pour la planète en 2015.

2. Pollution de sol

La pollution du sol peut être diffuse ou locale, d'origine industrielle, agricole (utilisation excessive d'engrais, de pesticides, etc. qui s'infiltrent dans les sols). Ces pollutions agricoles peuvent avoir plusieurs impacts sur la santé humaine en contaminant par bioaccumulation ou diffusion par ruissellement.

3. Pollution chimique

La pollution chimique est provoquée par la présence dans l'environnement de substances chimiques qui, normalement, sont absentes ou s'y trouvent en très faible quantité. L'intoxication au mercure est, par exemple, lié à des déficits développementaux chez les enfants et à des symptômes neurologiques [18].

4. Pollution de l'eau

La pollution de l'eau a diverses origines parmi les quelles :

- **l'industrie** : dont ses sous-produits sont une des sources de pollution de l'eau parmi les plus importantes. Il s'agit essentiellement des produits chimiques et d'hydrocarbures (par exemple : dégazage en mer, rejet de papeteries, etc.) ;

- **l'agriculture** : dont l'utilisation excessive de produits chimiques (entre autres avec l'épandage du lisier) qui finissent soit dans les nappes phréatiques soit dans les cours d'eau par ruissellement ;
- **l'automobile**: dont les rejets d'hydrocarbures (carburants imbrûlés, huile, etc.) finissent dans les cours d'eau s'ils ne sont pas captés et recyclés correctement ;
- **les eaux usées** : si elles ne sont pas traitées correctement, peuvent être une source de pollution de l'eau. Dans la plupart des pays développés comme en France des législations ont été mises en place obligeant à un traitement des eaux usées, afin de réduire ce type de pollution. La pollution des eaux cause 14 000 décès par jour, pollution principalement la conséquence de mauvais traitements des eaux usées dans les pays en voie de développement. Il est estimé que 700 millions d'indiens n'ont aucun accès à l'hygiène et qu'un millier d'enfants meurt chaque jour de diarrhée infectieuse [19].

I.2.4.1. Définition des eaux usées

Les eaux usées sont des déchets liquides dans le jargon.

Les eaux usées quelle que soit leur origine, sont généralement chargées en éléments indésirables, qui selon leur quantité et leur composition, représentent un danger réel pour les milieux récepteurs et leurs utilisateurs.

I.2.4.2. Origine et nature des eaux usées

- Les eaux usées proviennent principalement de quatre sources :
- Les eaux usées domestiques ;
- Les eaux usées industrielles ;
- Les eaux usées de pluies et de ruissellement dans la vie ;
- Le ruissellement dans les zones agricoles [20].

I.2.4.3. Les principaux polluants de l'eau

- ✓ Les matières en suspension ;
- ✓ Les matières organiques ;
- ✓ Les matières fertilisantes ;
- ✓ Les polluants métalliques et les polluants chimiques persistants ;
- ✓ Les sels minéraux ;
- ✓ Les polluants microbiologiques.

I.3. Les type de traitement de l'eau polluée

I.3.1. Les principaux procédés de traitement physique

Les traitements physiques ou traitements préliminaires : sont appliqués lorsqu'il S'agit d'une simple séparation mécanique solide-liquide, sans introduction de réactifs. Ils concernent les flottants ou les particules entraînées par le courant susceptibles de décanter spontanément et rapidement. Leur présence perturberait la clarification ou risquerait de provoquer des dommages. Dans le domaine du traitement des eaux naturelles, ces procédés ne constituent en général qu'un préalable à un traitement physico-chimique ou biologique [21].

Les traitements préliminaires comprennent :

- **Le dégrillage** : Il permet de filtrer les objets les plus grossiers , son principe consiste à faire passer l'eau brute à travers des grilles composées des barreaux plus au moins espacés placés verticalement ou inclinés de 60° à 80° sur l'horizontale. Cette opération permet aussi de protéger la station contre les bouchages provoqués par les gros objets dans les différentes unités de l'installation [22].
- **Le tamisage** : l'eau passe dans des tamis de maille de plus en plus fine retenant les débris végétaux et animaux, les insectes, les mollusques, les crustacés d'eau douce, les alluvions, les herbes puis les algues et le plancton.
- **La décantation simple** : les particules les plus lourdes se déposent dans le fond du bassin sous l'effet de la gravité.
- **La filtration** : l'eau circule plus ou moins rapidement à travers des membranes ou des filtres constitués de matériaux comme le sable et le charbon actif. Les filtres à sable, en début de filière, retiennent notamment le fer et le manganèse. Les filtres à charbon actif, placés en fin de filière, absorbent les composés organiques résiduels.
- **La flottation** : de l'air sous pression est insufflé depuis le fond du bassin permettant ainsi aux particules de remonter en surface ou elles sont raclées puis évacuées.



Figure I.2 : Eau polluée dans une station.

I.3.2. Les principaux procédés de traitement chimique

Ce type de traitement utilise des réactifs chimiques qui agissent directement sur les métaux lourds, les matières organiques, les germes pathogènes et les caractéristiques de l'eau. La chaux peut être utilisée pour modifier le pH de l'eau et la rendre plus douce ou plus agressive.

L'oxydation au chlore élimine l'ammoniaque, le fer et évite le développement d'algues. L'oxydation à l'ozone élimine le fer, le manganèse, les micropolluants et rend les matières organiques plus biodégradables.

La chloration et l'ozonation utilisent respectivement le chlore et l'ozone comme désinfectants en fin de filière.

I.3.3. Les principaux procédés de traitement biologique

Le traitement biologique utilise les microorganismes naturellement présents dans l'eau, principalement les bactéries. Elles dégradent la matière organique biodégradable - matière naturelle ou micropolluants artificiels - en produits plus simples et moins dangereux pour l'homme.

Le principe de ce traitement consiste à provoquer le développement d'une culture bactérienne dispersée sous forme de floccs dans un bassin brassé et aéré, alimenté par l'eau usée. Ce développement est assuré par un brassage de la masse formée dans le but d'homogénéiser le mélange, et surtout par l'oxygène nécessaire aux réactions de minéralisation. L'oxygène est fourni artificiellement soit par insufflation d'air au sein du liquide, soit par un procédé mécanique d'agitation de fond et de surface [23].

I.3.4. Les procédés de traitement physico-chimique

Le traitement physico-chimique est la combinaison de deux étapes que l'on appelle la coagulation-floculation. Il s'agit d'une méthode classique pour séparer les matières en suspension dans les stations de traitement. Généralement, on associe un traitement physico-chimique à des procédés de décantation ou encore à de la filtration.

Il y a deux étapes chimiques permettant d'agglomérer les particules et de les rendre plus lourdes:

Coagulation –floculation

La couleur et la turbidité d'une eau de surface sont principalement dues à la présence de particules de très faible diamètre : colloïde

Ces particules qui peuvent rester en suspension dans l'eau durant de très longues périodes. Par ailleurs, puisque leur concentration est très stable, ces particules n'ont pas tendance à s'accrocher les unes aux autres, pour les éliminer, on a recours aux procédés de coagulation et de floculation. [24]

La Coagulation : Consiste à déstabiliser ces particules par la jonction d'un réactif chimique de préférence trivalent à d'un mélange rapide. Il s'agit de neutraliser leurs charges électrostatiques de répulsion pour permettre leur rencontre.

La floculation : A pour objectif de favoriser, à l'aide d'un mélange lent l'agglomération de ces particules en micro floc qu'on peut facilement éliminer par les procédés de décantation et filtration.

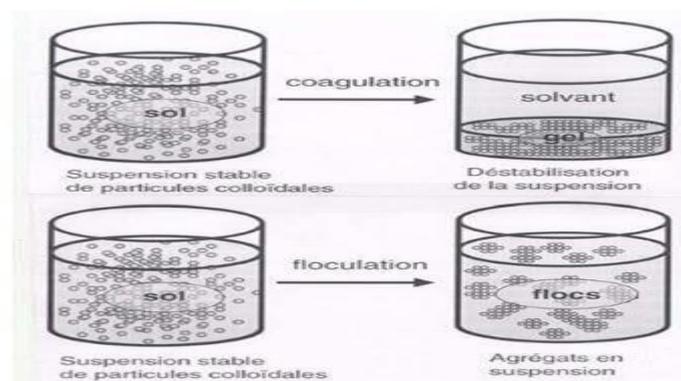


Figure I.3 : Coagulation et floculation.

I.3.5. Les procédés de traitements électrochimiques

- Traitement par électro-oxydation (EO) :
 - Oxydation directe ;
 - Oxydation indirecte ;
- Traitement par électro-flottation (EF) ;
- Traitement par électro-adsorption (EA) ;
- Traitement par électrocoagulation et électro-floculation (EC) (EF). [25]

I.4. La technologie ou procédé électrochimique

I.4.1. Contexte historique et développement du procédé électrochimique

Le concept électrochimique d'épuration des eaux usées est connu dès 1889, en Grande Bretagne et en 1912 aux Etats-Unis, en se basant sur les brevets américains respectifs de Webster et de Harries [26].

La technologie électrochimique contribue de plusieurs manières à un environnement plus propre et couvre une gamme très large de technologie. Pendant les deux dernières décennies, un champ spécial de recherches, à savoir l'électrochimie environnementale a été développée. L'électrochimie environnementale implique des techniques ou des méthodes électrochimiques pour éliminer des impuretés des gazes, des liquides et du sol pour empêcher ou réduire au minimum la pollution environnementale [27].

Les processus électrolytiques impliquent le passage d'un courant électrique au sein de la solution à traiter, en même temps, diverses réactions électrochimiques se produisent aux électrodes. Ces réactions peuvent mettre en jeu le dégagement de gaz, la séparation de substances, la dissolution de l'électrode ou l'apparition de nouvelles substances dans la solution [28].

I.4.2. Principales réactions d'électrolyse

I.4.2.1. Principales lois de l'électrolyse

Le procédé d'électrocoagulation met en œuvre plusieurs types de phénomènes tels que les réactions chimiques inter-ioniques, les réactions électrochimiques d'oxydoréduction, les phénomènes physiques de transfert de charge à l'interface électrode solution, les adsorptions physiques ou chimiques entre hydroxydes et polluants et adsorption chimique entre les ions métalliques et la pollution, l'hydrodynamique dans l'espace inter électrodes, les interactions gaz-liquide plus précisément entre les gaz produits et la solution.

La compréhension de tous ces phénomènes est indispensable pour la maîtrise et l'optimisation du procédé. Cela se fait par la maîtrise d'un certain nombre de lois :

- Cinétique de transfert de charge ou loi de Buttler-Volmer
- La loi de Faraday
- L'expression de la tension de cellule

- Energie consommée et rendements d'électrolyse.

I.4.2.2. La loi de Faraday

La quantité de matière produite ou consommée lors d'une réaction électrochimique se calcule par la loi de Faraday et est fonction de la durée de l'opération t et de l'intensité du courant I .

$$m = (I.t.M) / (Ne.F) \quad \dots\dots\dots (I-1)$$

Où M est la masse molaire de l'espèce considérée.

I : intensité du courant électrique (A) ;

F : le constant de Faraday=96500(C/mol) ;

N_e : le nombre d'électron mis en jeu lors de la réaction ;

t : le temps d'électrolyse.

Cette relation (I-1) suppose que les électrons échangés ont servi effectivement à la réaction considérée.

Une partie de l'énergie imposée peut être utilisée par des réactions secondaires, d'où la notion de rendement faradique. Il se détermine par le rapport de la quantité théorique d'électricité nécessaire pour produire ou consommer une mole de B sur la quantité d'électricité réellement consommée ou produite.

I.5. Electrocoagulation

I.5.1. Introduction

En 19^{ème} siècle l'électrocoagulation a été considérée comme une technologie prometteuse pour le traitement de la pollution de l'eau, mais avait presque disparu des 1930. Toutefois quelques applications de l'électrocoagulation sont restées très limitées et surtout à petite échelle. En 1947, Bonnilla [29] a traité les eaux urbaines par électrocoagulation en utilisant des électrodes en aluminium. Pendant 20 ans, le procédé de l'électrocoagulation a été ralenti par le coût élevé d'investissement et de la concurrence avec d'autres processus de traitement chimique.

En 1974, Beck et al [30] ont appliqué l'électrocoagulation dans le traitement des effluents de l'industrie agroalimentaire.

L'électrocoagulation est devenue une méthode d'épuration inévitable pour la diminution de la turbidité, de la demande chimique en oxygène (DCO), de la demande biologique en oxygène (DBO), des matières en suspensions (MES), de la coloration et métaux lourds.

I.5.2. Théorie de l'électrocoagulation

La technologie d'électrocoagulation (EC) offre une alternative au procédé conventionnel de coagulation, où les sels et les polymères métalliques sont ajoutés pour casser les émulsions et les suspensions colloïdales stables. Dans l'électrocoagulation, les coagulants sont produits in situ dans le réacteur sans addition directe des produits chimiques. Ces coagulants sont produits par l'oxydation électrolytique des anodes de matériaux appropriés sous l'effet d'un courant électrique, qui ont comme conséquence la formation des espèces polymérique chargées d'hydroxyle métalliques.

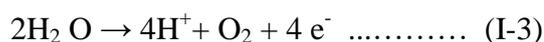
I.5.3. Origine et évolution du procédé d'électrocoagulation (EC)

Le premier document rapportant l'utilisation de l'EC pour le traitement des effluents est un brevet américain déposé en 1880 par Webster [31] qui utilisait des électrodes en fer. La même année, une station d'épuration fut construite sur la base de ce brevet, à Salford pour traiter les eaux polluées urbaines. En 1909, Harries dépose un nouveau brevet sur ce procédé : les anodes étaient alors constituées par des plaques de fer et d'aluminium. En 1912, deux autres stations de traitements des eaux usées furent construites sur ce principe, aux Etats-Unis. Cependant, leur fonctionnement fut stoppé, quelques années plus tard (1930), en raison du coût qui étaient deux fois plus élevé que celui d'un traitement classique [32].

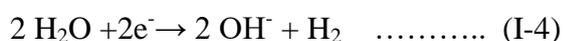
I.5.4. Les réactions de l'électrocoagulation

Les principales réactions susceptibles de se produire aux électrodes sont :

À l'anode



À la cathode en milieu basique



Compte tenu du pH, le fer ne reste pas sous forme cationique. Les cations formés réagissent avec l'eau pour former des complexes de type $\text{Fe}_2(\text{OH})_5^+$; $\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{4+}$; soit l'hydroxyde peu soluble $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Ce sont ces espèces qui jouent le rôle de coagulant en neutralisant les charges négatives à la surface des colloïdes.



I.5.5. Avantages et inconvénients du procédé électrocoagulation

Comme tous les procédés d'épuration des eaux, l'électrocoagulation possède des avantages et des inconvénients qui favorisent ou limitent ses domaines d'applications. Plusieurs avantages du processus d'EC par rapport au processus de coagulation chimique ont été apportés par Mollah et al. [33].

1. L'EC exige un équipement simple, compact et est facile à utiliser avec le suffisamment de l'attitude opérationnel pour traiter la plupart des problèmes produits sur le fonctionnement.
2. Le procédé d'électrocoagulation ne nécessite pas l'ajout de produits chimiques. Il nécessite l'ajout de petite quantité d'additif pour améliorer la conductivité électrique de l'effluent. Les travaux de Miquel et de Damien ont affirmé cet avantage [34].
3. L'eau usagée traitée par l'EC donne de l'eau de goût agréable, claire, sans couleur et inodore.
4. Le procédé de l'EC a l'avantage d'éliminer les plus petites particules colloïdales. Cela a été montré par Persin et Rumeau [35].
5. L'électrocoagulation offre la possibilité de traiter des effluents par oxydation et réduction de plusieurs composés dissous tel que les nitrites, les sulfures, les cyanures, les sulfates, les chromates et les ions fluor.
6. Cenkin et Belevtsev ont montré que l'utilisation de l'électrocoagulation permet de réduire le temps de traitement : ce procédé permet un grand gain en compacité des installations et une possibilité d'automatisation [36].
7. Larue et Vorobiev ont obtenu des boues plus denses et moins hydrophiles. Cela rend la décantation et la flottation plus aisée et diminue le volume des boues. Ces travaux ont montré une réduction du temps et des coûts de traitement des boues [37].

En plus de ces avantages, l'électrocoagulation présente quelques inconvénients parmi lesquels on peut citer :

- L'effluent traité par électrocoagulation doit être un électrolyte ce qui impose un ajout de sel pour certains effluents faiblement conducteurs.

- Les électrodes sacrificatoires sont dissoutes dans l'effluent à traiter en raison de l'oxydation, et doivent être régulièrement remplacées.
- Une pellicule d'oxyde imperméable peut être formé sur la cathode menant à la diminution d'efficacité de l'unité de l'EC.

I.5.6. Application du procédé d'électrocoagulation

Actuellement, les avantages du processus d'électrocoagulation le placent parmi les processus les plus prometteurs dans différents domaines du traitement. Ses domaines d'applications sont très vastes et l'amélioration des procédés électrochimiques a réduit la plupart des inconvénients qui ont freiné l'utilisation de l'électrocoagulation.

L'électrocoagulation a été appliqué avec succès dans le traitement de plusieurs types de pollution : effluents de l'industrie de textile [38, 39]. Défloration de l'eau potable [40], eau usagée industrielle contenant les colorants [41,42], suspensions aqueuses [22, 43]. De plus, dans les dernières décennies l'EC a été proposé comme procédé efficace pour éliminer les espèces ioniques solubles des solutions, en particulier les métaux lourds [44, 45].

I.5.7. Technologie du procédé d'électrocoagulation

Plusieurs technologies d'électrocoagulation ont été mises au point au niveau laboratoire et industriel. Les cellules électrochimiques sont montées seules ou en séries avec d'autres types de procédé. Dans les petites installations de laboratoire, les géométries des électrodes sont diverses tels que les plaques planes, cylindrique, des lits fixes de billes sphériques et des électrodes rotatives. Plusieurs modes de connexions électriques peuvent être réalisés.

On distingue généralement trois modes :

- Mode mono polaire en série ;
- Mode mono polaire en parallèle ;
- Mode bipolaire en série.

I.6. La corrosion

I.6.1. Introduction

La corrosion a pris de nos jours une importance considérable étant donnée l'utilisation grandissante d'appareillages métalliques de plus en plus coûteux. Dans le cas de l'industrie laitière en particulier, la corrosion du matériel peut être l'origine de contaminations chimiques du lait sous forme d'ions métalliques, Fe et Cu par exemple. L'étude des phénomènes de corrosion et la lutte anti corrosion contribuent donc à l'amélioration de la qualité du lait et des produits qui

en dérivent. Ces considérations justifient l'intérêt manifesté actuellement dans tous les domaines pour la lutte anticorrosion et aussi les nombreux travaux [46].

I.6.2. Généralités sur la Corrosion

I.6.2.1. Définition

La corrosion d'un matériau est la dégradation de celui-ci ou de ses propriétés mécanique sous l'effet de l'environnement immédiat qui peut être le sol, l'atmosphère, l'eau ou d'autres fluides. Compte tenu du nombre important de paramètres intervenant dans le processus électrochimique, la corrosion est un phénomène très complexe.

La corrosion peut être vue sous sa forme globale comme une réaction spontanée d'échange d'électron à l'interface métal/environnement. C'est un phénomène naturel qui tend à faire les métaux à leurs état d'oxyde par une attaque plus ou moins rapide au milieu corrosif [47,48].

I.6.3. Types de la corrosion

La corrosion d'un matériau métallique est distinguée en trois types de corrosion :

- **Corrosion chimique:** La corrosion chimique est l'attaque directe du métal par son environnement. Ce type de corrosion se développe dans une solution non électrolytique ou sur action de gaz (O_2 , H_2S et CO_2) [49].
 - **Corrosion biochimique (bactérienne):** Elle résulte de l'action de bactéries ou de produits provenant de l'activité bactérienne tels que des acides organiques ou des gaz comme CO_2 et SO_2 , sur le matériau métallique [50].
 - **Corrosion électrochimique.**

I.6.4. Rappels sur la Corrosion électrochimique

I.6.4.1. Définition

Les métaux ne sont en générale pas monophasés. Lorsqu'ils sont plongés dans un réactif, ils sont donc le plus souvent le siège d'une corrosion électrochimique [51] qui est produite essentiellement par l'oxydation d'un métal sous forme d'ions ou d'oxydes et la réduction des agents corrosifs existants dans la solution électrolyte. Par ailleurs elle se traduit par des transferts électroniques entre un métal et une solution électrolytique à son contact (circulation d'un courant électrique [53]). Ce type de corrosion peut être causé par l'hétérogénéité soit dans le métal, soit dans le réactif. L'existence de l'hétérogénéité détermine la formation

d'une pile électrique [54], de ce fait, un courant électrique circule entre anodes et cathodes dans le réactif et les zones qui constituent les anodes sont attaquées (corrodées). [52]

I.6.4.2. Les facteurs de corrosion

Tableau I.1 : Facteurs de corrosion.

Liés au matériel	Liés à la surface	Liés au milieu
<ul style="list-style-type: none"> - Composition - Structure Cristallographique - Taille des grains - Texture - Etat de déformation - Contraintes résiduelles -Gradient thermique Appauvrissement ou enrichissement (précipités) au joints de grains et/ ou dans Les zones voisines. 	<ul style="list-style-type: none"> - Orientation des grains - Film superficiel - Composition de la surface - Précipités et inclusions émergeant en surface - Rugosité -Ségrégations inter granulaires 	<ul style="list-style-type: none"> Composition - Teneur en oxygène - Différence d'aération - PH - Température - Cyclage thermique - Gradient thermique - Agitation et écoulement - Contraintes appliquées (Statiques et dynamiques) - Bactéries - Complexant - Irradiation [55].

I.6.4.3. Morphologie de la corrosion

Il existe différents types de corrosion :



Fig. I.4 : (a) La distribution homogène des demi-réactions anodiques et cathodiques génère une corrosion uniforme. (b) La localisation d'une des demi-réactions anodique ou cathodique génère une corrosion localisée [56].

I.6.4.3.1. Corrosion généralisée

De façon globale, la corrosion généralisée progresse sur l'ensemble de la surface du métal exposé au milieu corrosif. Si la progression de cette corrosion généralisée s'accomplit à une vitesse uniforme en tout point de la surface, on parle de corrosion uniforme.

I.6.4.3.2. Corrosion localisée

Contrairement à la corrosion généralisée, la corrosion localisée focalise l'attaque dans certains points discrets. L'amorçage est lié à la rupture du film passif [44].

- **Corrosion par piqûre**

L'amorçage de la corrosion par piqûres s'effectue généralement sur des singularités de la surface, comme des inclusions réactives, des précipités ou des défauts consécutifs à la mise en œuvre (Rayures, pollution, etc.) mais pas exclusivement. Elle peut également s'amorcer suite à une instabilité de la couche passive [58]. La rupture du film est un événement rare qui se déroule très rapidement à une échelle souvent nanométrique en un point difficile à prévoir ce qui rend les observations directes extrêmement difficiles [59]. L'amorçage de la piqûre est ainsi reconnu comme un phénomène ayant une composante aléatoire [60], c'est la raison pour laquelle il est difficile parfois à prédire.

- **Corrosion sous contrainte**

Il s'agit d'un type de corrosion tout à fait général qui se produit sous l'action commune d'une contrainte mécanique et d'un milieu corrosif [61].

- **Corrosion galvanique**

Il s'agit de l'attaque préférentielle de la phase la moins noble d'un alliage comportant deux phases ou de la corrosion pouvant exister entre au moins deux matériaux métalliques placés dans le même environnement. Il y a formation d'une pile. En cas de couplage, plus les métaux en présence ne sont éloignés sur l'échelle galvanique, plus la pile formée dispose d'énergie pour provoquer les transformations. La partie la moins noble est l'anode et la plus noble est la cathode. Le rapport de surface anode/cathode joue un rôle très important.

- **Corrosion par érosion, abrasion, cavitation**

Cette corrosion est produite par le mouvement relatif d'un fluide corrosif et d'une surface métallique. On a apparition de sillons, vallées, surfaces ondulées, trous... ayant un aspect directionnel caractérisé (queue de comète, sabot d'un cheval...) [62]

- **Corrosion inter-granulaire**

Ce type de corrosion se manifeste aux joints de grains. Ce phénomène peut provoquer des fissures qui affaiblissent les caractéristiques mécaniques du métal. Certains aciers inoxydables et alliages (fer, chrome, nickel) sont très affectés par ce mode de corrosion qui réduit de façon catastrophique leur résistance mécanique. Il peut être dû soit à la présence d'impuretés dans le joint de grain, soit à l'enrichissement (ou l'appauvrissement) local en l'un des constituants [63].

- **Corrosion caverneuse**

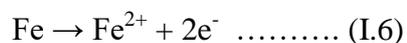
La corrosion caverneuse est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure, créant ainsi une pile électrochimique. On observe une attaque sélective du métal dans les fentes et autres endroits peu accessibles à l'oxygène [64].

- **Corrosion sélective**

Est l'oxydation d'un composant de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse [65].

I.6.4.4. Aspect thermodynamique de corrosion électrochimique

La corrosion d'un métal comme le fer est la résultante d'un processus de dissolution du métal :



Qui s'accompagne d'un changement d'état et la libération de 2e^- dans le cas du fer pour être consommés par la réaction de réduction qui est liée à la nature du milieu :



milieu aéré neutre et basique

Les deux réactions (I.6 et I.7 ou I.8) se produisent simultanément à la surface du métal.

- **Diagramme potentiel - pH de Pourbaix**

Le potentiel de l'état et le pH du milieu environnant sont les paramètres sur lesquels les méthodes électrochimiques de protection peuvent agir.

Le diagramme de Pourbaix représente l'état sous lequel se trouve l'élément en fonction du potentiel réversible (calculé par l'équation de Nernst), et du pH de l'eau à 25°C. Pour un métal donné, on trace généralement un tel diagramme en tenant compte des différentes réactions d'électrode et chimiques possibles entre le métal, ses ions et l'eau pure.

Les différents couples sont représentés à l'état d'équilibre par des droites. L'ensemble de ces droites détermine les différentes zones dans lesquelles une espèce est stable. Considérons le cas du fer en équilibre avec ses oxydes dans l'eau pure. On peut ainsi tracer un diagramme potentiel-pH (Fig. I.4), en indiquant les zones de stabilité du fer (Fe), de ses ions Fe^{2+} et Fe^{3+} et de ses oxydes ou hydroxydes. Il s'agit donc d'une sorte de « carte » ; les zones délimitées par des frontières indiquent les couples de valeurs (E-pH) pour lesquelles une espèce est stable. Ce diagramme peut être tracé pour tous les éléments métalliques purs [66].

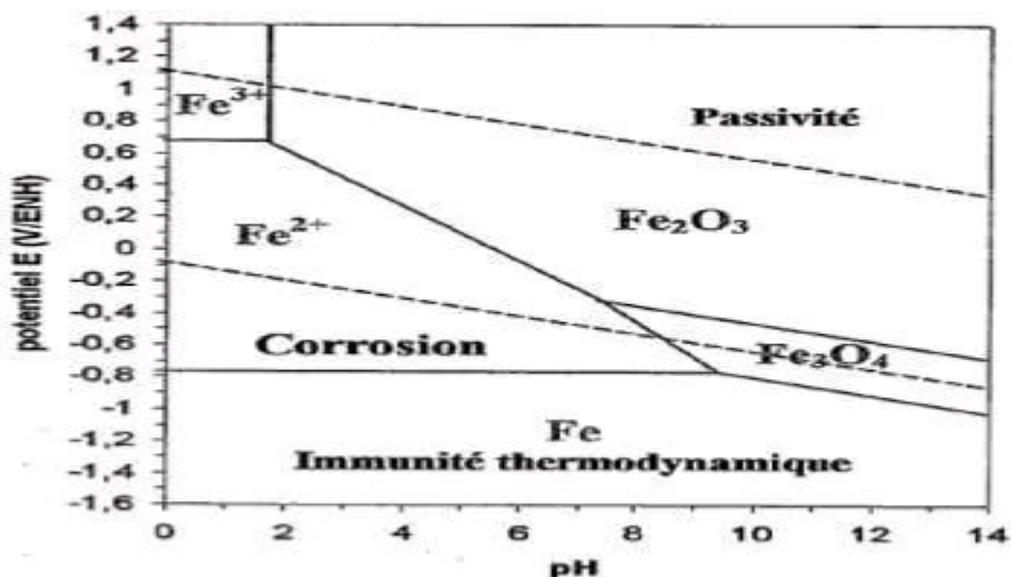


Figure I.5 : Diagramme potentiel-pH simplifié du fer à 25°C (Conditions théoriques d'immunité et de passivation du fer à 25°C (pour $[\text{Fe}^{2+}] = [\text{Fe}^{3+}] = 10^{-6}$ mol/L) [67].

Exploitation du diagramme

Sur le plan du diagramme potentiel-pH du fer, il apparaît trois domaines distincts:

- ✓ domaine d'immunité thermodynamique, donc pas de corrosion. Le fer reste à l'état métallique (Fe), c'est le domaine de la protection cathodique.
 - ✓ domaine de corrosion : lorsque l'acier atteint des potentiels électropositifs en milieu acide, les formes d'oxydation du métal sont les ions Fe^{2+} et Fe^{3+} .
 - ✓ domaine de passivation éventuelle : lorsque l'acier atteint des potentiels électropositifs en milieu alcalin, les formes d'oxydation du métal sont des oxydes ou hydroxydes solides (Fe_2O_3 , Fe_3O_4) qui recouvrent la surface et la protègent de la corrosion.
- **Evolution du potentiel libre en fonction du temps**

Egalement désigné par potentiel en circuit ouvert, potentiel spontané, potentiel d'abandon, de repos ou encore libre [68]. Il s'agit de la grandeur électrochimique la plus immédiatement mesurable. C'est la seule mesure qui n'entraîne absolument aucune perturbation de l'état du système étudié [69]. Elle est mesurée par rapport à un potentiel de référence, dans ce cas celui de l'électrode au calomel saturée. Le suivi du potentiel libre en fonction du temps est une information parfois utile pour appréhender le comportement d'un matériau au contact d'un milieu corrosif humide [70], Il donne des informations sur les transformations préliminaires, sur la nature des processus en cours à l'interface métal/électrolyte: corrosion, passivation [71,72].

Plusieurs types de courbes se rencontrent habituellement, (Figure II. 5) où:

- a) le potentiel est constant, l'interface ne se modifie pas au cours du temps;
- b) Le potentiel ne fait que décroître, le matériau devient de moins en moins noble, par une attaque continue du métal;
- c) Le potentiel croît, le matériau se passive, il s'anoblit;
- d) La passivation peut être précédée d'une étape de corrosion marquée;
- e) L'interface métal-milieu, stable pendant un certain temps, peut se modifier brutalement [70].

Cette mesure permet également de connaître la durée d'immersion nécessaire à l'établissement d'un régime stationnaire indispensable aux mesures potentiel dynamiques ou d'impédance électrochimique [73]. La valeur du potentiel libre est le potentiel de corrosion, mais elle ne renseigne cependant pas sur les cinétiques électrochimiques et ne permet pas d'accéder à la vitesse de corrosion.

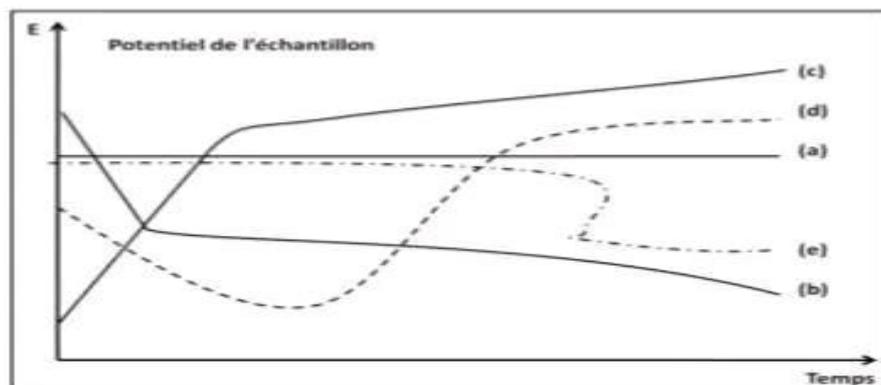


Figure I.6 : Suivi du potentiel en fonction du temps.

I.6.4.5. Phénomène de polarisation

En électrochimie, la polarisation est un phénomène qui diminue l'efficacité processus électrochimique, ce qui ralentit la progression de réactions aux électrodes et donnant lieu à la décharge différence de potentiel électrique

- **Courbes de polarisation**

La courbe de polarisation de l'interface métal-solution est une caractéristique fondamentale de la cinétique électrochimique, mais ne rend compte que de l'étape la plus lente du processus global à l'interface électrochimique. Pour déterminer une courbe de polarisation potentiostatique, on applique, à l'aide d'un potentiostat, différents potentiels entre l'électrode de travail et une électrode de référence. On mesure le courant stationnaire qui s'établit après un certain temps dans le circuit électrique entre cette électrode de travail et une contre-électrode.

Cette méthode permet de déterminer d'une façon précise les paramètres électrochimiques d'un métal au contact d'un électrolyte à savoir: la vitesse instantanée de corrosion (i_{corr}), le potentiel

Corrosion (E_{corr}), les pentes de Tafel, la résistance de polarisation (R_p), les courants limites de diffusion.

Elle donne des mesures rapides et sa mise en œuvre est relativement simple. La détermination de la vitesse de corrosion à partir des courbes de polarisation est étroitement liée à la cinétique régissant le processus électrochimique [74], Pour déterminer expérimentalement ces paramètres électrochimiques, une présentation logarithmique de la densité de courant est en général préférable, car elle met en évidence la relation linéaire entre le logarithme de la densité de courant et le potentiel.

Extrapolation des droits de Tafel

Cette méthode consiste à utiliser les parties anodiques et cathodiques de la courbe de Tafel dans le but d'obtenir la valeur de potentiel de corrosion et la valeur correspondante de la densité de courant de corrosion [75].

L'équation de Butler-Volmer pour un système ne comporte qu'une seule réaction anodique et cathodique est comme suit :

$$i = I_{\text{corr}} \exp(\eta/\beta_a) - I_{\text{corr}} \exp(-\eta/\beta_c) \dots\dots\dots (I.9)$$

L'extrapolation de la droite de Tafel vers le potentiel, fournit alors la valeur de la densité de courant de corrosion i_{corr} . Puis par la loi de Faraday on détermine la vitesse de corrosion de l'échantillon au repos dans la solution corrosive.

Par exemple: la région de Tafel cathodique de l'équation de Butler-Volmer correspond à

L'équation suivante:

$$i = i_{\text{corr}} \exp(-\eta/\beta_c) \quad (I.10)$$

Au potentiel de corrosion (le courant de corrosion vaut $i = i_{\text{corr}}$ et la vitesse de corrosion :

$$V_{\text{corr}} = i_{\text{corr}} / n F A \quad (I.11)$$

$$i_{\text{corr}} = I_{\text{corr}} / A \quad (I.12)$$

Avec :

V_{corr} : la vitesse de corrosion en $[\text{cm}^2/\text{Y}]$.

A : la surface de l'électrode de travail $[\text{cm}^2]$.

F : nombre de Faraday=96500 coulombs.

n : nombre d'électrons mise en jeux [75].

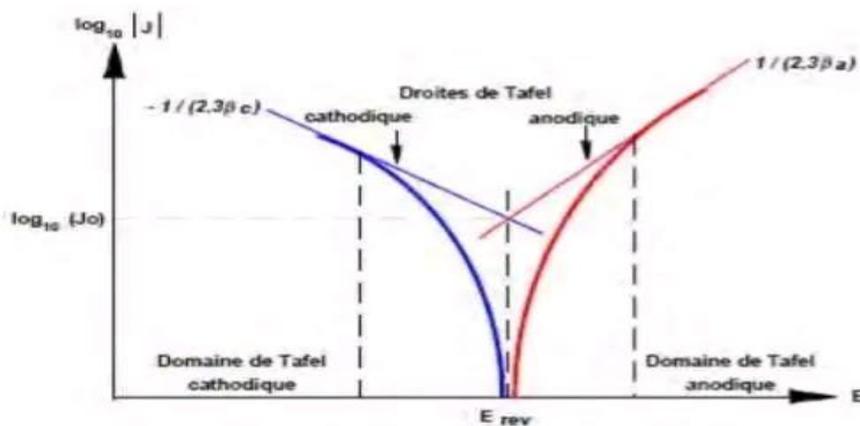


Figure I.7 : Densité de courant anodique et cathodique en valeur absolue et droites de Tafel d'une réaction d'électrode (échelle semi-logarithmique) [76].

- **Mesure de la résistance de polarisation linéaire**

Elle consiste à imposer de petites variations de potentiel autour du potentiel de corrosion à l'équilibre, ce qui évite notamment d'altérer l'anode. La résistance de polarisation est le rapport entre le potentiel appliqué et la réponse en courant qui en résulte.

Au voisinage du potentiel de corrosion, la courbe du courant en fonction de la tension $I = f(E)$ est approchée par sa tangente. La résistance de polarisation R_p est définie comme la pente de cette tangente obtenue à $i=0$.

$$R_p = (dE/dI)_{i=0, dE/dt=0} \dots\dots\dots (I. 13)$$

Dans le cas d'une surtension $\eta = E - E_{cor}$ relativement faible, il est admissible de remplacer les relations exponentielles, dans la relation de Butler–Volmer, par leur développement limite au premier ordre.

On obtient alors la valeur du courant en fonction de la différence de potentiel :

$$I_{corr} = I_a + I_c = I_{corr} \left\{ (2,303/\beta_a \eta) + (2,303/\beta_c \eta) \right\} \dots\dots\dots (I. 14)$$

En connaissant R_p , on peut ensuite définir l'intensité du courant de corrosion. En effet, à partir de l'équation de Butler-Volmer, Stern et Geary [77] ont fait l'hypothèse de la relation suivante :

$$R_p = (dE/dI) = (1/2.0303 I_{corr}) (\beta_a \beta_c / \beta_a + \beta_c) = \beta / I_{corr} \dots\dots\dots (I. 15)$$

Où β_a et β_c sont respectivement les coefficients de Tafel anodique et cathodique et :

$$\beta = (1/2.0303) (\beta_a \beta_c / \beta_a + \beta_c) \dots\dots\dots (I. 16)$$

Cette relation traduit bien que la relation courant-potentiel est stationnaire et que plus la valeur de la résistance de polarisation est élevée, plus le courant de corrosion est faible.

La mesure de la résistance de polarisation est valable uniquement dans le cas des corrosions uniformes et contrôlées par transfert de charges, non par la diffusion, et d'un système à l'état stationnaire.

La vitesse de balayage du potentiel doit être suffisamment faible afin de respecter la stationnarité du système.

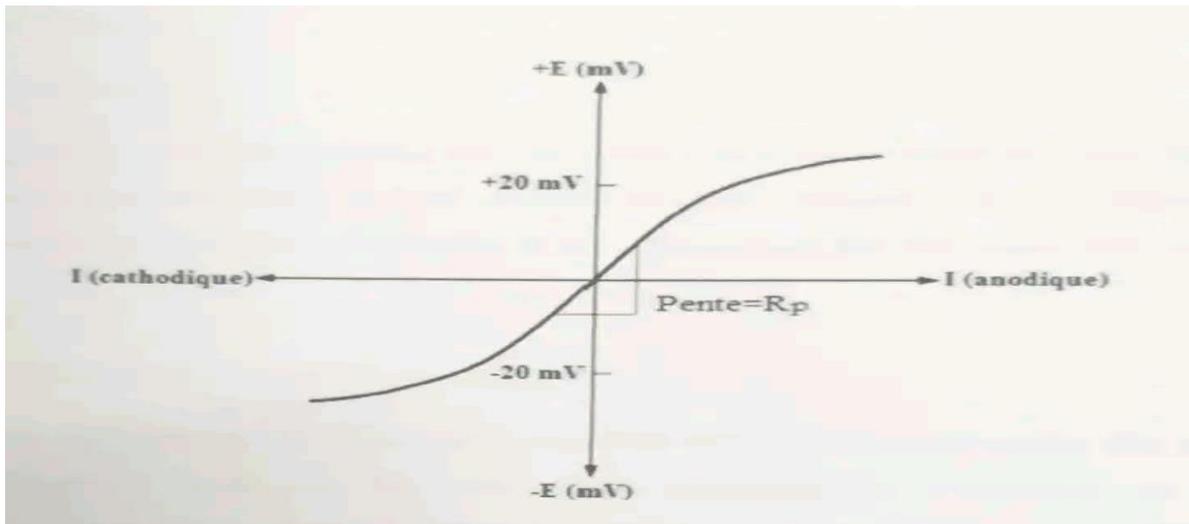


Figure I.8 : Détermination de la résistance de polarisation.

Chapitre II

Techniques expérimentales

Ce chapitre présente la partie expérimentale de notre manipulation. Il a pour but de présenter les matériaux, l'échantillon d'étude, le dispositif expérimental, mais aussi d'expliquer le choix des techniques électrochimiques et d'analyse utilisées dans cette étude afin d'assurer une bonne reproductibilité des résultats.

II.1 Essai

II.1.1. Principe

Ce dispositif se compose un générateur qui présente le voltage et le courant ; brancher avec deux électrodes en acier (5 cm×5cm) plongées dans un bécher de 150 ml. La surface immergée est 2,5 cm² et la distance entre les deux plaques (électrodes) est 4 cm.

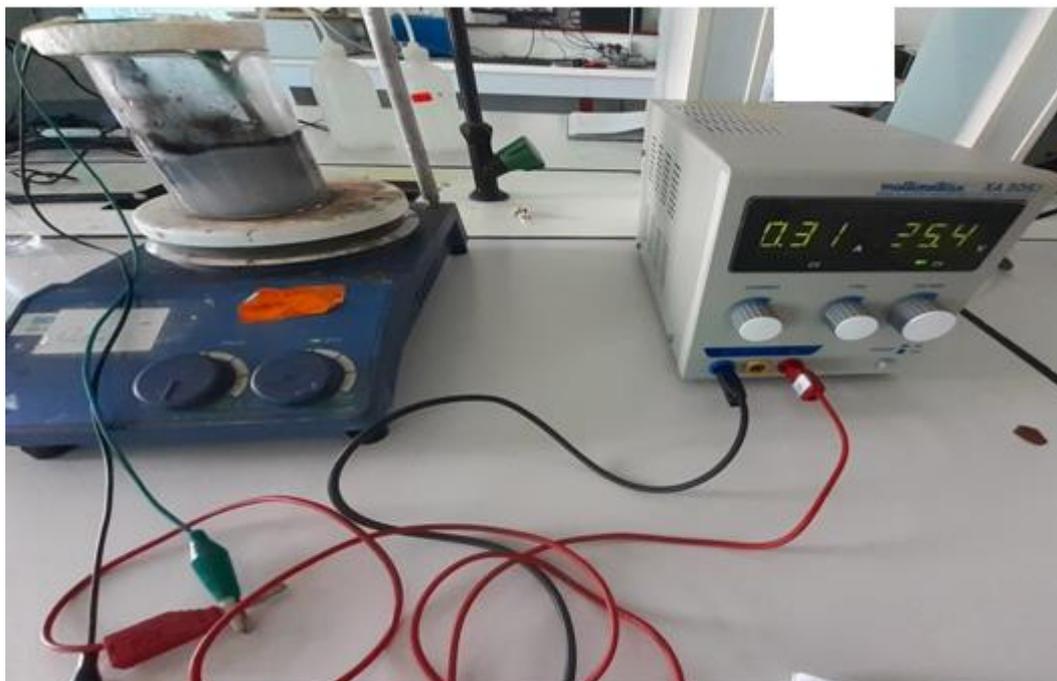


Figure II.1 : Dispositif expérimental (un générateur de courant relié avec deux électrodes d'acier).

II.1.2. Manipulation

II.1.2.1. Matériel utilisé de travail

- Béchers et des flacons ;
- Deux plaques en acier ;
- Barreaux magnétique ;
- Deux pinces ;
- Agitateur ;

- Générateur ;
- Baguette et seringue.

II.1.2.2. Conditions de travail

On a faire le travail sur les conditions suivants :

- Les plaques (les électrodes) en acier ;
- Le temps d'électrolyse (10-20 min) ;
- Le courant (0.24 A, 0.31 A, 0.41A) ;
- Le voltage (20.4V6, 25.4V, 31.1V).

II.1.2.3. Préparation d'échantillon

Avant immersion :

- On prépare les deux plaques par un polissage avec du papier abrasif de granulométrie 400
- Rincer les électrodes avec l'eau distillée ;
- Séchage.

II.1.2.4. Protocole

Dans cette expérience :

Mettre 100 ml de l'eau polluée à traiter dans un bécher , un barreau magnétique pour l'agitation, placer les deux électrodes (plaque en acier) branchées avec un générateur par deux pinces (pince d'électrode anode et pince d'électrode cathode) ;

Régler l'intensité de courant et le voltage ;

Puis faire l'agitation de l'eau polluée par un agitateur selon le temps d'électrolyse.

Après l'agitation :

- On ajout une petite quantité 0,01 g de flocculant (amidon) ;
- On laisse l'eau pour décanter pendant 20 à 30 minutes ;
- Filtrer l'eau-décanté à l'aide de montage à filtration ;
- On prélève un petit volume de l'eau avec une seringue pour faire les mesures des paramètres : la turbidité, le pH, la conductivité, TDS, salinité, DCO.



Figure II.2 : La manipulation après l'agitation.

II.2. conditions et technique électrochimique

II.2.1. Technique électrochimique

II.2.1.1. Les électrodes

La cellule électrochimique se compose de trois électrodes :

➤ **Electrode de travail**

Une électrode de travail est une électrode dans un système électrochimique sur laquelle se produit la réaction d'intérêt. L'électrode de travail est souvent utilisée avec une électrode auxiliaire et une électrode de référence dans un système à trois électrodes.



Figure II.3 : Electrode de travail ET.

➤ **Electrode de platine ou la contre électrode**

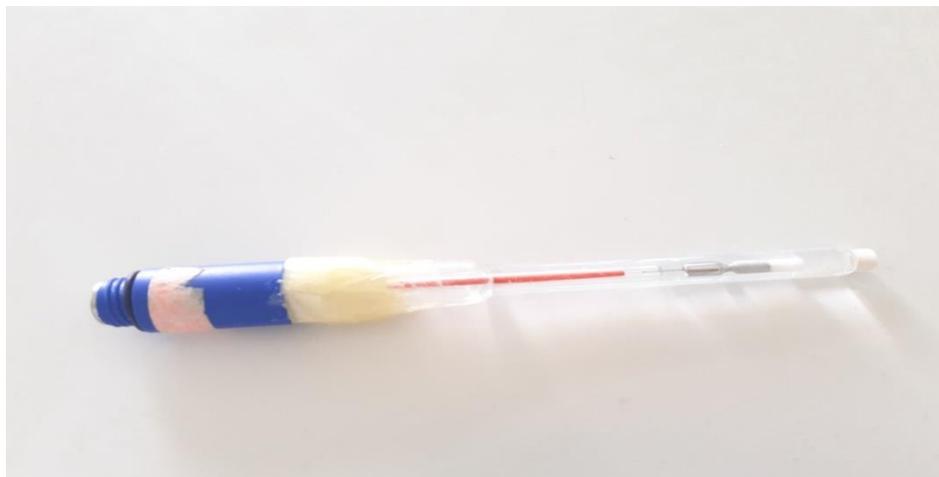


Figure II.4 : Contre électrode.

Le platine est un métal noble, il ne s'oxyde pas (à part dans les conditions bien précises citées plus haut). Dans le cas d'une électrode il joue simplement le rôle du transfert électronique sans être un réactif.

La contre électrode a un fil en platine tissé sous forme de grille.

➤ **Electrode de référence**



L'utilisation d'une électrode de référence permet de comparer les potentiels d'électrodes indicatrices différentes plongées dans une même solution ou celui d'une même électrode indicatrice immergée dans différentes solutions. Cette électrode est saturée de KCL.

II.2.2. Méthode électrochimique

Le dispositif électrochimique utilisé est représenté sur la figure I La cellule électrochimique à trois électrodes, possède une double paroi, qui permet la circulation d'eau afin de maintenir la température du milieu réactionnel constante à $25,0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, qui correspond aux conditions standards.

Les mesures électrochimiques ont été effectuées avec un montage comprenant un

Les courbes de polarisation $i = f(E)$ de l'interface métal-électrolyte sont obtenues par mode potentiodynamique de type SP-300 associé au logiciel EC-lab permettent de déterminer les paramètres électrochimiques : d'un métal au contact d'un électrolyte à savoir : le potentiel de corrosion (E_{cor}), le courant de corrosion (I_{COR}), la résistance de polarisation (R_p).



Figure II.7 : Dispositif expérimental de cellule électrochimique.

II.3. Méthodes d'analyse

On a des appareils spécialisés dans la mesure des paramètres physico-chimiques : PH, la conductivité, turbidité, salinité, DCO et TDS ; Par prélèvement de l'échantillon d'eau dans des flacons.

II.3.1. Mesures de la conductivité

Les mesures de conductivité sont effectuées à l'aide d'un conductimètre Consort model 832 muni d'une cellule de mesure à plaques de platine de type Radiomètre modèle CDC 566T.

Cette cellule comporte une compensation automatique de la valeur de conductivité en fonction de la température de la solution (température de référence : 25°C). La compensation est réalisée par une sonde de température de type Pt 100.

Un conductimètre est un appareil électronique permettant de mesurer la conductivité d'une solution, c'est-à-dire sa capacité à conduire le courant. Cette conductivité, notée σ et exprimée en siemens par mètre, donne des informations importantes sur la minéralisation de l'eau.

II.3.1.1. Mesure de la conductivité de l'eau

La conductivité mesure la facilité avec laquelle l'électricité circule dans l'eau. Tout comme le métal, l'eau peut conduire (transporter) l'électricité. Ceci est en raison du fait qu'il y a des sels dissous dans l'eau. Si vous avez de l'eau pure sans sels, la conductivité sera nulle.



Figure II.8 : Un conductimètre.

La conductivité électrique est définie en siemens par mètre (S.m-1). Il s'agit du rapport de la densité de courant par l'amplitude du champ électrique.

II.3.1.2. La conductivité d'une solution

La conductivité est la capacité d'une solution à faire passer du courant. La conductivité mesure la facilité avec laquelle l'électricité circule dans l'eau.

II.3.2. Mesure de la Salinité

La salinité est la mesure de la quantité de sels dissouts dans un volume donné d'eau. Plus des $\frac{2}{3}$ de la surface terrestre sont couverts d'eau, que ce soit par des mers, des océans, des lacs ou dans les glaciers et les banquises. Avoir recours à un conductimètre.

Cette méthode peut être utilisée pour mesurer la salinité d'une solution ou d'un matériau. La salinité détermine, avec la température, la densité des masses d'eau qui est un paramètre clé de la circulation océanique.

II.3.3. Mesure de la TDS

TDS signifie Total Dissolved Solids, ou le nombre de solides dissous dans l'eau potable. Vous pouvez facilement mesurer combien de substances dissoutes sont présentes dans l'eau avec un compteur TDS. De cette façon, vous connaissez rapidement la pureté de votre eau potable.

La conductivité est l'un des paramètres de calcul.

II.3.4. Mesure de la turbidité

La turbidité est l'effet optique qui traduit le caractère trouble de l'eau. Elle est due à la présence de diverses matières en suspension finement divisées telles que des particules de matières organiques ou minérales. Ces particules ont une taille variant entre 10 nm et 100 µm.

Les unités utilisées pour la turbidité sont les Unités Jackson (JTU), la Néphélométrie Turbidité Unit (NTU) et la Formazine Turbidité Unit (FTU) ou SiO₂ (mg/l).

II.3.4.1. La turbidité de l'eau

La turbidité désigne la teneur d'une eau en particules suspendues qui la trouble.

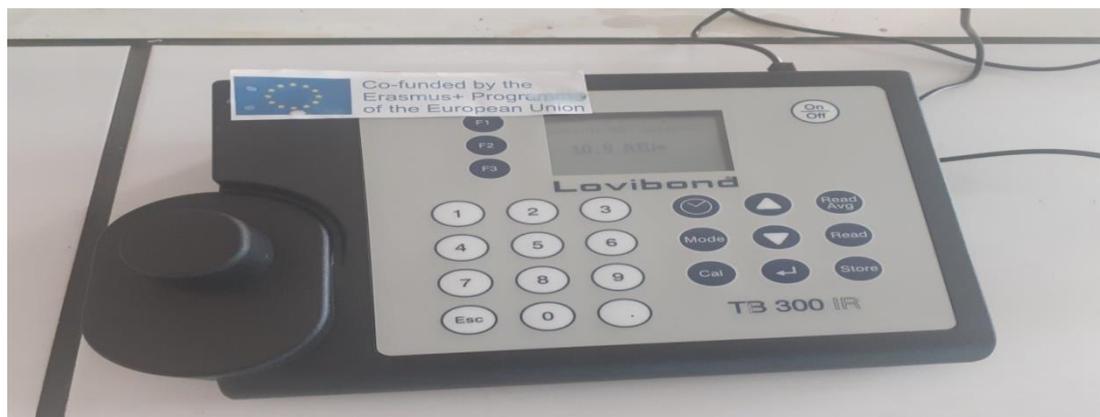


Figure II.9 : Turbidimètre.

Le plus souvent ce traitement est suivi d'un filtre à sable ou d'un filtre bi-couche (anthracite/sable). Correspondance entre unités : Pour des turbidités inférieures à 10 à 20 NFU : 1 NFU = 1 NTU. Au-delà 1 NFU = 0,6 NTU.

I.3.5. Mesure de pH

L'échelle de pH est comprise entre 0 et 14. Une solution dont le pH est compris entre 0 et 7 est acide, si le pH est entre 7 et 14, la solution est basique.

Le pH s'exprime selon une échelle logarithmique de 0 à 14 unités. Une eau « neutre » possède un pH de 7 unités. Un pH inférieur à 7 indique que l'eau est acide alors qu'un pH supérieur à cette valeur indique qu'il s'agit d'une eau alcaline.



Figure II.10 : pH mètre.

II.3.6. Mesure de DCO

La DCO est un paramètre essentiel en matière de traitement d'eau et assainissement. Elle représente la quantité d'oxygène utile pour dépolluer une eau. En toute logique, cette donnée est donc utilisée pour assurer un meilleur suivi de la performance de l'épuration des eaux. La demande chimique en oxygène (DCO) est la concentration massique, exprimée en mg/L, en dioxygène.



Figure II.11 : Spectrophotométrie.

Chapitre III

Résultats et discussions

Ce chapitre représente les résultats expérimentaux obtenus, les mesures du pH, la turbidité, la conductivité, DCO, Salinité, TDS.

L'étude du comportement de l'acier dans l'eau est réalisée par des tests de polarisation et tracés des diagrammes d'impédance. Les résultats obtenus sont illustrés dans les tableaux et figures ci-dessous.

Les tracés des courbes de Tafel nous a permis la détermination des caractéristiques électrochimiques à savoir, la vitesse de corrosion (I_{corr}), potentiel de corrosion (E_{corr}), et la résistance de polarisation (R_p) et la résistance de transfert de charge déterminés par impédance électrochimique.

III.1. Traitement par électrocoagulation

Eau polluée : l'échantillon d'eau prélevé de l'ONA représente les caractéristiques regroupées dans le tableau III.1.

Tableau III.1 : Paramètres caractéristiques de l'eau de l'ONA

Température (C°)	25
pH	7,22
Conductivité (mS/cm)	2,74
Turbidité (NTU*)	127
Salinité	1,4
TDS (mg/l)	1128
DCO (mg/l)	308

III.1.1. Effet du temps d'électrocoagulation

L'eau polluée est traitée par électrocoagulation en variant la durée d'électrolyse (10, 15, 20 minutes), et la l'intensité du courant (0,24; 0,32 ; 0,41 A).

Les valeurs des différents paramètres après traitement sont illustrées dans le tableau III.2.

Dans cette essai, on fixe le courant sur $i=0,24$ A et le voltage $v=20,4$ V pendant $T=10$; 15 ; 20 minutes.

Tableau III.2 : Variation des paramètres physico-chimiques en fonction du temps d'électrolyse.

Temps (min)	10	15	20
Température (C°)	25	25	25
pH	8,68	8,74	9.03

Conductivité (mS/cm)	2,53	2,49	2,35
Turbidité (NTU*)	62.8	57.3	27.6
Salinité	1,3	1,3	1,2
TDS (mg/l)	1040	1023	966
DCO (mg/l)	217	80	75

D'après les résultats obtenus en fonction du temps on a constaté qu'une amélioration de la qualité d'eau est obtenue pour un temps 20 mn ; la turbidité est diminuée de 127 à 27,6 (NTU*) et la DCO de 306 à 75(mg/l).

La diminution de la DCO est due à l'accélération de génération de Fe^{2+} et Fe^{3+} par oxydation électrochimique de l'anode responsable de l'hydroxyde métallique (particules de coagulation de $Fe(OH)_2$ (s) ou $Fe(OH)_3$ (s)) produites par le procédé EC.[80].

1. Les tracés de la variation des différents paramètres en fonction du temps

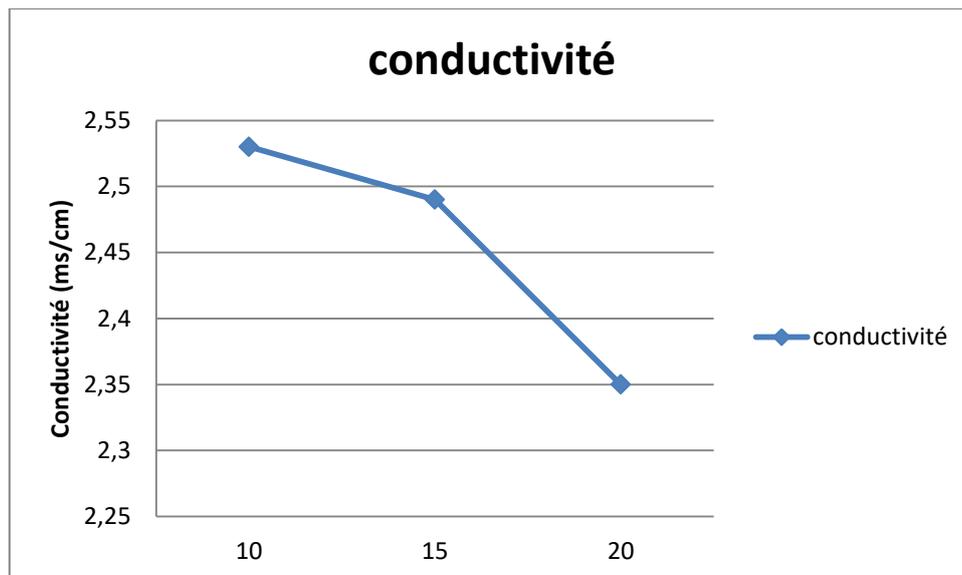


Figure III.1 : Variation de la conductivité en fonction du temps.

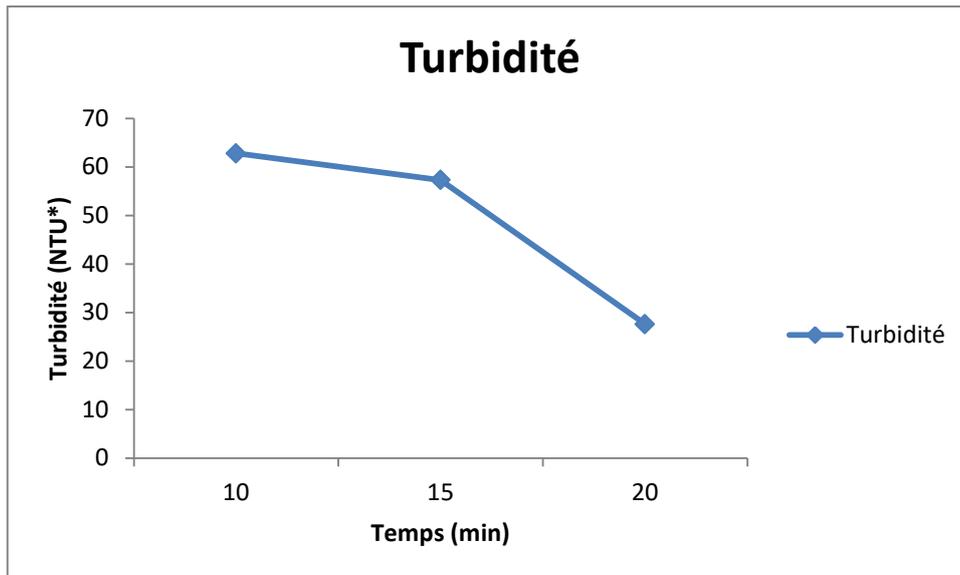


Figure III.2 : Variation de la turbidité en fonction du temps.

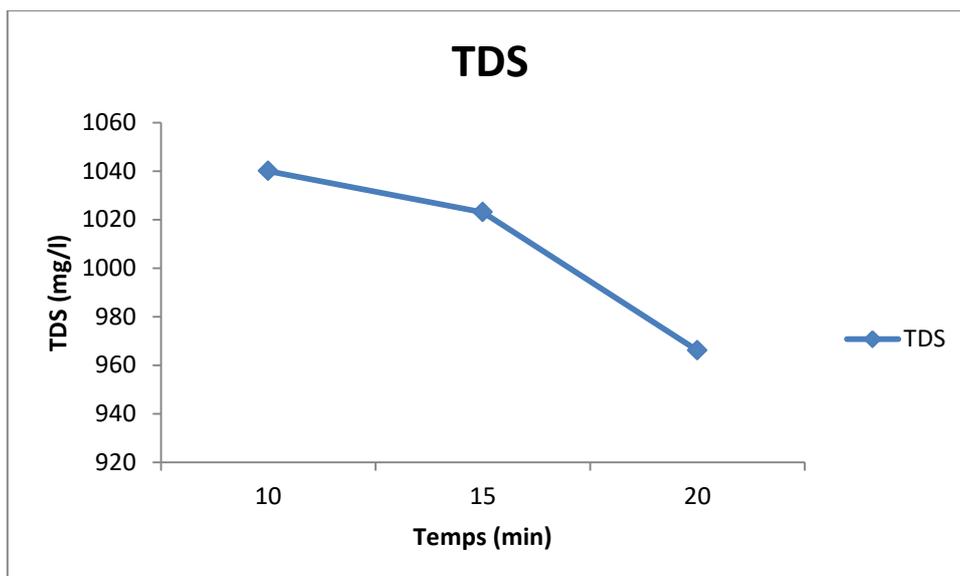


Figure III.3 : Variation de TDS en fonction du temps.

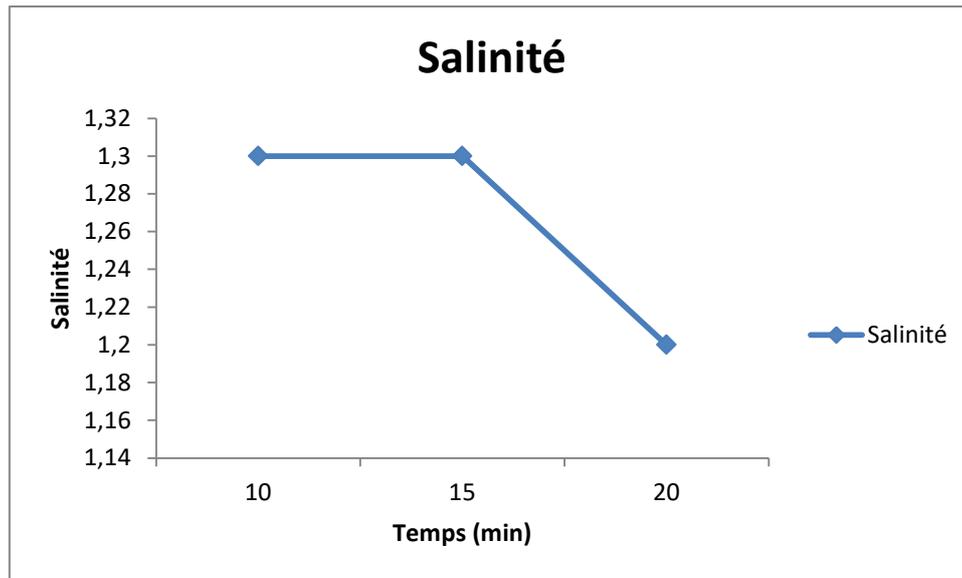


Figure III.4 : Variation de la salinité en fonction du temps.

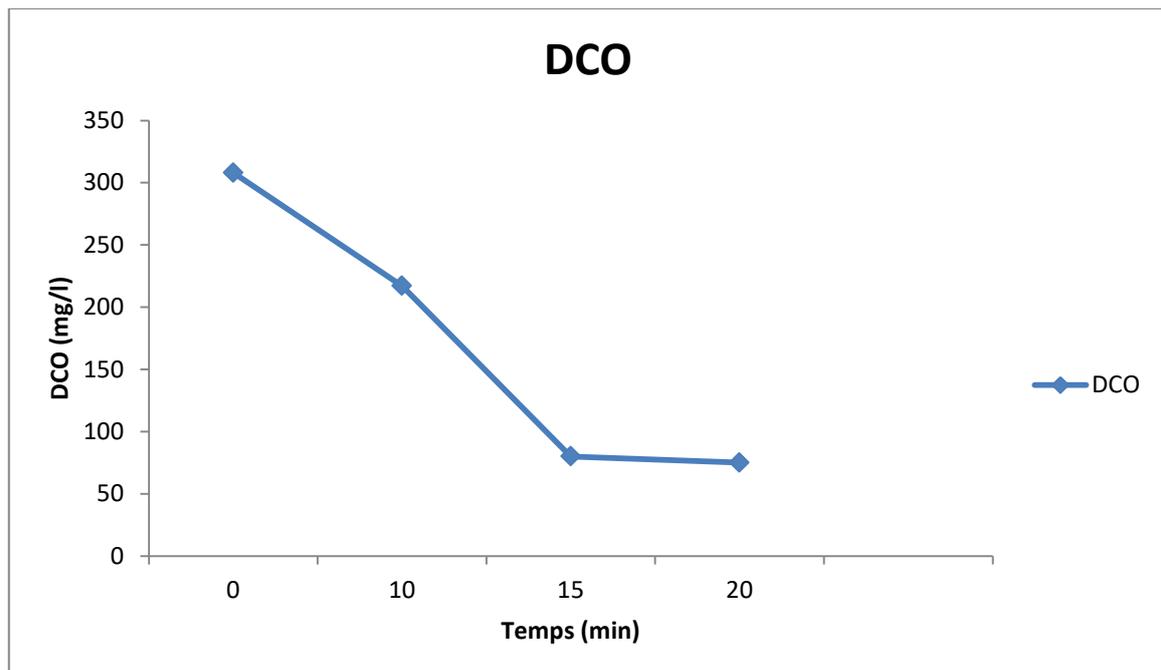


Figure III.5 : Variation de DCO e fonction du temps.

D'après les résultats obtenus pour les différents paramètres, on a constaté que le temps d'électrolyse $t = 20$ min nous a permis de minimiser la turbidité de 127 à 27,6 (NTU*) et la valeur de la DCO de 308 à 75 (mg/l) ce qui signifie une diminution de pollution de l'eau.

Le temps de réaction est l'un des paramètres opérationnels les plus importants pour tous les processus de traitement électrochimique, car, avec l'augmentation du temps de réaction, la

dissolution de l'électrode libère de plus grandes quantités d'ions coagulants dans la solution. L'augmentation du temps d'électrolyse conduit à une augmentation de la quantité du coagulant (libération des ions Fe^{3+}).

III.1.2. Effet de l'intensité du courant :

Tableau III.3 : Valeurs des paramètres après le traitement en fonction de l'intensité de courant.

Courant (A)	0,32	0,41
Température (C°)	20,5	22,1
pH	8,98	9,14
Conductivité (mS/cm)	2,18	2,09
Turbidité (NTU*)	21,9	19,2
Salinité	1,1	1
TDS (mg/l)	895	857
DCO (mg/l)	60	41

D'après les résultats obtenus en fonction du courant $i=0,32$ (A) on a constaté qu'une amélioration de la qualité d'eau est obtenue pour un temps 20 mn ; la turbidité est diminuée de 127 à 21,9 (NTU*) et la DCO est diminuée de 308 à 60 (mg/l).

Pour une valeur du courant $i=0,41$ (A) ; on remarque une diminution de la turbidité de 127 à 19,2 (NTU*) et une diminution de la DCO de 308 à 41 (mg/l).

D'après ces résultats on constate que le temps d'électrolyse $t=20$ min et une intensité de courant $I=0,41$ A, nous donne une certaine efficacité du traitement par électrocoagulation.

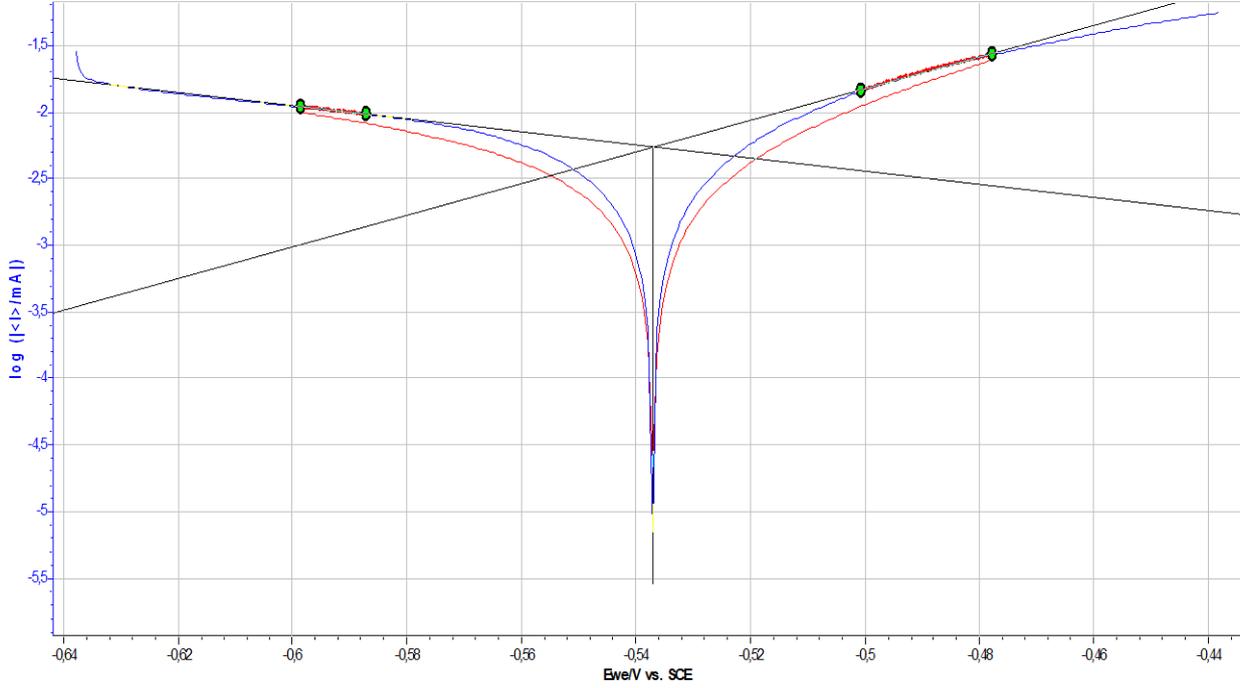
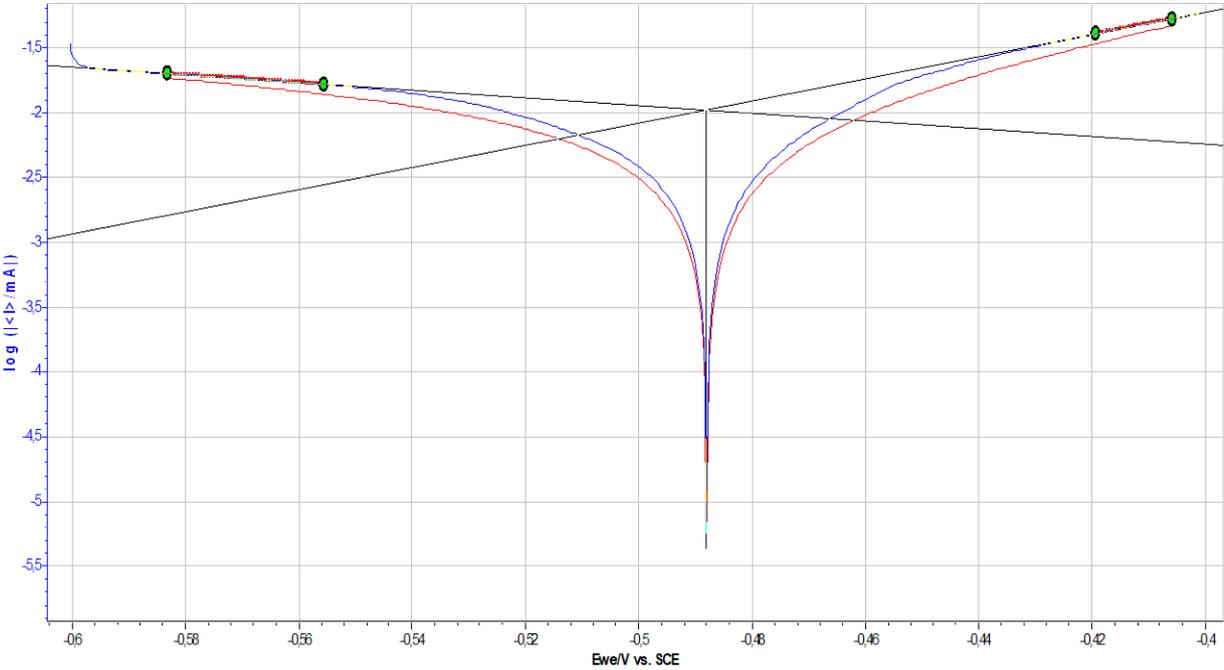
III.2. Etude de la corrosion de l'acier dans l'eau traitée :

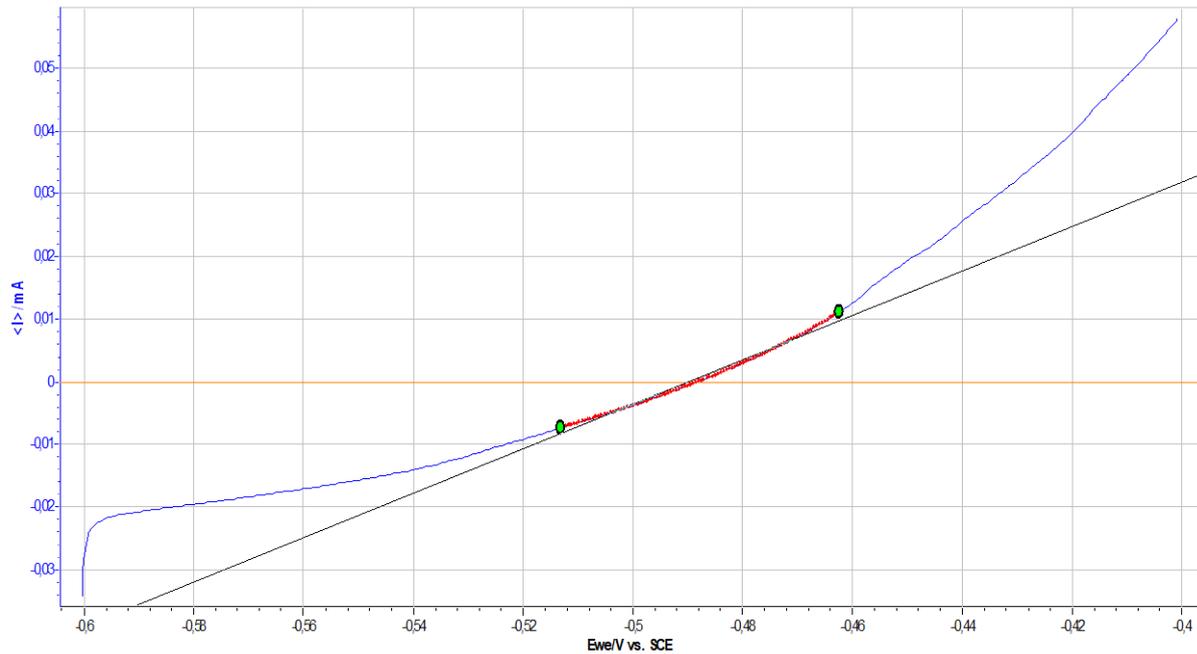
La variation du potentiel traduit une modification notable de l'interface métal/solution et signifie que le système est protégé par la formation d'une couche qui comporte les produits d'oxydation du métal ayant réagi chimiquement avec les constituants du milieu corrosif [81].

III.2.1. Courbes de polarisation

Les courbes de polarisation ont été enregistrées avec une vitesse de balayage de 1.6 mV.s^{-1} dans un intervalle variant de (-100 à +100) du potentiel de corrosion (E_{corr}).

Les courbes de *Tafel* obtenues à partir des tests de polarisation sont utilisées pour déterminer les valeurs des paramètres électrochimiques ; potentiel de corrosion (E_{corr}), l'intensité du courant (I_{corr}) et la résistance de polarisation (R_p).





(c)

Figure III.6 : Détermination des paramètres électrochimiques, courbes de Tafel (a) avant traitement, (b) après traitement, (c) courbe de polarisation (résistance de polarisation).

Les paramètres électrochimiques obtenus à partir des courbes de *Tafel* sont regroupés dans le tableau III.4 :

Tableau III.4: Valeurs des paramètres électrochimiques déterminés à partir des courbes de Tafel.

	E_{corr} (mV)	I_{corr} (μA)	R_p (Ohm)
Avant traitement	-489,6	9,26	2815
Après traitement	-537,01	5,43	3333

Le résultat des tests de polarisation montre que la résistance de l'acier est améliorée après traitement. Le courant de corrosion diminue ce qui signifie une diminution de la vitesse de la corrosion.

III.2.1.1 Diagrammes d'impédance électrochimique

Les diagrammes d'impédance électrochimique ont été tracés dans l'eau polluée avant et après traitement par électrocoagulation dans le domaine de fréquences de 100 kHz à 10 mH. Les courbes montrent un seul demi-cercle ; le diamètre de celui-ci correspond à une résistance de transfert de charge (R_{tc}) (figure III.7).

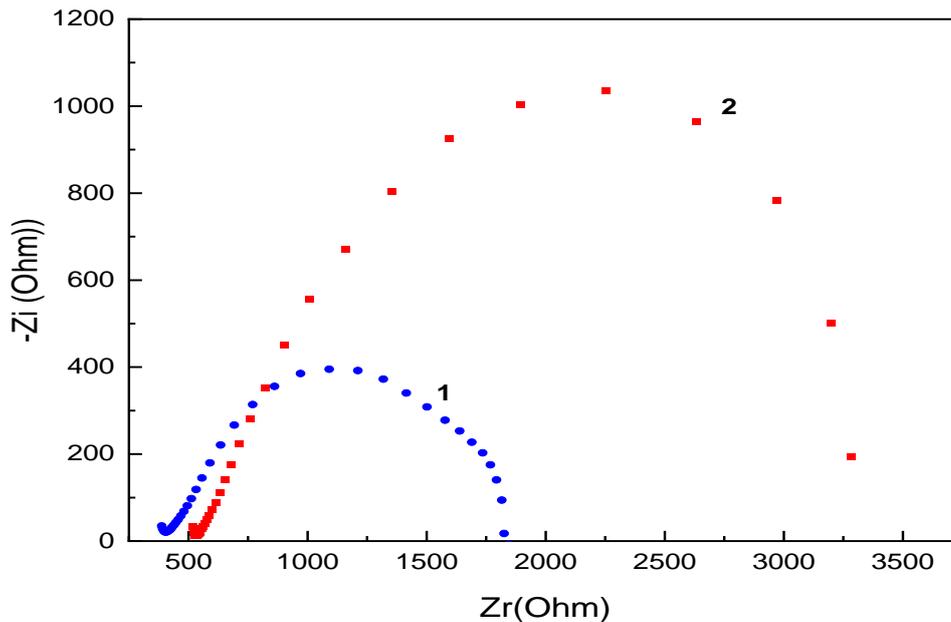


Figure III.7: Diagrammes d'impédance de l'acier obtenus dans l'eau 1) avant traitement, 2) après traitement.

Les paramètres électrochimiques résistance de la solution, résistance de transfert, déterminés à partir des courbes d'impédance, sont regroupés dans le Tableau III.5 :

Tableau III.5 : Valeurs des paramètres électrochimiques obtenues par le fit des courbes d'impédance.

	Rs (Ohm)	Rt (Ohm)
Avant traitement	115.4	2146
Après traitement	554.1	3175

D'après les valeurs obtenues, on remarque que la résistance de transfert de charge augmente après le traitement. Les résultats obtenus par spectroscopie d'impédance électrochimique sont en bon accord avec ceux trouvés par les mesures des courbes de polarisation ; l'augmentation de la résistance de l'acier vis-à-vis du milieu environnant, ce qui confirme une amélioration de la qualité d'eau après traitement par électrocoagulation.

III.3. Détermination de la quantité d'électricité

Loi de Faraday est utilisée pour calculer la quantité d'électricité pour chaque essai

D'après l'équation loi de Faraday (I.1) :

$$m = i \cdot t \cdot M / F \cdot N_e$$

On a : $Q = m \cdot N_e \cdot F / M$.

$$N_e = 3.$$

$$F = 96500 \text{ (c/moles)}.$$

$$M = 56 \text{ (g/moles)}.$$

m : la masse dissoute en gramme.

$$m = \text{masse}_{\text{anode avant traitement}} - \text{masse}_{\text{anode après traitement}}$$

Tableau III.6 : Valeurs des quantités d'électricité pour les essais réalisés

m (g)	0.049	0.117	0.207	0.417	0.476
Q (W)	256.31	604.84	1070.11	2155.74	2460.75

Le tableau III.7 un tableau récapitulatif, regroupe les valeurs des différents paramètres déterminés dans cette étude paramétrique.

Tableau III.7: Valeurs des différents paramètres.

Courant (A)	0.24	0.24	0.24	0.32	0.41
Temps (min)	10	15	20	20	20
Surface immergé (cm ²)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Masse anode après traitement	8.668	8.600	8.510	8.300	8.241
Température(C°)	25	25	25	20.5	22.1
pH	8.682	8.74	9.03	8.98	9.14
Turbidité (NTU*)	62.8	57.3	27.6	21.9	19.2
Conductivité (mS/cm)	2.53	2.49	2.35	2.18	2.09
Salinité	1.3	1.3	1.2	1.1	1
TDS (mg/l)	1040	1023	966	895	857
DCO (mg/l)	217	80	75	60	41
Q (W)	253.31	604.84	1070.11	2155.74	2460.75

	Température(C°)	pH	Turbidité (NTU*)	Conductivité (mS/cm)	Salinité	TDS (mg/l)	DCO (mg/l)
Eau avant traitement	22	7.22	127	2.27	1.4	1128	308

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion

Ce travail est consacré à une étude paramétrique sur l'effet des différents paramètres de traitement par électrocoagulation notamment le temps et l'intensité de courant.

Les résultats obtenus montrent que ces deux paramètres cruciaux présentent un effet sur la diminution de la turbidité et la DCO. D'un autre côté, l'étude de l'effet de l'eau polluée sur le comportement de l'acier est réalisée par les tracés de polarisation et des courbes d'impédance.

L'étude paramétrique nous a montré que :

Des pourcentages élevés d'élimination de la turbidité et la DCO sont obtenus dans les conditions de traitement ; $t = 20$ mn et $I = 0.41$ A

Les tests électrochimiques confirment qu'une meilleure résistance de polarisation est trouvée après un temps de traitement par électrocoagulation $t = 20$ mn et une intensité de courant $I = 0.41$ A.

Bibliographies

- [1]: Y.S. Yıldız, A.S. Koparal, B. Keskinler, Effect of initial pH and supporting electrolyte on the treatment of water containing high concentration of humic substances by electrocoagulation, Chem. Eng. J. 138(2008) : 63–72.
- [2]: Bayramoglu M, Kobya M, Sozbir A, Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. Sep. Purif. Technol, 37(2003):117–125.
- [3]: W. Dastyar, T. Amani and S. Elyasi, Process Safety and Environmental Protection (2015), 95.
- [4]: O. Apaydin, U. Kurt, M.T. Gonullu, An investigation on the treatment of tannery wastewater by electrocoagulation, Global Nest J. 11(2009): 546–555
- [5] :M.Y.A. Mollah, R. Schennach, J.P. Parga, D.L. Cocke, Electrocoagulation (EC)- science and applications, J. Hazard. Mater. 84(2001): 29–41.
- [6]: M. Rebhun, M. Lurie., Control of organic matter by coagulation and floc separation, Water Sci. Technol. 27 (1993): 1–20.
- [7] : adapté de la définition de l'OCDE, 1974, (en) la pollution détruit les forêts transboundary transfer of potentially hazardous substances [archive] et de la définition AFNOR (dictionnaire du vocabulaire normalisé de l'environnement).
- [8]: John D. Spengler et K.A. Sexton, « Indoor air pollution : A public health perspective » , science, vol. 221, n°4605, 1983, P.9-17 [P.9] (DOI 10.1126/science. 6857273).
- [9] : cité par David Clay Large, Berlin (2000) P.17-18.
- [10]: Jeffrey M. Diefendorf et Kirkpatrick Dorsey, City, Country, Empire: Landscapes in Environmental History, University of Pittsburgh Press, 2009 (lire en ligne [archive]), P.44-49).
- [11]: James R. Fleming, Bethany R. Knorr of Colby College, “history of the clean air act” [archive], American Meteorological Society (consulté le 14 février 2006).
- [12]: www.planeteecologie.com.
- [13]: article [archive] Synergie entre pollens et polluants chimiques de l'air: les risques croisés, environnement, risques et santé. Volume 01, numéro 1, 42-9, mars-avril 2002, synthèses.
- [14] : Barletta C, Aix : pollution plein pot en poussette [archive], la Provence, 30 mars 2011.

[15] : avec AFP, « pollution : plus de 30 départements en alerte, transports gratuits en Ile-de-France », le monde. Fr, 14 mars 2014 (lire en ligne [archive]).

[16] : « la pollution à paris en deux photos », le monde.Fr, 14 mars 2014 (lire en ligne [archive]).

[17] : étude portée par la commission « pollution et santé » de the lancet (qui a fait travailler plus d'une quarantaine d'experts durant deux ans).

[18] : (es) « types de pollution –les sources de pollution de l'environnement »[archive].

[19]: ^{a et b} (en) « a spécial report on India : creaking, groaning : infrastructure is india's biggest handicap », the economist. Com, 11 décembre 2008 (lire en ligne [archive]).

[20] : Amirouche. M, B. C. (2007). Etude experimentale pour l'épuration des eaux usées par electroflottation. Mémoire de fin d'étude. Bejaia : université de Bejaia.

[21] : P. Mouchet / Matières particulaires, Techniques de l'ingénieur, G1170, (2005), Paris, France.

[22] :PRONOST J., PRONOST R., DEPLAT R., MALRIEU L., BERLAND J. M.,(2002). Station d'épuration : dispositions constructives pour améliorer leur fonctionnement et faciliter leur exploitation. Document technique, Fndae n° 22.p 18.

[23] : LADJEL ET BOUCHEFER, (2011).Exploitation d'une STEP à boue activées niveau. p 11- 18

et 19.

[24] :DEGRIMENT, (1989). Mémento technique de l'eau : vol 1. 2ème édition. Ed Techniques et

Documentation. Lavoisier. Paris. p 190.

[25] : mémoire 2019 Bordj Bou Arreridj étude électrochimique de l'effet de l'eau polluée sur la dégradation de l'acier préparé par Zehar et Beldjoudi.

[26]: M. J. Matteson, R. L. Dobson, R. W. Glenn, Jr. N. S. Kukunoor, W. H. Waits III, E. J. Clayfield, Electrocoagulation and separation of aqueous suspension of ultrafine particles, colloids surf. A: physicochem. Eng. Aspects . 104 (1995) 101-109.

[27]: L. J. J. Janssen, Koene, The role of electrochemistry and electrochemical technology in environmental protection, Chem. Eng. J 85 (2002) 137-146.

- [28] G. Milazzo, Electrochimie Tome 1, Edition Dunod, Paris, (1969).
- [29]: C. F Bonilla, Possibilities of the electronic coagulator for water treatment, Water and sewage, 3, (1947) 21-25.
- [30]: E. C Beck, A. O Giannini , et E. R. Ramirez , Electrocoagulation clarifies food wastewater , Food . Technol . , 28 (2), (1974) 18-22.
- [31]: Picard, Contribution à l'étude des réactions aux électrodes en vue de l'application à L'électrocoagulation, thèse de doctorat, universités de Limoges (2000).
- [32]: Bollina, Possibilities of the electric coagulator for water treatment. Water and Sewage, 3, 21-25, (1947).
- [33]: M.Y.A. Mollah , R. Schennach , J.R. Parga , D.L. Cocke , Electrocoagulation (EC) - science and applications , J. Hazard . Mater. 84 (2001) 29-41.
- [34]: J. Miquel, L'épuration électrolytique des eaux résiduaires industrielles. Technique moderne 1 (1977) 31-33.
- [35] : F. Persin, M. Rumeau, Le traitement électrochimique des eaux et des effluents, tribune de l'eau 3 (1989) 45-56.
- [36]: Cenkin et Belevtsev (1985)
- [37]: Larue, E. Vorobiev, Electrocoagulation of wastewaters, Inter. j. min. proc., 71, 1 (2003).
- [38]: M. Kobya, O.T. Can, M. Bayramoglu , Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes . J. Hazard. Mater. 100 (2003) 163-178.
- [39]: S.H. Lin, C.F. Peng , electrochemical method , Wat . Res. 28 (1994) 277-282.
- [40] : N. Mameri , A. R. Yeddou , H. Lounici , D. Belhocine , H. Grib , et D. Bariou , Defluoridation of septentrional sahara water of North Africa by electrocoagulation process using bipolar aluminium electrodes , Wat . Res . 32 (5) , (1998) 1604-1612 .
- [41]: J.S. Do, M.L. Chen, Decolorization of dye - containing solutions by electrocoagulation , J. Appl. Electrochem . 24 (1994) 785-790.
- [42] :U.B. Ogutveren , N. Gonen , A.S.Koparal , Removal of dye stuffs from waste water :

electrocoagulation of Acilan Blau using soluble anode , J. Environ . Sci. Health A 27 (1992) 1237-1247.

[43]: O. Larue, E. Vorobiev , C178 sur 190 electrocoagulation and coagulation by iron of latex particles in aqueous suspensions . Sep. Purif. Technol. 31 (2003) 177 105 Stainless Steel Electrode, Adv. Environ. Res. 6 (2002) 325-333.

[44]: J.R. Parga , D.L. Cocke , J.L. Valenzuela , J.A. Gomes , M. Kesmez , G. Irwin , H. Moreno , M. Weir , Arsenic removal via electrocoagulation from heavy metal contaminated groundwater in La Comarca Lagunera México , J. Hazard . Mater . B 124 (2005) 247-254 .

[45] : N. Adhoum , L. Monser , N. Bellakhal , J.E. Belgaied , Treatment of electroplating wastewater containing Cu^{2+} , Zn^{2+} and $Cr(VI)$ by electrocoagulation , J. Hazard . 14 . D11A / 00013 307 313 O.

[46]: DAUFIN (G.) et SAINCLIVIER (M.) (1967). - Revue bibliographique sommaire des travaux consacrés à la corrosion métallique en laiterie. Le Lait, XLVII,469-470, 613-632.

[47]: .P.L.VERONIQUE NOBEL ... " Etude du mécanisme d'action de monofluorophosphate de sodium comme inhibiteur de la corrosion des armatures métalliques dans le béton " Université Pierre & Marie Curie , Paris 6 , Février 2004 , pp 21-23 , pp 47-51 .

[48] :NADIR .D « Introduction à la corrosion et aux inhibiteurs de corrosion », Livre Edition : 1.03.4278 (2004), Pages (6-7). .

[49] :NADIR .D « Introduction à la corrosion et aux inhibiteurs de corrosion », Livre Edition : 1.03.4278 (2004), Pages (6-7). .

[50]: BOUMEGUET.F et IABBASSEN.D « Étude de l'inhibition de la corrosion de zinc dans l'acide chlorhydrique par l'extrait de la plante d'Ortie », مذكرات Mémoire de fin d'études, BEJAIA, , Université A.MIRA, (2017)..

[51] :BAROUD.A.D et BOUKABOUYA.H, « Synthèse et caractérisation des hétérocycles azotés à partir des chalcones et l'hydrazine : Application à l'inhibition de la corrosion des aciers », -Saïda, mémoire de Master université Dr Moulay Tahar, 2017.

[52] :BENSAADA.S, Cours de corrosion ; Livre en ligne.

[53] :SUTTER.B, Les conférences du CETIM corrosion et anticorrosion,, 1998.

[54] :A. M. J. P. J. T. J. BERNARD, Métallurgie Générale, Masson, Paris: 2ème Edition,, , 1991.

- [55] :D. Landolt, « Traité des matériaux, corrosion et chimie des surfaces des matériaux », Ed. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, pp188-200. ISBN2-88074-245-5 (1993).
- [56]: D. Landolt, Corrosion et chimie de surfaces des métaux, vol. 12 (PPUR pressespolytechniques, 1997). URL :https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=OOYFePi2YwC&oi=fnd&pg=PA1&dq=landolt+corrosion+chimie&ots=amnu7E7InP&sig=eczUw3nLNmi6RzNWM T2Bm_nOPBM. I.2, B
- [57]: G. S. Frankel, "Pitting Corrosion of Metals A Review of the Critical Factors," Journal of The Electrochemical Society 145, 2186–2198 (1998). URL : <http://jes.ecsdl.org/content/145/6/2186>. I.1.3, I.3, b, B
- [58] : T. Okada, "A Theory of Perturbation Initiated Pitting," Journal of The Electrochemical Society 132, 537–544 (1985). URL : : <http://jes.ecsdl.org/content/132/3/537>. a
- [59]: T. Shibata, "Passivation of metals and semiconductors Stochastic studies of Passivity breakdown," Corrosion Science 31, 413–423 (1990). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0010938X9090140Z.a>
- [60]: T. Shibata et T. Takeyama, "Stochastic Theory of Pitting Corrosion," Corrosion33, 243–251 (1977). URL : <http://www.corrosionjournal.org/doi/abs/10.5006/0010-9312-33.7.243>. a
- [61] :A.Benyachi, M.Roch, J.Pagetti, M. Troquet, Matériaux et technique 76(1988) 36.
- [62]: N.Redon. Resistance à la corrosion des fils copper Ni-Ti 35 et des fils acier inoxydable multi brins D-Rect en milieu acide. Mémoire pour l'obtention du certificat d'études cliniques spéciales mention orthodontie. Université Lorraine. 2012.
- [63]:. M.Aliouat. M. Rouissat. « Etude de la corrosion bactérienne des aciers API – 5L grade B pour pipelines Utilisés dans le transport d'eau ». Mémoire en Science et Génie des Matériaux. Ecole national supérieure des mines et métallurgie Annaba. 2015.
- [64]: D. LANDOLT, "Traité des Matériaux Corrosion et Chimie de Surfaces des Métaux", pages 3;9;10;11,1993.
- [65]: D.Landolt. « Corrosion et chimie de surface des matériaux. Presse polytechniques et universitaires romandes. 1997.
- [66]:D. Landolt, « Corrosion et chimie de surfaces des métaux », Traité des matériaux, Presses polytechniques et Universitaires Romandes (1993).

[67] : M.Pourbaix; Atlas d'équilibre électrochimique à 25 0c; Gauthiers-Villars; Paris. (1963).

313-312

[68]: AUDISIO, S., MAZILLE, H., SINICKI, C., Corrosion des métaux et alliages: corrosion et génie industriel (document de stage, formation continue), Centre d'actualisation scientifique et technique INSA-Lyon, 1984;

[69]: KEDDAM, M., OLTRA, R., DURET-THUAL C., Contrôle et suivi de la corrosion: Tests et méthodes In NORMAND, B., PEBERE, N., RICHARD, C., WERY, M. Prévention et lutte contre la corrosion, Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 445-482, ISBN 2-88074-543-8, 2004;

[70]: KEDDAM, M., MILLET, J.P. Caractérisation électrochimique de la corrosion, In BERANGER, G., MAZILLE, H., Corrosion des métaux et alliages-Mécanismes et phénomènes, Hermès Science Publication Paris: Lavoisier, 139-160, ISBN 2-7462-0466-5, 2002;

[71]: MENDIBIDE, C., Caractérisation de revêtements PVD nanostructurés à base de nitrures de métaux de transition pour application mécanique, Thèse génie de matériaux, Lyon: INSA de Lyon, 179pp, N° 05 ISAL 0039, 2003;

[72] : BOMMERSBACH, P., ALEMANY-DUMONT C., MILLET J.P., NORMAND B., Formation and behaviour study of an environment-friendly corrosion inhibitor by electrochemical methods, *Electrochimica Acta*, 51, 6, 1076-1084, 2005;

[73] : PECH, S.R., Etude du comportement anti-corrosion de revêtements amorphes base Si élaborés par dépôt chimique en phase vapeur assisté plasma, Thèse génie de matériaux, Lyon: INSA de Lyon, 199pp, N° 2006 ISAL 0092, 2006;

[74] : J.-P.Diard, B. Le Gorrec, C. Montella, *Cinétique électrochimique*, Hermann, Paris (1996).

[75]: N. ARBAOUI, "Effet du gradient de température sur la vitesse de corrosion des concentriques de traitement des puits producteurs d'eau Albien", mémoire de Magister, université de Ouargla, 2004, pages 40 -42.

[76]: Helie M., *Matériaux métalliques - Phénomènes de corrosion*, Université d'Evry – Val d'Essonne

[77]: Stern M., Geary A., A theoretical analysis of the shape of polarization curves, *Journal of the Electrochemical Society*, 104 (1) 56-63, 1957.

[78] : Valeur supérieur de la teneur de carbone : « les alliages fer –carbone contenant plus de 2% de carbone constituent les fontes » Philibert et al. ,Métallurgie du minerai au matériaux (Dunod, 2002),p.660.

[79]: Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) : A Review Study of Basic Aspect of the corrosion Mechanism Applied To Steels Héctor Hernández,Adriana M. Ruiz Reynoso, Juan C. Trinidad González, Carlos O.González Morán, José G .Miranda Hernández, Aracelie Mandujano Ruiz, Jorge Morales Hernández and Ricardo Orozco Cruz.

DOI: 10.5772/intechopen.94470

[80] :Félix Fridolin Nyounäi et al /International Journal of ChemTech Research, 2019,12(3): 169-176

[81] : J. MULLER, thèse de Doctorat, Université Paris Est 2010 (France).

ملخص:

يقدم هذا العمل دراسة لفعالية العلاج بالتخثير الكهربائي للمياه الملوثة. يتم إجراء الدراسة وفقاً لوقت التحليل الكهربائي والمعايير الحالية. يتم تقييم كفاءة العملية عن طريق قياس التعكر و COD من أجل تحضير ظروف التشغيل مثل كثافة التيار ووقت التحليل الكهربائي. أظهرت النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها أن التعكر يصل إلى قيمة منخفضة لوقت التحليل الكهربائي 20 دقيقة ، ومعدل تأكل منخفض ومقاومة استقطاب أفضل تعطى من خلال هذه القيمة لوقت التحليل الكهربائي 20 دقيقة. تؤكد هذه النتائج أن وقت التحليل الكهربائي والتيار هما معلمتان أساسيتان لعلاج التخثير الكهربائي.

الكلمات المفتاحية: المياه الملوثة ، التخثير الكهربائي ، التيار ، التعكر ، مقاومة الاستقطاب

Résumé

Ce travail présente une étude de l'efficacité du traitement par électrocoagulation de l'eau polluée. L'étude est réalisée en fonction des paramètres temps d'électrolyse et le courant. L'efficacité du procédé est évaluée par la mesure de la turbidité et la DCO afin de préparer les conditions de fonctionnement telle que la densité de courant et le temps d'électrolyse. Les résultats expérimentaux obtenus montrent que la turbidité atteint une faible valeur pour un temps d'électrolyse de 20 min, une faible vitesse de corrosion et une meilleure résistance de polarisation est donnée par cette valeur pour un temps d'électrolyse de 20 min. Ces résultats confirment que le temps d'électrolyse, le courant sont des paramètres cruciaux pour le traitement par électrocoagulation.

Mots clés : Eau polluée, l'électrocoagulation, courant, turbidité, résistance de polarisation

Abstract

This work present a study of the electrocoagulation treatment efficiency on the polluted water. The study is carried out according to the electrolysis time and current parameters. The efficiency of the process is evaluated by measuring the turbidity and the DCO in order to prepare the operating conditions such as the current density and the electrolysis time. The experimental results obtained show that the turbidity reaches a low value for an electrolysis time of 20 min, a low corrosion rate and better polarization resistance were obtained for an electrolysis time of 20 min. These results confirm that the electrolysis time and current are crucial parameters for electrocoagulation treatment.

Key words: polluted water, electrocoagulation, current, turbidity, polarization resistance