

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

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

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Génie de l'environnement.

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLÔME DE MASTER

FILIÈRE: Génie des procédés

Spécialité : Gestion des changements environnementaux en Méditerranées

Par

➤ **Maazouz Fatima Zahra**

Intitulé

*Traitement par électrocoagulation des eaux usées industrielles-
Unité EMBAG de Bordj Bou Arreridj.*

Soutenu le : 29 juin 2025

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Établissement</i>
<i>Mme. M.Merzougui</i>	<i>MCA</i>	<i>Présidente</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mme. H. Faid</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadrant</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mme. N. Maghraoui</i>	<i>MCB</i>	<i>Examinatrice</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2024/2025.

Résumé

L'électrocoagulation est une méthode moderne et écologique pour traiter les eaux usées industrielles, elle utilise un courant électrique pour générer des coagulants (ions de fer). Ce procédé permet d'éliminer un grand nombre de polluants.

Notre étude est concentrée sur le traitement des eaux usées de l'usine EMBAG à l'aide de cette technique. Nous avons examiné l'impact de paramètres clés tels que l'intensité du courant, le temps d'agitation et le pH. Après le traitement, nous avons mesuré les différents paramètres à savoir TDS, la salinité, les MES et la turbidité.

Les différents résultats expérimentaux ont démontré une épuration optimale de 99,66 % de la turbidité, atteinte avec un courant =1 A, pH =7,10 et un temps=10min.

Mot clé : l'électrocoagulation ; eaux usées ; turbidité ; industrielles.

Abstract

Electrocoagulation is a modern and ecological method for treating industrial wastewater, using an electric current to generate coagulants (iron ions). This process allows for the removal of a large number of pollutants.

Our study focuses on the treatment of wastewater from the EMBAG factory using this technique. We examined the impact of key parameters such as current intensity, stirring time, and pH. After treatment, we measured various parameters, namely TDS (Total Dissolved Solids), salinity, TSS (Total Suspended Solids), and turbidity.

The various experimental results demonstrated an optimal purification of 99.66% for turbidity, achieved with a current of 1 A, pH of 7.10, and a time of 10 minutes.

Keywords: electrocoagulation; wastewater; turbidity; industrial.

ملخص

تعد المعالجة الكهربائية طريقة حديثة وصديقة للبيئة لمعالجة مياه الصرف الصناعي، حيث تستخدم تيارًا كهربائيًا لتوليد مواد متخثرة (أيونات الحديد). تسمح هذه العملية بإزالة عدد كبير من الملوثات.

تركز دراستنا على معالجة مياه الصرف الصحي الخاصة بمصنع EMBAG باستخدام هذه التقنية. لقد فحصنا تأثير المعلمات الرئيسية مثل شدة التيار، ووقت التحريك، ودرجة الحموضة (pH) بعد المعالجة، قمنا بقياس معلمات مختلفة وهي: إجمالي المواد الصلبة الذائبة (TDS)، والملوحة، والمواد العالقة الكلية (MES)، والعاكسة.

أظهرت النتائج التجريبية المختلفة كفاءة إزالة مثالية للعاكسة بنسبة 99.66%، تم تحقيقها بتيار قدره 1 أمبير، ودرجة حموضة 7.10، وزمن قدره 10 دقائق.

الكلمات المفتاحية: المعالجة الكهربائية؛ مياه الصرف الصحي؛ العاكسة؛ صناعية.



Remerciment

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au soutien de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude;

J'adresse toute ma reconnaissance à l'encadreur de ce mémoire le professeur Madame **H. Faid** pour sa patience, et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion ,votre précieux soutien pour moi dans la réalisation de cette recherche merci beaucoup pour votre disponibilité avec moi , DIEU vous bénisse.

Je tiens a aussi à remercier Madame **M.Merzougui** pour m'avoir un grand honneur on acceptant de présider le jury.

Je remercie Madame **N. Maghraoui** d'avoir accepté d'examiner ce travail.

2025



Dédicace

Louange à **ALLAH** en premier et en dernier, extérieurement et intérieurement, à Lui la grâce à chaque pas, et la réussite dans chaque effort. C'est Lui qui m'a facilité ce chemin, m'a accordé la patience et la lumière, à Lui la louange, telle qu'elle sied à la majesté de Son Visage et à la grandeur de Sa souveraineté.

À ceux qui ont semé dans mon cœur les graines de l'ambition et les ont arrosées d'une tendresse inégalée...

À mes **chers parents**, mon premier refuge et mon soutien éternel, je vous dédie le fruit de cet effort engagé de loyauté et de gratitude. Sans vos prières, votre patience et la grandeur de vos cœurs, je n'aurais jamais atteint ce stade.

À mes **frères et sœurs**, compagnons du cœur et de l'âme, vous avez toujours été un soutien sincère et silencieux, je puise en vous ma force lorsque mes pas faiblissent ; vous avez une part dans cette réussite.

À tous ceux qui m'ont tendu la main, ne serait-ce qu'avec une parole sincère ou une prière discrète, vous êtes les étoiles de ce voyage, sans qui sa lumière n'aurait été complète.

Fatima Zahra .



Table des matières

Remerciement

Dédicace

Liste d'abréviations

Liste figures

Liste tableaux

Introduction

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

1.1. Pollution de l'eau	4
1.2. Origines de la pollution des eaux.....	5
1.2.1. Pollution d'origine domestique.....	5
1.2.2. Pollution d'origine industrielle	6
1.2.3. Pollution d'origine agricole	6
•Nitrates	7
1.2.4. Pollution d'origine naturelle	7
1.2.5. Pollution par les eaux pluviales.....	7
1.3. Principaux types de pollution des eaux	8
1.3.1. Pollution physique.....	8
1.3.2. Pollution thermique	8
1.3.3. Pollution radioactive	8
1.3.4. Pollution chimique	8
1.3.5. Pollution microbiologique.....	9
1.3.6. Pollution par le phosphore.....	9
1.4. Caractéristiques des eaux usées.....	9
1.4.1. Paramètres physiques.....	10
1.4.1.1. Température	10
1.4.1.2. Matières en suspension (MES).....	10
1.4.2. Paramètres organoleptiques.....	10
1.4.2.1. Turbidité.....	10
1.4.2.2. Couleur	10
1.4.3. Paramètres chimiques.....	11

1.4.3.1. Potentiel hydrogène (pH)	11
1.4.3.2. Conductivité	11
1.4.3.3. L'oxygène Dissous	12
1.4.3.4. Demande Chimique en Oxygène (DCO).....	12
1.4.3.5. Demande Biochimique en Oxygène (DBO).....	12
1.4.3.6. Azote	13
1.4.3.7. Nitrates	13
1.4.3.8. L'azote ammoniacal.....	13
1.4.3.9. Phosphore.....	13
1.4.3.10. Sulfate	13
1.4.4. Paramètres bactériologiques.....	14
1.5. Effets des eaux sur la santé et l'environnement.....	14
1.5.1. Effets sur la santé.....	14
1.5.2. Effets sur l'environnement.....	14
1.6. Historique du traitement des eaux en Algérie	14
1.6.1. Importance du traitement des eaux.....	15
1.6.2. Caractéristiques des eaux usées par secteur industriel.....	15
1.6.3. Les étapes et les méthodes de traitement des eaux usées.....	18
1.6.3.1. Prétraitement des eaux	19
1.6.3.2. Dégrillage-tamassage	19
1.6.3.3. Dessablage.....	19
1.6.3.4. Dégraissage-déshuilage.....	19
1.6.3.5. Traitement primaire Coagulation-floculation.....	20
1.6.4.1. Traitement secondaire.....	22
A/ Traitement biologique anaérobie.....	22
B/ Traitement biologique aérobie.....	22
C/ Systèmes à boues activées	23
D /Lits bactériens	24
E/ Lagunage	24
1.6.5.1. Traitement tertiaire	24
A/ Désinfection	24
B/ Neutralisation des métaux.	24
1.7. Les normes de rejets.....	25
1.7.1. Normes internationales.....	25

1.7.2. Normes Algériennes.....	26
1.7.3. Les Effluents de l'industrie de papier.....	26
1.8. Techniques de traitement.....	27

Chapitre 2 : Techniques expérimentales

2.1. Représentation de la société	31
2.1.1. La Société EMBAG SPA	31
2.1.2. Protocole de Mise en Marche de la Station.....	32
2.2. Matériels et méthodes.....	34
2.2.1. Matériels.....	34
2.2.2. Caractéristique de l'eau usée industrielle à traiter.....	35
2.3. Paramètres physico-chimiques	35
2.3.1. Potentiel Hydrogène (pH)	35
2.3.2. Conductivité	36
2.3.3. Jar-test	36
➤Étapes de l'Expérience	37
2.3.4. Turbidité.....	38
2.3.5. Matières en Suspension (MES).....	38
2.4. Méthodes de traitement	39
2.4.1 Coagulation et Flocculation	39
2.4.2. L'Électrocoagulation (EC).....	40
2.4.2.1. Principe	42

Chapitre 3 : Résultats et discussion

3. Méthodes.....	44
3.1. Protocole de mise en marche de la station.....	44
3.2. Protocole de traitement par électrocoagulation.....	44
3.2.1. Caractérisation de l'effluent brut	45
3.2.2. Démonstration d'un réacteur d'électrocoagulation	45
3.2.3. Procédure de traitement.....	45
3.2.4. Les effets de différentes paramètres étudier.....	48
3.3.1. Analyse des courbes	49
3.3.2. Analyse des Données d'Électrocoagulation à 0.5 A.....	52

3.3.2.1. Analyse des variations de turbidité et de pH (0.5A)	52
3.3.2.2. Évolution de tous les paramètres en fonction du temps (pour 0,5 A)	53
3.3.3. Analyse des Données d'Électrocoagulation à 1 A	56
3.3.3.1. Analyse des variations de turbidité et de pH (1A)	56
3.3.3.2. Évolution de tous les paramètres en fonction du temps (pour 1 A)	56
3.3.3. 3. Analyse des variations des paramètres en fonction de courante a temps d'agitation (10 min)	60
3.3.3. 4. Analyse des variations des paramètres en fonction de pH à (10min ;1A).....	67
3.4. Le taux d'élimination.....	68
3.4.1. Analyse des Taux d'Élimination (Turbidité et MES)	68
Conclusion.....	70

Liste d'abréviations

EC	L'électrocoagulation
BBA	Bordj Bou Arreridj.
DBO	Demande biologique en oxygène
DCO	Demande chimique en oxygène
pH	Le potentiel hydrogène
OMS	L'organisation mondiale de la santé
MES	Matières en Suspension
UTN	Unité de Turbidité Néphélométrique.
DC	Courant continu
TDS	Total des solides dissous
COHA	composés organiques halogénés adsorbables

Liste de figures

Figure 01 : Canaux d'évacuation des eaux usées.....	4
Figure 02 : Rejet des eaux usées industrielle (unité affinage de plomb –Sétif).....	5
Figure 03 : les eaux usées domestiques.....	6
Figure 04 : les eaux agricoles.....	7
Figure 05 : Etapes d'une filière de traitement des eaux.	19
Figure 06 : Schéma représentatif d'un dessableur-déshuileur	21
Figure 07 : Schéma expliquant le processus de coagulation-floculation	22
Figure. 08. Schéma de coagulation floculation suivis d'une décantation et une filtration.....	23
Figure. 09. Schéma simplifié d'un système à boues activées	24
Figure .10. Schéma d'une station d'épuration des eaux industrielle	26
Figure. 11. Matériaux impliqués dans la fabrication du papier et matières rejetées	28
Figure 12 : Diagramme de prédominance des différents hydroxydes de fer trivalents	30
Figure .13. Société EMBAG BBA.....	33
Figure.14 . Le processus de l'impression.....	34
Figure .15. Station d'épuration des eaux usées industrielles de l'unité EMBAG BBA.....	35
Figure. 16. pH-mètre.....	36
Figure .17. Conductimètre.....	38
Figure 18. Jar Test.....	38
Figure .19. Turbidimètre.....	39
Figure .20. Mesure de la MES.....	40
Figure .21. Phénomène de coagulation-floculation chimique.....	41
Figure .22. Traitement par électrocoagulation.....	42
Figure .23. Schémas du procédé d'électrocoagulation.....	43
Figure .24. Une représentation de processus de coagulation-floculation.....	46

Figure .25. Représentation schématique de processus de l'électrocoagulation.....	49
Figure .26. L'évolution de turbidité en fonction de pH a 0,5A.....	51
Figure .27. L'évolution des paramètres physico-chimique en fonction de temps a 0,5A.....	52
Figure .28. L'évolution de turbidité en fonction de pH a 1A.....	54
Figure .29. L'évolution des paramètres physico-chimique en fonction de temps a 1A.....	55
Figure .30. L'évolution des paramètres physico-chimiques fonction de courant a 10min.....	57
Figure .31. L'évolution des paramètres physico-chimiques de l'échantillons d'eau traitée par la technique de l'électrocoagulation en fonction de Ph à (courant=1A ;temps=10min).....	62
Figure .32. L'évolution de conductivité en fonction de pH à(10min ;1A).....	62
Figure .33. L'évolution de salinité en fonction de pH à (10min ;1A).....	63
Figure .34. L'évolution de TDS en fonction de pH à (10min ;1A).....	63
Figure .35. L'évolution de MES en fonction de pH à (10min ;1A).....	64
Figure .36. L'évolution de turbidité en fonction de pH à (10min ;1A).....	64
Figure .37. Taux d'éliminations de MES à 0.1A.....	66
Figure .38. Taux d'éliminations de turbidité à 0.1A.....	66
Figure .39. Taux d'éliminations de turbidité et MES à 0,5A.....	67
Figure .40. Taux d'éliminations de turbidité et MES à 1A.....	68

Liste des tableaux

Tableau 01 : La variation de l'acidité d'une eau en fonction du pH.....	11
Tableau 02: La quantité de sels dissous dans l'eau en fonction de la conductivité..	12
Tableau03 : Contenu des eaux usées types dans certaines grandes industries.	16
Tableau. 04. Normes de rejet internationales.	26
Tableau .05. Normes de rejets dans un milieu récepteur.....	27
Tableau. 06. Les paramètres physico-chimiques de l'échantillons d'eau avant le traitée par la technique de l'électrocoagulation.....	36
Tableau .07. Qualité des eaux en fonction de la conductivité.....	37
Tableau. 08. L'évolution des paramètres physico-chimiques de l'échantillons d'eau traitée par la technique de l'électrocoagulation en fonction de l'intensité du courant (0 ,1A) du temps et du pH	50
Tableau .09. L'évolution des paramètres physico-chimiques de l'échantillons d'eau traitée par la technique de l'électrocoagulation en fonction de l'intensité du courant (0,5A) du temps et du pH.....	54
Tableau .10. L'évolution des paramètres physico-chimiques de l'échantillons d'eau traitée par la technique de l'électrocoagulation en fonction de l'intensité du courant (1A) du temps et du pH.....	56
Tableau .11. Les tableaux d'évolution des paramètres physico-chimiques de l'échantillons d'eau traitée par la technique de l'électrocoagulation fonction de pH à (courant=1A ;temps=10min).....	61
Tableau.12. L'évolution de taux d'éliminations des floes en fonction de temps à courant=0 ,1A	68
Tableau .13. L'évolution de taux d'éliminations des floes en fonction de temps à courant=0,5A.	69

Tableau .14. L'évolution de taux d'éliminations des floes en fonction de temps à courant=1A	70
Tableau .15. Résultats des analyses physico-chimiques des eaux de l'usine de papier EMBG traitées par coagulation floculation.	72
Tableau.16. La comparaison sur le pourcentage d'élimination entre coagulation -floculation et électrocoagulation.....	72



Introduction

La protection de l'environnement, objectif de l'épuration, requiert des actions de plus en plus contraignantes, tant du point de vue quantitatif (nombre de paramètres et d'impacts à intégrer) que qualitatif (exigence des normes et seuils de rejets). Cette évolution ne facilite pas la tâche des décideurs qui cherchent à identifier les solutions techniques les plus respectueuses de l'environnement (thèse Sébastien Renoul', 2006)

Par ailleurs, l'amélioration des filières de traitement des eaux usées a engendré l'augmentation des sous-produits concentrant les pollutions : refus de dégrillage, sables, graisses, air vicié et boues d'épuration. Ces sous-produits, et particulièrement les boues qui représentent les plus gros volumes, doivent être conditionnés et éliminés de la façon la plus adéquate, ce qui rajoute des équipements supplémentaires sur les stations d'épuration, en plus des ouvrages de traitement d'eau. Les systèmes d'assainissement doivent donc être régulièrement repensés au niveau technique (développement de nouveaux procédés) ou systémique (mise en place de police des réseaux, traitements à la source des effluents industriels). Ainsi, au cours des dernières décennies, le rôle des systèmes d'épuration s'est profondément diversifié (thèse Sébastien Renoul', 2006).

Ces dernières années, des technologies électrochimiques telles que l'électrocoagulation (EC), l'électroflotation et l'électrooxydation ont été utilisées pour le traitement des effluents de pâte à papier. Parmi ces méthodes, l'EC est considérée comme l'une des techniques prometteuses en raison de ses caractéristiques uniques, telles que la dégradation complète des polluants, la génération de moins de boues et la facilité d'exploitation. L'EC est un processus complexe et interdépendant où la génération de coagulants se fait in situ par dissolution de l'anode sacrificielle (Asaithambi,P ;Studies on various operating parameters for the removal of COD from pulp and paper industry using electrocoagulation process) (Pulp and Paper Mills,1998)

Les impacts environnementaux significatifs de la fabrication des industries de la pâte et du papier résultent des processus de cuisson et de blanchiment. Dans certains procédés, des composés sulfurés et des oxydes d'azote sont émis dans l'air, des composés chlorés et organiques, des nutriments et des métaux sont rejetés dans les eaux usées (Pulp and Paper Mills,1998)

Les effluents de l'industrie provoquent la croissance de boue, des impacts thermiques, la formation d'écume, des problèmes de couleur et une perte d'esthétique.

L'unité EMBAG de BBA produit des eaux usées de l'industrie de papier pour la fabrication des emballages, au niveau de station d'épuration cette eau est traitée avant rejet. L'objectif de ce mémoire est la réalisation de traitement par électrocoagulation au niveau du laboratoire.


Le manuscrit est subdivisé en trois chapitres :

Chapitre 1 représente une synthèse bibliographique sur la pollution de l'eau, les traitements et effet sur l'environnement. Une partie représente des recherches réalisées sur le traitement des eaux usées de l'industrie de papier.

Chapitre 2 regroupe le matériel et méthodes expérimentale protocole pour la réalisation de traitement et analyse des différents paramètres.

Chapitre 3 est regroupe les résultats expérimentaux et interprétations.

En fin, une conclusion générale.



**Chapitre 1 :
Synthèse
bibliographiques**

L'industrie papetière est l'une des principales industries de transformation chimique consommatrices d'eau. Elle contribue significativement à la pollution de l'environnement sous forme de liqueur noire. Les effluents de l'industrie papetière contiennent une forte teneur en matière organique, des matières en suspension, une forte coloration et une demande biologique en oxygène (DBO) et demande chimique en oxygène (DCO). Cette forte coloration noirâtre est principalement due aux composés complexes issus de la polymérisation entre les produits de dégradation de la lignine et le tanin lors des différentes opérations de réduction en pâte et de blanchiment. Traditionnellement, les effluents papetiers sont traités par adsorption physique, oxydation chimique et méthodes biochimiques.

Pendant la production de papier, un volume élevé est consommé, les eaux usées de fabrication de papier proviennent principalement de trois sources :

Le liquide résiduel produit pendant le traitement de la pâte (liquide noir).

L'eau blanche des machines à papier, produite lors du processus de fabrication.

Les déversements de lavage, de criblage et de blanchiment de la pâte. Ces déversements sont chargés de substances polluantes qui doivent être séparées pour pouvoir être réutilisées ou déversées.

Les principaux polluants on trouve :

- **Matériau organique** : fibre de cellulose, lignine et autres résidus de bois.
- **Sols en suspension** : restes de fibre et particules.
- **Composés toxiques** : dérivés du chlore dans le blanchiment.
- **Nutriments** : azote et phosphore.

Le traitement de ces eaux usées vise à réduire ou éliminer ces polluants pour se conformer aux réglementations environnementales et éviter des dommages à l'écosystème.

1.1. Pollution de l'eau

La pollution de l'eau, résultant des activités humaines, est un facteur qui modifie ses propriétés physiques, chimiques, biologiques et bactériologiques. Cette dégradation perturbe la vie aquatique (plantes et animaux) et affecte l'être humain. Elle rend également l'eau inutilisable à diverses fins et perturbe l'équilibre écologique des écosystèmes.

Les racines de cette pollution résident dans le déversement des eaux contaminées issues de nos activités quotidiennes (telles que la lessive, le nettoyage, les eaux usées domestiques et les déchets industriels), ainsi que des activités industrielles et agricoles indispensables à notre alimentation. (Directive & JOCE, 2000)



Figure .01. Canaux d'évacuation des eaux usées(www.wikipidia.com).

La lutte contre cette pollution est d'autant plus difficile que ce qui se trouve dans l'eau, ou y est dissous, en particulier dans les eaux industrielles, est souvent invisible ; et que de nombreux polluants agissent en synergies complexes ; et que certains éléments toxiques (comme le plomb) infiltrés dans le sol, ne produisent souvent leur effet qu'après une longue période. Cela entraîne des dommages en premier lieu pour l'être humain, en raison des eaux polluées rejetées par les usines. (Chpman D,1996)



Figure .02. Rejet des eaux usées industrielle (unité affinage de plomb –Sétif) (www.wikipidia.com).

1.2. Origines de la pollution des eaux

L'eau est une ressource vitale pour les activités humaines et tous les organismes vivants. Cependant, la diversité des sources de substances polluantes la rend dangereuse pour les êtres vivants. Parmi les principaux polluants, on distingue ceux d'origine domestique, industrielle, naturelle, les pollutions par les eaux pluviales et celles associées au traitement des eaux.

1.2.1. Pollution d'origine domestique

La pollution domestique résulte de l'utilisation quotidienne de l'eau dans les foyers (tâches ménagères, cuisine, entretien de jardin, toilettes, etc.). Ces effluents sont un mélange d'eaux contenant des déjections humaines (urines et fèces, dites "eaux vannes") et des eaux de nettoyage des surfaces et des aliments (dites "eaux ménagères"). Les eaux domestiques sont riches en déchets organiques, graisses (cuisine), matières minérales (salle de bain), azote et phosphore, et contiennent également des sels minéraux et des métaux (ASSAAD A, 2014)



Figure.03.les eaux usées domestiques (www.wikipedia.com).

1.2.2. Pollution d'origine industrielle

Les entreprises et les usines se caractérisent par des rejets industriels spécifiques à leurs activités et à l'utilisation de l'eau dans leurs processus. Selon le secteur industriel, on identifie divers types de pollution :

- **Matières organiques et graisses** (abattoirs, industries agroalimentaires...).
- **Hydrocarbures** (industries pétrolières, transports).
- **Métaux** (traitement de surface, métallurgie).
- **Acides, bases, produits chimiques divers** (industries chimiques, tanneries...).

Substances radioactives (centrales nucléaires, traitement des déchets médicaux radioactifs).
(ASSAAD A, 2014)

1.2.3. Pollution d'origine agricole

L'agriculture est également responsable du rejet de nombreux polluants organiques et inorganiques dans les eaux de surface et souterraines. L'agriculture intensive, en particulier, entraîne une pollution des eaux du sol par de fortes concentrations d'azote, de phosphore, de pesticides et de micro-organismes.

- **Pesticides** : Utilisés pour protéger les cultures et augmenter les rendements, ils conduisent à la pollution des eaux par des substances toxiques.

- **Matières organiques** : Les déjections animales provenant de l'élevage contiennent des matières organiques, azotées et du phosphore, pouvant poser des problèmes de pollution des eaux superficielles et souterraines dans les zones d'élevage intensif.
- **Phosphore** : L'utilisation du phosphore en agriculture contribue à la pollution des eaux superficielles.
- **Nitrates** : 66% de la pollution de l'eau par les nitrates provient de sources agricoles, contre seulement 12% des sources industrielles. (Association Santé environnement France)



Figure. 04. Les eaux agricoles (Fechkeur iqbal &Fekir ,2023).

1.2.4. Pollution d'origine naturelle

Cette pollution est due à des substances naturellement présentes dans l'environnement qui contaminent l'eau, provenant des roches environnantes de ces eaux, qu'elles soient superficielles ou souterraines. Ces substances inorganiques comprennent le baryum, l'arsenic, les fluorures, le sodium, les chlorures, le mercure et le cadmium. (BOUZIT F, 2012)

1.2.5. Pollution par les eaux pluviales

Les eaux pluviales résultent du ruissellement sur des surfaces imperméabilisées (toitures, trottoirs). Ces eaux sont déjà chargées de micropolluants atmosphériques lorsqu'elles atteignent ces surfaces. La pollution de l'air influence la qualité des eaux de pluie, car les fumées

industrielles, la poussière et les résidus d'échappement des véhicules peuvent les contaminer. (BOUZIT F, 2012)

1.3. Principaux types de pollution des eaux

L'eau contaminée est une eau dont la composition est devenue impropre aux activités humaines, directes ou indirectes, ou sous l'action biologique ou géologique, la rendant impropre à son utilisation. La pollution peut être divisée en différentes catégories selon sa nature, son danger et son impact (ABIBSI N, 2011).

1.3.1. Pollution physique

La pollution physique est une transformation que l'on peut qualifier de thermique et mécanique, résultant de températures élevées qui entraînent une diminution de la teneur en oxygène dissous et une diminution de la solubilité des gaz, produisant ainsi des particules et des matières qui rendent l'aspect de l'eau très trouble. (REJSEK F, 2002).

1.3.2. Pollution thermique

Elle résulte d'une augmentation excessive de la température de l'eau, généralement observée à proximité des installations industrielles, en particulier les centrales énergétiques (CHAOUCH N, 2014).

1.3.3. Pollution radioactive

C'est la pollution causée par toute activité radioactive artificielle dont la source est l'utilisation de l'énergie nucléaire sous toutes ses formes (par exemple, les centrales d'exploitation des mines d'uranium, le traitement des déchets radioactifs) (MEKHALIF F, 2009.)

1.3.4. Pollution chimique

La pollution chimique de l'eau est causée par le rejet et le déversement de certains minéraux toxiques et ions métalliques dans les cours d'eau. Ces substances ont un effet toxique et mortel sur les matières organiques, ce qui augmente leur dangerosité. Les polluants

chimiques sont divisés en : les soi-disant mauvais produits chimiques, les pesticides, les détergents, les colorants et autres éléments toxiques. (ABIBSI N, 2011)

1.3.5. Pollution microbiologique

De nombreux dangers causant des maladies résultent de cette pollution, tels que les bactéries, les protozoaires et les virus, affectant les conditions d'hygiène de la population, ainsi que les caractéristiques écologiques et épidémiologiques. Les principaux organismes pathogènes qui se reproduisent dans l'eau sont : les bactéries, les virus, les parasites et les champignons. On parle ici de contamination bactérienne, virale ou parasitaire. (ABIBSI N, 2011)

1.3.6. Pollution par le phosphore

Cette pollution par le phosphore provient des métaux, des blanchisseries industrielles et des engrais de transformation des aliments. Le phosphate est un nutriment, et sa présence dans les eaux de surface conduit à une augmentation de la production d'algues et de plantes aquatiques. Plus il y en a, moins il y a d'oxygène dans l'eau, et les conditions de vie des plantes et des animaux du milieu aquatique deviennent difficiles (MEKHALIF F, 2009)

1.4. Caractéristiques des eaux usées

Afin de prévenir la menace que représente le rejet des eaux usées pour la santé publique et l'environnement, il est primordial de définir des critères précis. Ces critères permettent de comprendre la composition et les caractéristiques qualitatives et quantitatives des eaux usées, ainsi que leurs impacts sur le milieu récepteur. Il est important de noter que ces eaux sont principalement constituées d'eau mais transportent d'autres substances qui peuvent être dangereuses en certaines quantités.

1.4.1. Paramètres physiques

1.4.1.1. Température

La température joue un rôle actif dans la solubilité des sels et surtout des gaz, dans la dissociation des sels dissous (et par conséquent sur la conductivité électrique), dans la détermination du pH, et dans la connaissance de l'origine de l'eau et des mélanges éventuels, etc. (RODIER J & coll, 2005)

1.4.1.2. Matières en suspension (MES)

La pollution particulaire résulte de la présence de particules de grande taille, supérieures à 10 µm, en suspension dans l'eau ; elles sont considérées comme des matières en suspension (ABIBSI N, 2011).

1.4.2. Paramètres organoleptiques

1.4.2.1. Turbidité

La turbidité représente le degré d'opacité d'un milieu trouble. C'est la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de matières non dissoutes. Elle se manifeste dans l'eau en raison de la présence de substances telles que l'argile, le limon, les grains de silice et les micro-organismes (ABIBSI N, 2011).

1.4.2.2. Couleur

Les eaux usées fraîches sont normalement brunes et jaunâtres, mais avec le temps, elles deviennent noires (ABIBSI N, 2011).

1.4.3. Paramètres chimiques

1.4.3.1. Potentiel hydrogène (pH)

L'acidité, la neutralité ou l'alcalinité d'une solution aqueuse peut s'exprimer par la concentration en ion hydronium (H_3O^+), souvent noté H^+ pour simplifier. Pour calculer la proportion des ions dans une solution aqueuse, on utilise la loi suivante :

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$$

Tableau .01. La variation de l'acidité d'une eau en fonction du pH

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 surfaces.
5.5 < pH < 8	Eaux souterraines.
pH > 8	Alcalinité, évaporation intense.

1.4.3.2. Conductivité

Il est connu que l'eau est un élément chimique conducteur d'électricité. Cela est dû à la présence d'ions dans le milieu qui peuvent se déplacer dans le champ électrique. Cela dépend de la nature de ces ions dissous et de leur concentration (GROS C, 1999).

La température et la viscosité affectent également la conductivité, car le mouvement des ions est influencé par une augmentation notable des températures et diminue avec la viscosité. La conductivité est exprimée en siemens par mètre (Perera P& Baudot B.,1991)

Tableau. 02. La quantité de sels dissous dans l'eau en fonction de la conductivité.

$\sigma = 0.005 \mu\text{S/cm}$	Eau déminéralisée.
$10 < \sigma < 80 \mu\text{S/cm}$	Eau de pluie.
$30 < \sigma < 100 \mu\text{S/cm}$	Eau peu minéralisée, domaine granitique.
$300 < \sigma < 500 \mu\text{S/cm}$	Eau moyennement minéralisée, domaine des roches carbonatées (karst).
$500 < \sigma < 1000 \mu\text{S/cm}$	Eau très minéralisée, saumâtre ou saline.
$\sigma > 30000 \mu\text{S/cm}$	eau de mer.

1.4.3.3. L'oxygène Dissous

L'oxygène dissous est un composé essentiel de l'eau car il permet la vie de la faune aquatique et conditionne les réactions biologiques qui ont lieu dans les écosystèmes aquatiques. La solubilité de l'oxygène dans l'eau dépend de différents facteurs, dont la température, la pression et la force ionique du milieu. La concentration en oxygène dissous est exprimée en mg/l (ABIBSI N, 2011).

1.4.3.4. Demande Chimique en Oxygène (DCO)

La demande chimique en oxygène (DCO) est la quantité d'oxygène consommée par les matières présentes dans l'eau et oxydables dans des conditions opératoires définies. Elle est exprimée en mg/l (REJSEK F, 2002).

1.4.3.5. Demande Biochimique en Oxygène (DBO)

Pratiquement, la demande biochimique en oxygène permet d'apprécier la charge d'un milieu en substances putrescibles, son pouvoir auto-épurateur et d'en déduire la charge maximale acceptable, principalement au niveau des traitements primaires des stations d'épuration (RODIER J et coll,2009).

1.4.3.6. Azote

L'azote présent dans l'eau peut être de nature organique ou minérale. L'azote organique est principalement constitué de composés tels que des protéines, des polypeptides, des acides aminés, de l'urée. Le plus souvent, ces produits ne se trouvent qu'à de très faibles concentrations (J. RODIER et coll,2009).

1.4.3.7. Nitrates

Les nitrates se trouvent naturellement dans les eaux, provenant en grande partie de l'action de l'écoulement des eaux sur le sol constituant le bassin versant. Leurs concentrations naturelles ne dépassent pas 3 mg/l dans les eaux superficielles (ABIBSI N, 2011)

1.4.3.8. L'azote ammoniacal

Pour désigner l'azote ammoniacal, on utilise souvent le terme d'ammoniaque qui correspond aux formes ionisées (NH_4^+) et non ionisées (NH_3) de cette forme d'azote. L'ammoniaque, un gaz soluble dans l'eau, constitue un des maillons du cycle de l'azote. Dans son état primitif, les réactions réversibles avec l'eau sont également fonction de la température et sont les suivantes (REJSEK F, 2002) :



1.4.3.9. Phosphore

Le phosphore peut exister dans les eaux en solution ou en suspension, à l'état minéral ou organique. La teneur en phosphates peut être exprimée en mg/l (RODIER J et coll,2009)

1.4.3.10. Sulfate

La concentration en ion sulfate des eaux naturelles est très variable. Dans les terrains ne contenant pas une proportion importante de sulfates minéraux, elle peut atteindre 30 à 50 mg/l, mais ce chiffre peut être très largement dépassé (jusqu'à 300 mg/l) dans les zones contenant du gypse ou lorsque le temps de contact avec la roche est élevé (ABIBSI N, 2011).

1.4.4. Paramètres bactériologiques

Les bactéries sont ubiquitaires dans la nature. Seules quelques dizaines d'espèces sont adaptées à l'homme : la plupart sont inoffensives ou même utiles, étant commensales et faisant partie des flores cutanée, digestive, buccale, génitale ; certaines sont pathogènes, opportunistes (RODIER J et coll,2009).

1.5. Effets des eaux sur la santé et l'environnement

1.5.1. Effets sur la santé

Les agents pathogènes présents dans les déchets humains propagent des maladies aux humains par le biais de l'eau potable contaminée, des aliments cultivés dans des sols contaminés, des fruits de mer récoltés dans des eaux contaminées, ainsi qu'en se baignant et en se livrant à des activités récréatives dans des eaux polluées. Les maladies infectieuses dues à l'exposition aux déchets humains comprennent, entre autres, La salmonellosi batterica, La giardiasi parassitaria L'anchilostomiasi. L'exposition peut également entraîner des infections des oreilles, des yeux ou de la poitrine et des affections topiques, telles que des éruptions cutanées et des infections cutanées (Kramer K,2018)

1.5.2. Effets sur l'environnement

Le rejet et la pollution des eaux usées perturbent l'équilibre délicat des écosystèmes d'eau douce. En effet, ces substances toxiques et le manque d'oxygène résultant de la contamination des eaux usées nuisent aux plantes aquatiques, aux poissons et aux autres organismes, entraînant une perte de biodiversité et l'effondrement des écosystèmes. De plus, le sol peut être affecté et devenir impropre à l'agriculture. (Graeme N,2022)

1.6. Historique du traitement des eaux en Algérie

En Algérie, les pouvoirs publics ont adopté la protection des ressources en eau contre les effets de la pollution dès 1970. À la fin des années 1990, environ 50 stations d'épuration (STEP) ont été réalisées, avec une capacité d'environ 4 millions d'équivalents habitants ; et à l'horizon 2000, le nombre a augmenté à une soixantaine de stations avec une capacité de 5,2 millions

équivalents habitants (A. KETTAB, 2001). Sachant que les réseaux d'assainissement totalisaient 17 000 km en 1994 (11 500 km en milieu urbain et 5 500 km en milieu rural), le volume d'eau rejeté annuellement est estimé à plus de 600 millions de m³.

En 2014, 108 STEP étaient en exploitation. Près de 350 stations de pompage sont gérées par l'ONA, et 39,00 km de réseau d'assainissement avec la perspective de récupérer un total de 44,00 km en étendant son activité à de nouvelles wilayas. Cependant, le volume d'eau rejetée s'élevant à 927 hm³/an, la capacité théorique totale d'épuration est d'environ 700 hm³/an. En 2015, l'Algérie comptait 200 STEP, avec une capacité d'épuration estimée à 12 millions Eq/h, soit 800 hm³/an sur un volume d'eau rejeté estimé à 1,4 milliard de m³/an. Cette quantité continuera d'augmenter pour atteindre les 900 Hm³/an à l'horizon 2020, soit une capacité de traitement de l'ordre de 75% (ONA, 2014).

1.6.1. Importance du traitement des eaux

Les objectifs de gestion des eaux usées sont liés à l'élimination des polluants et à la protection et la préservation de nos ressources naturelles (Ballay et Blais, 1998). En raison des dommages que causent les eaux usées, qu'elles soient municipales ou industrielles, elles doivent être soumises à un traitement dans des stations spécialisées avant d'être rejetées dans le corps récepteur.

Toutes les usines doivent également rejeter leurs eaux dans les réseaux municipaux ou les eaux de surface en respectant les réglementations de rejet, c'est pourquoi dans de nombreux cas, un traitement est nécessaire avant de diriger l'eau vers l'environnement. Cependant, dans certaines situations, les industries peuvent estimer qu'il est indispensable de procéder au rejet avant de diriger l'eau vers l'environnement pour se conformer aux réglementations requises (UNESCO, 2017), car cela est très dommageable pour l'environnement.

1.6.2. Caractéristiques des eaux usées par secteur industriel

Le contenu des eaux usées industrielles varie d'une industrie à l'autre, et ce tableau nous résume le contenu des effluents selon le secteur industriel d'où ils proviennent.

Tableau.03 .Contenu des eaux usées types dans certaines grandes industries. (Renou S, 2006).

Industrie	Contenu type des effluents
Pâte et papier	<ul style="list-style-type: none"> -Acides lignosulfoniques chlorés, acides résiniques chlorés, phénols chlorés et hydrocarbures chlorés – environ 500 différents composants organiques chlorés identifiés. - Polluants caractérisés par la DBO, la DCO, les matières en suspension, la toxicité et la couleur. Fer et acier - Composés chlorés et composés organiques halogénés adsorbables (COHA).
Fer et acier	<ul style="list-style-type: none"> - Eau de refroidissement contenant de l’ammoniac et du cyanure. -Produits de gazéification – benzène, naphthalène, anthracène, cyanure, ammoniacque, phénols, crésols et hydrocarbures aromatiques polycycliques - Huiles hydrauliques, suif et particules solides. - Eau de rinçage acide et acide usé (chlorhydrique, sulfurique).
Mines et carrières	<ul style="list-style-type: none"> - Boues de particules de roche. - Tension actifs. - Huiles et huiles hydrauliques. - Minéraux indésirables – par exemple l’arsenic. - Boues contenant de très fines particules.
Industrie alimentaire	<ul style="list-style-type: none"> - Niveaux élevés de concentration en DBO et de matières en suspension. - DBO et pH variables en fonction des légumes, fruits ou viandes et de la saison. - Transformation des légumes – forte présence de particules, certaines matières organiques dissoutes, tensioactifs. - Viandes – forte présence de matières organiques, d’antibiotiques, d’hormones de croissance, de pesticides et d’insecticides.

	<ul style="list-style-type: none"> - Cuisson – matières organiques des plantes, sol, arômes, colorants, acides, huile et graisse.
Brassage	<ul style="list-style-type: none"> - La DBO, la DCO, matières en suspension, azote, phosphore – variables en fonction des différents procédés. - pH variable à cause des agents de nettoyage acides et alcalins. - Température élevée
Produits laitiers	<ul style="list-style-type: none"> - Sucres dissouts, protéines, lipides et résidus d’additifs. - DBO, DCO, matières en suspension, azote et phosphore.
Substances chimiques organiques	<ul style="list-style-type: none"> - Pesticides, produits pharmaceutiques, peintures et teintures, produits pétrochimiques, détergents, plastiques, etc. - Matières premières, sous-produits, matières solubles ou sous forme de particules, agents de lavage et de nettoyage, solvants et produits à valeur ajoutée tels que les plastifiants.
Textiles	<ul style="list-style-type: none"> - DBO, DCO, métaux, matières solides en suspension, urée, sel, soufre, H₂O₂, NaOH. - Désinfectants, biocides, résidus d’insecticides, détergents, huiles, lubrifiants, ensimage et filature, solvants usés, composants antistatiques, agents stabilisants, tensioactifs, assistants du traitement biologique, matières cationiques, couleurs. - Acidité/alcalinité élevée. - Chaleur, mousse - Matières toxiques, déchets de nettoyage, apprêt.
Energie	<ul style="list-style-type: none"> - Production de combustibles fossiles. - Contamination provenant des puits pétroliers et gaziers et fracturation. - Eau de refroidissement chaude.

1.6.3. Les étapes et les méthodes de traitement des eaux usées

La figure suivante regroupe les différents traitements des eaux usées.

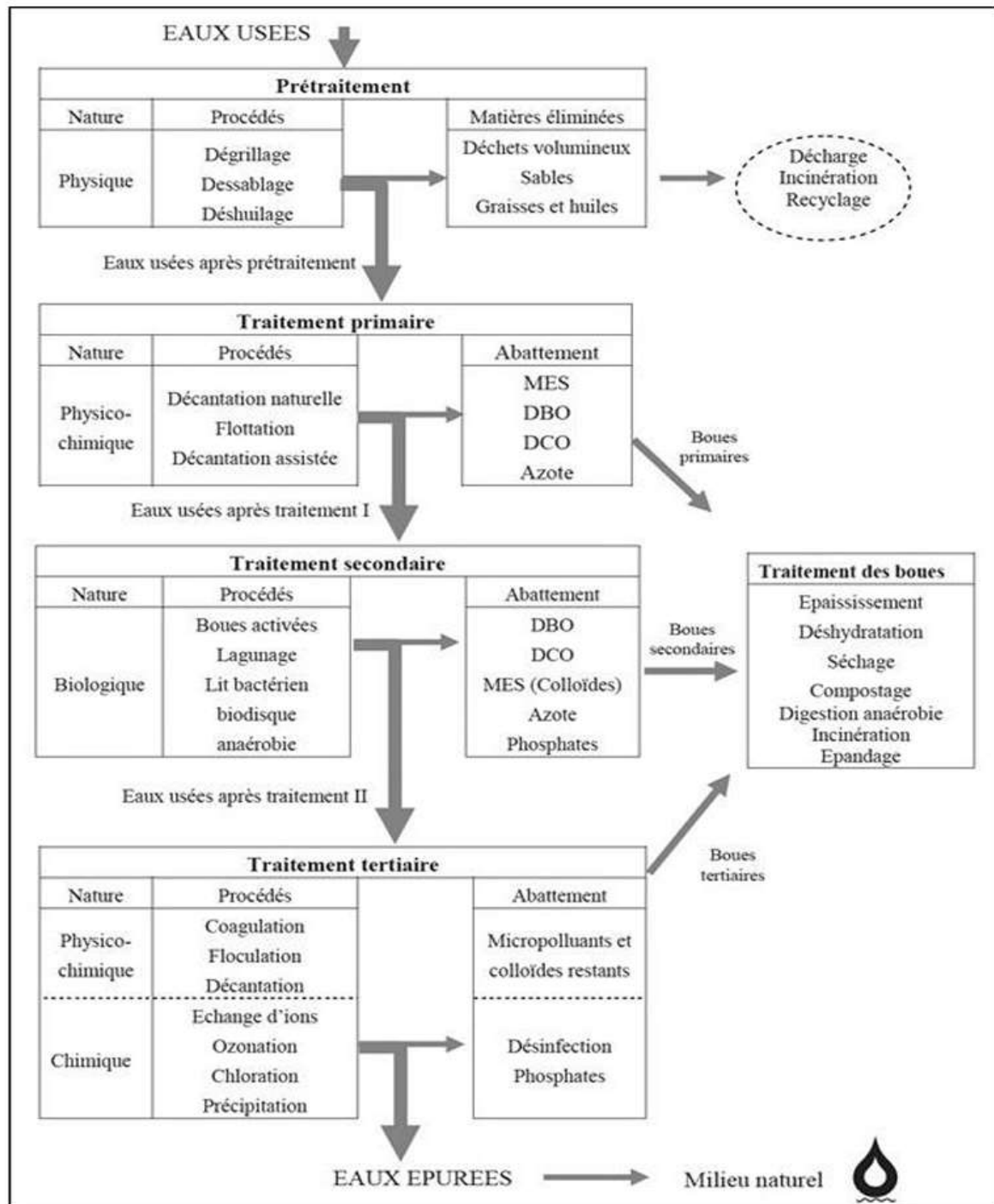


Figure. 05. Etapes d'une filière de traitement des eaux (Hadj-Sadok Z, 1999).

1.6.3.1. Prétraitement des eaux

Cette étape dépend fondamentalement de la nature et des caractéristiques des rejets industriels et de la ligne d'épuration prévue en aval. De manière générale, elle comprend un certain nombre d'opérations purement physiques ou mécaniques. Son premier objectif est d'extraire de l'eau brute la plus grande quantité possible d'éléments dont la nature ou la dimension constitueraient un obstacle pour les traitements en aval (Metahri M, 2012).

1.6.3.2. Dégrillage-tamassage

Les eaux usées entrantes traversent un équipement de dégrillage où les objets en suspension tels que les fragments de bois, les plastiques et la graisse sont éliminés. Les matériaux retirés sont lavés et éliminés dans une décharge. Les eaux usées tamisées sont ensuite pompées vers l'étape suivante : le dessablage (Zaoui Y,2023).

1.6.3.3. Dessablage

Cette étape se concentre sur l'élimination des matériaux lourds mais fins de l'eau brute, tels que le sable, le gravier, les particules minérales plus ou moins fines et les poussières dont la taille est supérieure à 200 μm , en utilisant la méthode de décantation par gravité. L'eau s'écoule à une vitesse réduite dans un dessableur, ce qui permet à ces éléments de se déposer au fond de l'ouvrage (Rabeh A,2012).

1.6.3.4. Dégraissage-déshuilage

Le déshuilage est essentiellement une extraction liquide-liquide, tandis que le dégraissage est une extraction solide-liquide. Cette opération consiste à récupérer les graisses domestiques ou industrielles présentes à la surface des eaux usées, soit naturellement, soit par flottation (injection de fines bulles d'air). Ces deux procédés visent à éliminer la présence de corps gras dans les eaux usées, qui peuvent entraver l'efficacité du traitement biologique ultérieur. Cette technique permet d'éliminer 80 à 90 % des graisses et matières flottantes (Vandermeersch S, 2006).

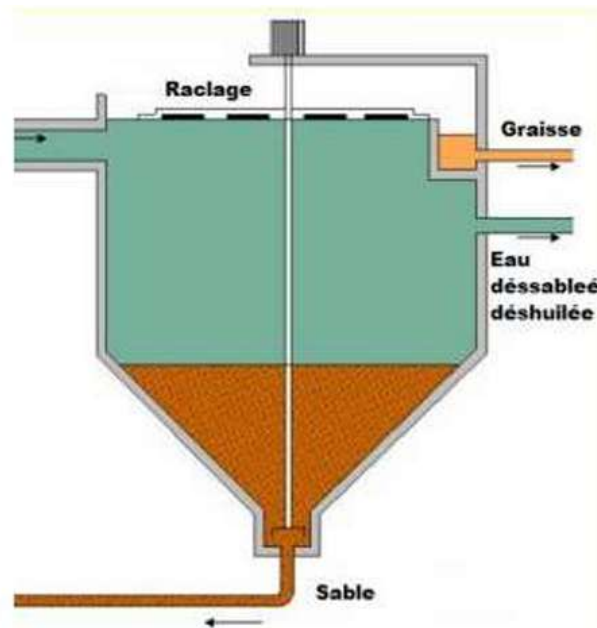


Figure. 06. Schéma représentatif d'un dessableur-déshuileur (Degremont R, 1978).

1.6.3.5. Traitement primaire Coagulation-floculation

Les processus de coagulation ressemblent à ceux qui se produisent lors du traitement de l'eau potable, ils agissent sur la déstabilisation des charges des particules présentes. En général, des coagulants de charges opposées à celles des solides en suspension sont ajoutés à l'eau pour neutraliser les charges négatives sur les solides dispersés non durcissables tels que l'argile et les substances organiques. Lorsque l'équilibre de charge est atteint, les petites particules en suspension sont capables de s'agglutiner. Quant aux particules légèrement plus grandes formées par ce processus, elles sont appelées « microflocs » et l'utilisation d'un mélange rapide à haute énergie pour disperser le coagulant conduit à une bonne coagulation et à la formation des microflocs qui décantent par gravitation (Desjardins R, 1997), (Lazarova et al., 2003).

Ce processus joue un rôle majeur pour obtenir un effet de purification significatif. Cette méthode est le plus souvent utilisée dans le traitement des eaux usées dans les industries du textile, du tannage et de la chimie.

L'étape de floculation succède à celle de la coagulation ; elle consiste en un mélange lent qui permet d'augmenter la taille des particules de microflocs submicroscopiques afin qu'elles se transforment en particules en suspension visibles.

Une fois que le floc a atteint sa taille et sa force optimales, l'eau est prête pour le processus de séparation (sédimentation, flottation ou filtration).

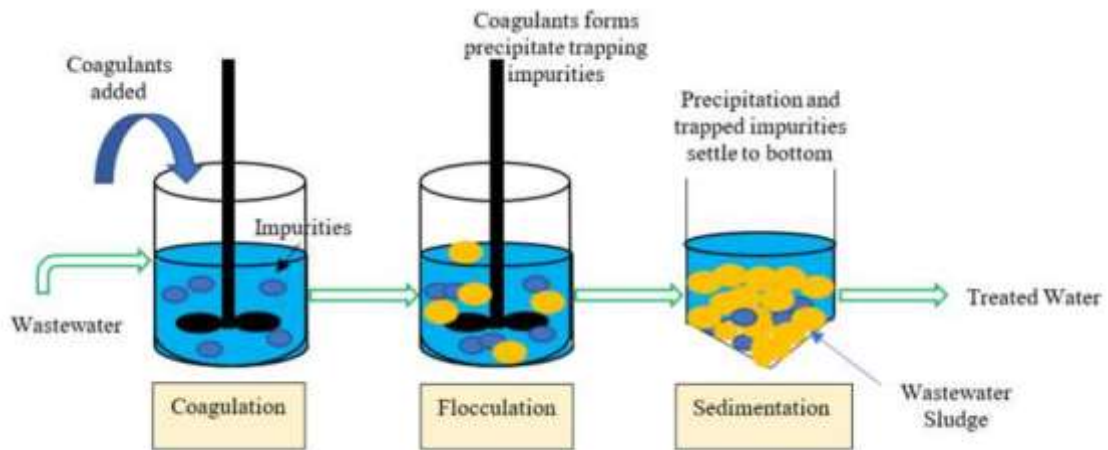


Figure .07. Schéma expliquant le processus de coagulation-floculation (Rajoria et al., 2022).

A/ Décantation

C'est un processus utilisé dans toutes les usines de traitement des eaux. Elle est considérée comme une opération de séparation de MES (matières en suspension) et des colloïdes rassemblés en flocons, dont la densité est inférieure à celle de l'eau ; et ce processus s'effectue selon une dynamique assurant la séparation continue des deux phases solide-liquide. Par accumulation, ils sont extraits périodiquement. Ensuite, l'eau est dirigée vers une autre étape de purification. (Faby J & Brissaud, 1997).

B/ Filtration

L'effluent liquide est clarifié à cette étape par filtration à travers un média polyester de 10 microns. La matière retenue à la surface des filtres est périodiquement lavée par contre-courant et renvoyée en tête d'usine pour traitement. Cela permet donc d'obtenir une bonne élimination des bactéries (Desjardins R, 1997).

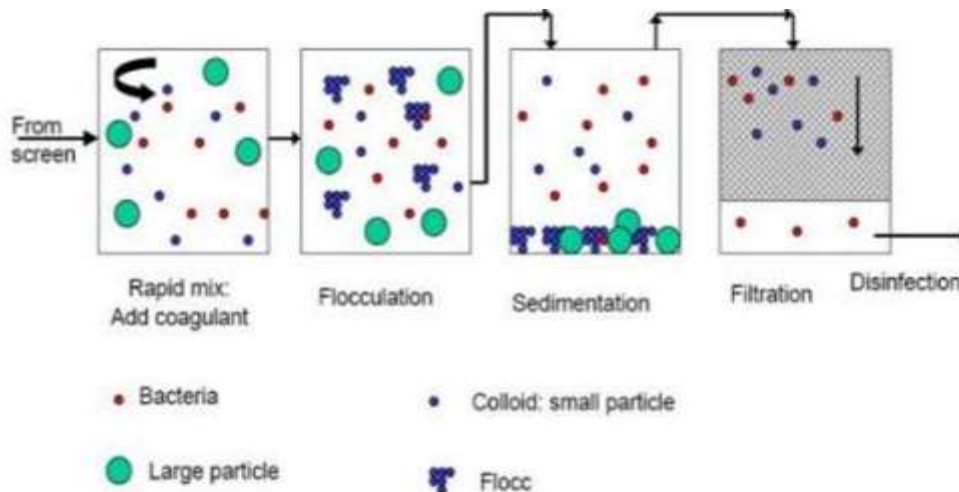


Figure. 08. Schéma de coagulation floculation suivis d'une décantation et une filtration (Fournier D, 2008).

1.6.4.1. Traitement secondaire

À cette étape, les eaux usées contenant des composés organiques sont traitées. Les bases du traitement biologique des eaux usées reposent sur les processus d'auto-épuration de l'eau et du sol dans la nature. On distingue deux modes de traitement :

A/ Traitement biologique anaérobie

Ce traitement s'effectue en l'absence d'oxygène. La présence de bactéries anaérobies assure la décomposition métabolique des composés biodégradables par des processus de fermentation (Berland et al., 2001). Ce système est utilisé pour le traitement des effluents urbains, plus que pour les effluents industriels qui sont généralement toxiques pour les bactéries (Vilagines R, 2003).

B/ Traitement biologique aérobie

Ce type de traitement repose sur les bactéries aérobies qui vivent et se multiplient en présence d'oxygène. La décomposition microbienne des polluants est effectuée par des réactions d'oxydation dans un milieu aéré, avec pour résultat du dioxyde de carbone et des composés minéraux (Berland et al., 2001).

C/ Systèmes à boues activées

Ce traitement est considéré comme l'une des technologies les plus couramment utilisées (Henze et al., 2008). Il consiste à créer des floccs dans le volume d'eaux usées avec une surface très fortement développée. Les polluants organiques sont absorbés à la surface des floccs et minéralisés grâce aux processus métaboliques en cours dans les micro-organismes. Les bactéries présentes dans les boues activées produisent des enzymes qui catalysent une série de réactions biochimiques, entraînant la décomposition des composés inorganiques (Figure I.6). L'excès de boues est ensuite déshydraté et séché, et le liquide est déversé dans des récepteurs tels que les étangs à poissons et les cours d'eau naturels.

La formation de boues activées dans la chambre d'aération prend du temps. Afin de raccourcir ce temps de formation des boues activées, il est possible d'ensemencer les boues en y ajoutant une certaine quantité provenant des eaux usées préalablement traitées. Le maintien constant des floccs en suspension nécessite une agitation vigoureuse du contenu du réacteur (Pronost et al., 2002) (Gillot C, 2002).

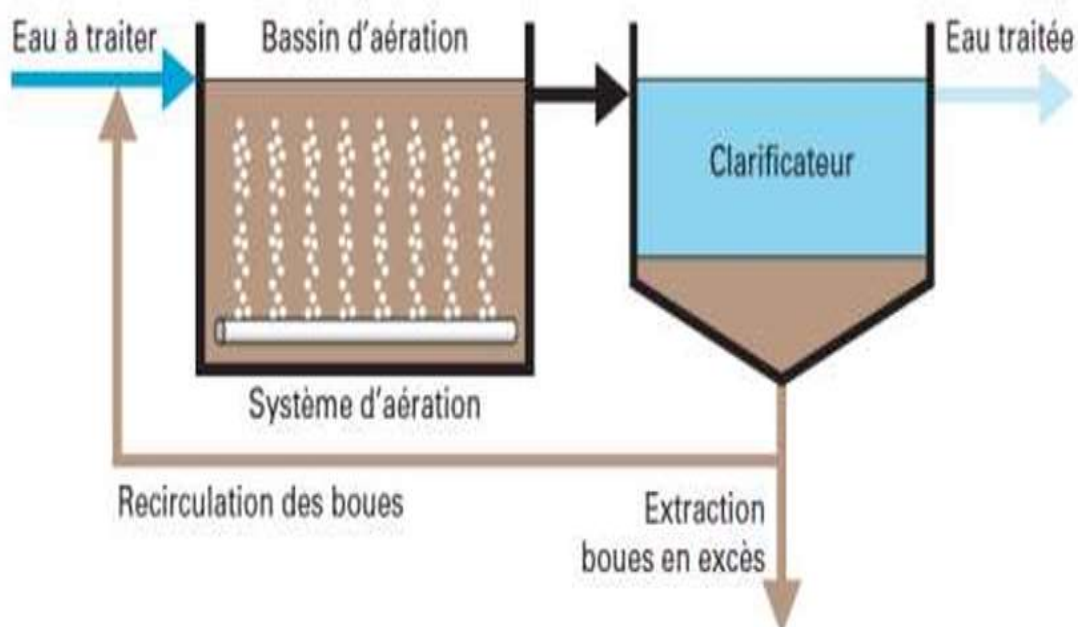


Figure. 09. Schéma simplifié d'un système à boues activées (Degremont R, 1978)

D /Lits bactériens

Il repose sur la fixation de micro-organismes sur des matériaux poreux. Ainsi, le lit bactérien est simplement un réservoir rempli d'une couche de pierres. Les eaux usées décantées sont pulvérisées en continu sur la surface de ces pierres. Le flux des eaux usées conduit au rassemblement et à la multiplication des bactéries. Le flux constant d'eaux usées sur ces formations microbiennes permet aux micro-organismes d'absorber les matières organiques dissoutes.

E/ Lagunage

C'est une technique biologique de traitement naturel, basée sur l'accumulation des eaux usées dans des bassins, appelés bassins biologiques, où des phénomènes naturels de dégradation font intervenir la biomasse qui transforme la matière organique (Metahri M, 2012).

Les mécanismes d'épuration et le fonctionnement d'un lagunage simple peuvent être décrits par la réaction (II.1): Eau usée + oxygène + bactéries → boues + effluent traité + CO₂ + H₂O

1.6.5.1. Traitement tertiaire

Dans certains cas où l'eau exige la plus haute qualité de traitement avant d'être rejetée dans l'environnement, notamment lorsqu'elle est polluée, un traitement supplémentaire est utilisé. Il s'effectue par ozonation, c'est-à-dire un traitement aux UV, ou par filtration sur sable. Cela élimine la suspension organique restante. Ce traitement tertiaire comprend les processus suivants (Pouliot Y& Noüe, 1985) :

A/ Désinfection : en utilisant le chlore ou l'ozone pour éliminer les germes pathogènes.

B/ Neutralisation des métaux : en faisant varier le pH de l'eau dans certaines plages.

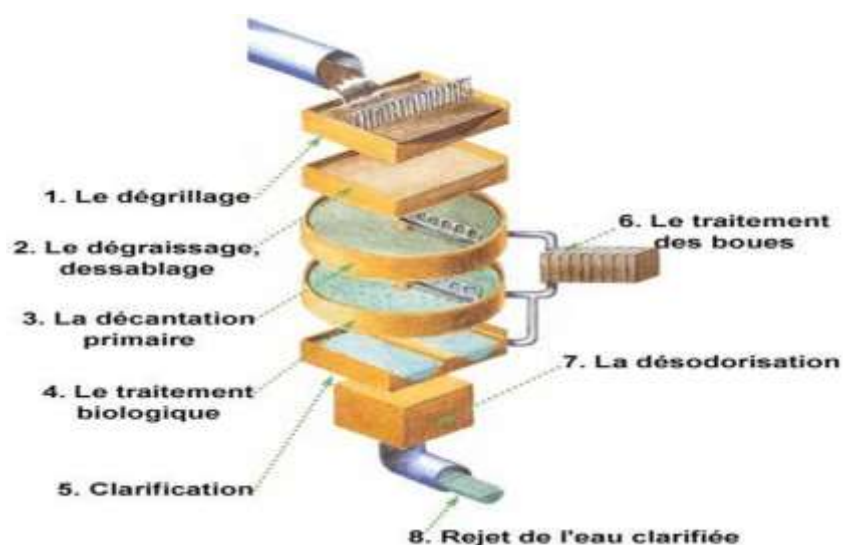


Figure .10. Schéma d'une station d'épuration des eaux industrielle (Metahri M, 2012).

1.7. Les normes de rejets

1.7.1. Normes internationales

L'organisation mondiale de la santé (OMS) a fixé des normes internationales pour les eaux usées, ces normes sont consignées dans le Tableau suivant :

Tableau. 04. Normes de rejet internationales (Jeppsson U,1996).

Caractéristiques	Normes
pH	6,5 – 9,5
DBO₅	< 30 mg.L ⁻¹
DCO	< 90 mg.L ⁻¹
MES	< 20 mg.L ⁻¹
NH⁴⁺	< 0,5 mg.L ⁻¹
NO₂	1 mg.L ⁻¹
NO₃	< 1 mg.L ⁻¹
P₂O₅	< 2mg.L ⁻¹
Température	< 30°C
Couleur	Incolore
Odeur	Inodore

1.7.2. Normes Algériennes

Les réglementations en vigueur sont mises en place par les décrets parus au Journal Officiel de la République Algérienne n°26 en date du 23 avril 2006. (Tableau.05).

Tableau .05. Normes de rejets dans un milieu récepteur (Journal Officiel de la République Algérienne, 2006).

Paramètres	Unités	Valeur limite
Température	°C	30
pH	-	6.5 à 8.5
MES	mg/L	35
DBO5	mg/L	35
DCO	mg/L	120
AZOTE Kjeldahl	mg/L	30
Phosphates	mg/L	02
Phosphore total	mg/L	10
Cyanure	mg/L	0.1
Aluminium	mg/L	03
Cadmium	mg/L	0.2
Fer	mg/L	03
Manganèse	mg/L	01
Mercure total	mg/L	0.01
Nickel total	mg/L	0.5
Plomb total	mg/L	0.5
Cuivre total	mg/L	0.5
Zinc total	mg/L	03
Huiles et Graisses	mg/L	20
Hydrocarbures totaux	mg/L	10
Indice Phénols	mg/L	0.3
Composés organique chlorés	mg/L	05
Chrome total	mg/L	0.5
Chrome III +	mg/L	03
Chrome VI +	mg/L	0.1
Solvants organiques	mg/L	20
Chlore actif	mg/L	01
Détergents	mg/L	2
Tensioactifs anioniques	mg/L	10

1.7.3. Les Effluents de l'industrie de papier

Selon, Ahmad et al. (2006), les eaux usées peuvent causer des dommages considérables à la réception si les eaux ont été déversées sans traitement. Elles sont lourdement chargées de lignosulfuriques chlorés, d'acide résinique ; de phénols et d'hydrocarbures aliphatiques et aromatiques, qui peuvent avoir un impact considérable sur l'environnement. Bassompierre, (2007), avance que les principaux éléments polluants des effluents papetiers sont les fibres, les résines et composés dissous du bois (la lignine) ainsi que les charges (kaolin, talc, carbonate de calcium, dioxyde de titane, latex, azurants, colorants).

D'un point de vue chimique, les additifs insérés lors du procédé de fabrication sont principalement de l'amidon modifié, des minéraux organiques, des polymères synthétiques, etc... Ces additifs sont présents en quantité importante dans les eaux de rejet. De nombreux minéraux et composés métalliques sont également présents au sein des effluents, ils proviennent principalement du bois, de la corrosion de l'équipement et des composés chimiques utilisés. Les composés les plus couramment rencontrés sont le calcium, le sodium, l'aluminium, le manganèse, le magnésium, le fer et le potassium. Selon Ashok, (2004), Les effluents solides sont de couleur brun foncé, dans un milieu alcalin ; et à pH élevé possède une appréciable demande biologique en oxygène (DBO), haute demande chimique en oxygène (DCO) et solides en suspension. La charge de DCO peut varier de 25 à 125 kg / tonne de pâte.

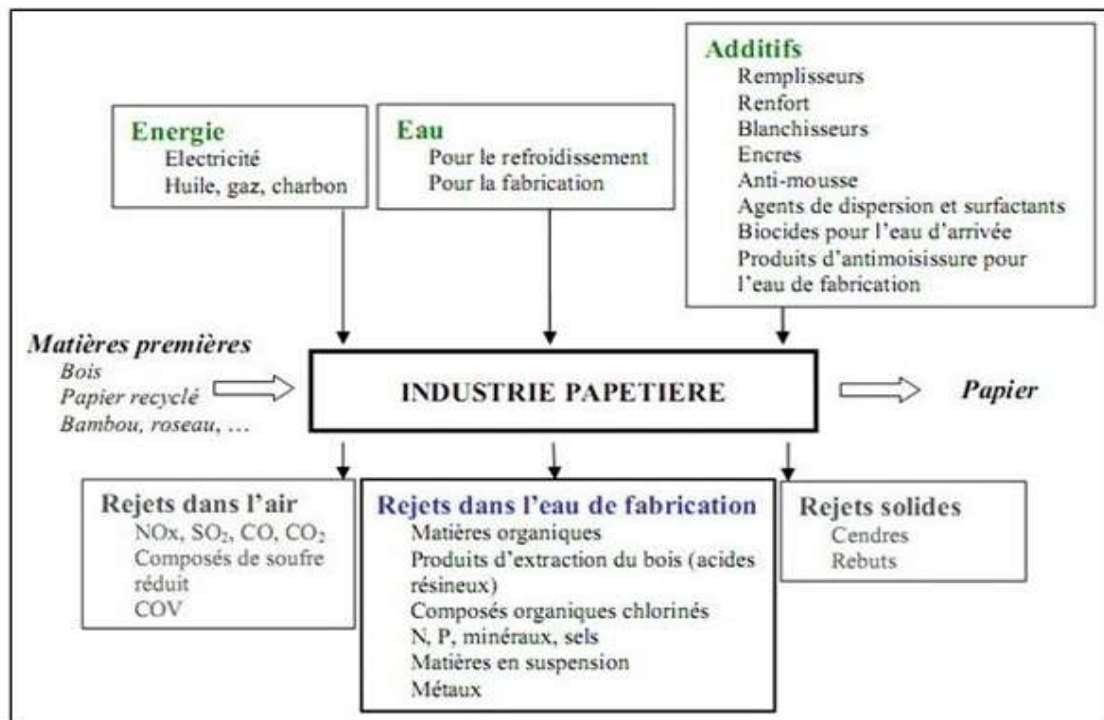


Figure. 11. Les matières impliquées dans la fabrication du papier et les rejets générés (Lacorte et al.,2003).

1.8. Techniques de traitement

En dernier lieu, Ashok (2004) a affirmé qu'une large gamme de techniques de traitement de ce type d'eaux est aujourd'hui disponible, incluant des procédés biologiques pour la nitrification, la dénitrification et l'élimination du phosphore aussi bien qu'une gamme de procédés physico-chimiques impliquant un ajout de produits chimiques. (GHRIBI F,2011)

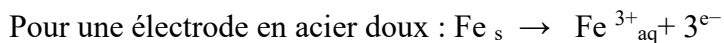
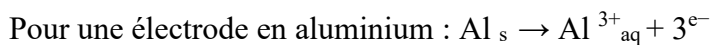
Les procédés physico chimiques les plus connus sont la filtration, l'échange d'ions, la précipitation chimique, l'oxydation chimique, l'adsorption sur charbon activé, l'ultrafiltration, l'osmose inverse, l'électrodialyse et la distillation.

D'autres procédés utilisant des techniques électrochimiques ont été développés mais ne sont pas encore appliqués à l'échelle industrielle (Kabdaşlı et al., 2012) ; Ces dernières années, l'utilisation de techniques électrochimiques telles que l'électrocoagulation, l'électroflottation et l'électrooxydation pour le traitement des effluents de l'industrie papetière a suscité un intérêt croissant.

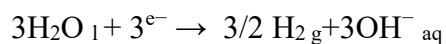
Parmi ces méthodes, l'électrocoagulation apparaît comme l'une des plus prometteuses en raison de ses caractéristiques uniques, telles que la dégradation complète des polluants, la réduction de la production de boues et sa simplicité d'utilisation.

L'électrocoagulation est un procédé complexe et interdépendant où la production de coagulants s'effectue in situ par dissolution de l'anode sacrificielle. L'aluminium ou l'acier doux sont principalement utilisés comme électrode sacrificielle.

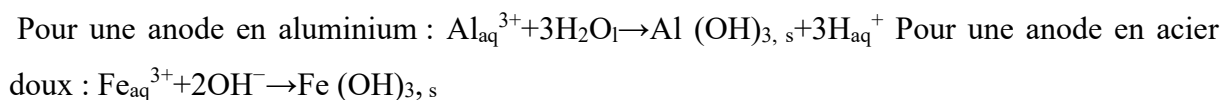
Le mécanisme de l'électrocoagulation peut être résumé comme suit. Lorsqu'une source d'énergie externe est chargée, les électrodes sacrificielles subissent une oxydation comme indiqué ci-dessous :



L'équation de gaz généré à la cathode favorise la flottaison des particules flocculées, soit



Les espèces ioniques réagissent pour former des floccs, soit $\text{Fe}(\text{OH})_2$ et $\text{Al}(\text{OH})_3$, comme indiqué ci-dessous :



Le flocc $\text{Al}(\text{OH})_3$ / $\text{Fe}(\text{OH})_3$ incarcère les molécules organiques présentes dans la solution par précipitation et/ou adsorption.

La figure suivante représente les domaines de prédominance des différentes espèces de fer selon la valeur du pH.

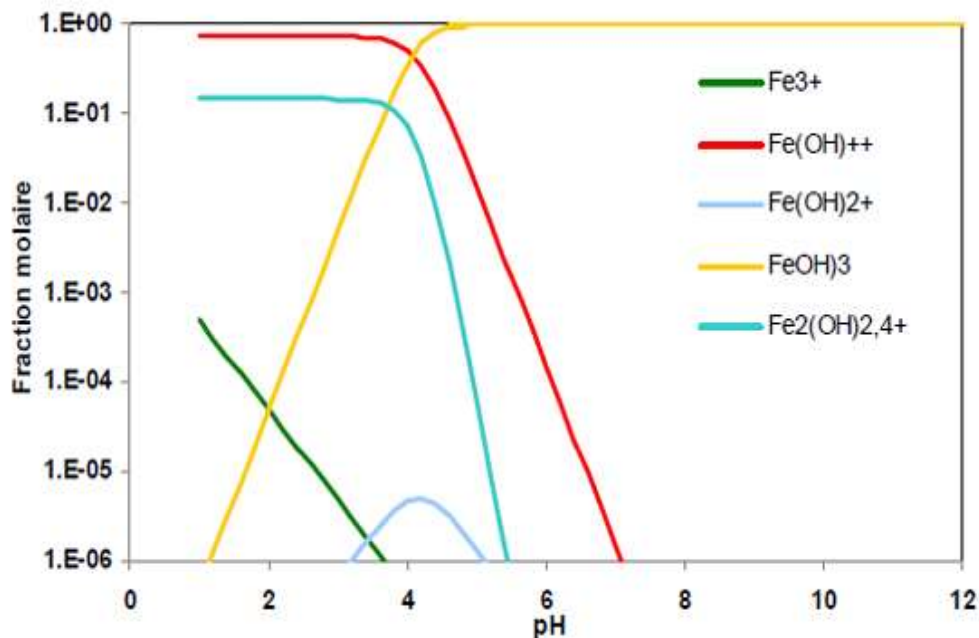



Figure 12 : Diagramme de prédominance des différents hydroxydes de fer trivalents (Zongo I , 2009).

Le traitement par électrocoagulation réussit de divers matériaux industriels. Des chercheurs antérieurs ont rapporté des résultats concernant les effluents de pâtes et papiers, (Thompson et al.,2001) (Kobyta et al.,2003). Ugurlu et al. (Adhoum et al.,2004) ont rapporté une élimination de plus de 70 % de la DCO et de la lignine des effluents de pâtes et papiers par électrocoagulation. Mahesh et al. (Kreetachat et al.,2006) ont réalisé le traitement des effluents d'usines de pâtes et papiers par électrocoagulation et ont rapporté une élimination globale de la DCO de 91 % avec une élimination complète de la couleur. Ben Mansour et al. (Inan et al.,2004). ont étudié le traitement des effluents industriels du papier par coagulation suivie d'une électroflottation et ont rapporté une élimination de plus de 95 % des matières en suspension.



**Chapitre 2 :
Techniques
expérimentales**

Ce chapitre présente les méthodes expérimentales de traitement de l'eau usée par coagulation floculation et par électrocoagulation. Une partie représente une description de l'unité EMBAG bordj Bou Arreridj au niveau de laquelle l'eau usée industrielle est produite, et une description de fonctionnement ; les étapes réalisées au niveau de la station d'épuration. Une autre partie représente une description des méthodes utilisées, principe et protocole à suivre pour la réalisation au niveau du laboratoire.

L'eau usées à traiter est une eau industrielle produit par l'industrie papeterie unité de EMBAG de Bordj Bou Arreridj. Avant de rejet cette eau un traitement est indispensable pour la protection d'environnement.

2.1. Représentation de la société

2.1.1. La Société EMBAG SPA

La société EMBAG SPA, dont le capital social s'élève à 170 000 000 DA (Figure 13), a été officiellement créée en juillet 1999. Cependant, ses origines remontent à 1978, année de sa construction. Initialement intégrée à l'ancienne Société Nationale des Industries de la Cellulose (ex-SONIC), elle a été restructurée en 1985 sous le nom d'ENEPAC. Suite à une nouvelle restructuration, EMBAG est née en 1999 et fait désormais partie du Groupe GIPEC.

La Société des Emballages & Arts Graphiques EMBAG est implantée dans la Zone Industrielle de Bordj Bou Arreridj, sur une superficie de 28 hectares, dont 8 hectares couverts. Elle possède deux unités de production : l'une à Bordj Bou Arreridj (BBA) et l'autre à Saïda (ex-SACAEH).

Depuis 1978, EMBAG est spécialisée dans la fabrication d'emballages en papier kraft (sacs de grandes, moyennes et petites contenances) et de boîtes en carton compact et composé, qu'elles soient standard ou personnalisées (avec ou sans impression).

Grâce à ses certifications ISO 9001 :2008, ISO 9001 :2015, ISO 14001 :2015 et ISO 45001 :2018, EMBAG garantit la qualité de ses processus et renforce la confiance de ses clients et partenaires en attestant de son engagement envers la qualité. (BENMOUSSA,2023)



Figure .13 . Société EMBAG BBA.

Le domaine de spécialisation de cette entreprise est une gamme variée de matériaux d'emballage, incluant des boîtes pliantes en carton compact et composé pour les produits alimentaires, pharmaceutiques, cosmétiques, détergents, et autres. Elle produit également des sacs en papier kraft de grande contenance (25-50 kg), et propose des sacs en papier kraft vergé et sulfités de petite et moyenne contenance (125 grammes - 10 kg) pour le conditionnement de produits alimentaires et autres.

2.1.2. Protocole de Mise en Marche de la Station

Le démarrage de la station se fait comme suit :

- **Remplissage du réacteur (R1) :** Le réacteur R1 est rempli d'environ 9 mètres cubes. La pompe de transfert depuis le réservoir de collecte des eaux usées commence alors à fonctionner automatiquement (voir Figure 14). Ensuite, 10 litres de coagulant sont ajoutés au réservoir.
- **Période de contact :** Le mélange est laissé au repos pendant 45 minutes pour permettre au coagulant d'agir.
- **Mise en marche de la pompe soufflante :** La pompe soufflante est activée pour assurer un bon mélange et une aération adéquate.
- **Dosage du floculant :** 2 litres de floculant sont ajoutés pour chaque 150 litres d'eau.

- **Maintien de l'aération** : L'aération est maintenue pendant toute la période d'ajout du floculant.
- **Période de réaction finale** : La réaction est laissée à se poursuivre pendant 45 minutes après l'ajout du floculant.
- Transférer vers la presse filtre.
- Passer à la filtration.



Cuves R1 et R2 de la station



Pompes doseuses du coagulant/flocculant

Figure.14 . Le processus de l'impression



Figure .15. Station d'épuration des eaux usées industrielles de l'unité EMBAG BBA.

2.2. Matériels et méthodes

2.2.1. Matériels

- pH-mètre
- Conductimètre
- Jar-test
- Turbidimètre
- Analyseur de BDO₅
- Analyseur de DCO
- Générateur de courant

2.2.2. Caractéristique de l'eau usée industrielle à traiter

Tableau. 06 .Les paramètres physico-chimiques de l'échantillons d'eau avant le traitée par la technique de l'électrocoagulation.

pH	7 .10
Conductivité	2.02ms /cm
Salinité	0.9
TDS	2110mg/l
Turbidité	453.6 NUT
MES (mg/l)	14193.33

2.3. Paramètres physico-chimiques

2.3.1. Potentiel Hydrogène (pH)

Il est important de noter que l'effet du pH peut varier en fonction de la composition chimique des eaux usées et des coagulants utilisés

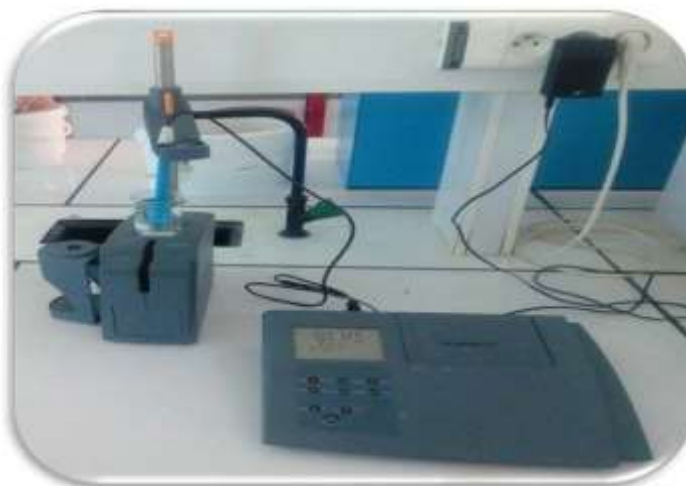


Figure. 16. pH-mètre.

2.3.2. Conductivité

Est une grandeur qui caractérise la capacité d'un matériau ou d'une solution à laisser se déplacer des charges électriques et donc permettre le passage d'un courant électrique.



Figure .17. Conductimètre.

Tableau .07. Qualité des eaux en fonction de la conductivité.

Conductivité < 100 μ S/cm	Minéralisation très faible
100 μ S/cm < Conductivité	Minéralisation faible
200 μ S/cm < Conductivité	Minéralisation moyenne
333 μ S/cm < Conductivité	Minéralisation moyenne accentuée
666 μ S/cm < Conductivité	Minéralisation importante
Conductivité >1000 μ S/cm	Minéralisation élevée

2.3.3. Jar-test

Le Jar-test (Fisher Bioblock Scientific type 10408) est une méthode fondamentale pour évaluer l'efficacité de la décantation des matières en suspension dans les eaux usées. Ce test permet de contrôler des conditions clés comme la vitesse d'agitation et les concentrations en produits chimiques, assurant ainsi la précision des résultats. L'appareil utilise six béciers pour traiter les eaux usées avec différentes doses et types de coagulants et flocculants.

➤ **Étapes de l'Expérience**

Voici les étapes à suivre pour réaliser un Jar-test :

1. **Préparation des échantillons et réactifs** : Collectez des échantillons d'eau représentatifs des conditions réelles et préparez les solutions de coagulants et floculants à diverses concentrations.
2. **Remplissage des béchers et ajout des réactifs** : Remplissez chaque bécher avec la même quantité d'échantillon d'eau (généralement 0,5 litre), puis ajoutez les réactifs spécifiques à chaque bécher, en ajustant le pH si nécessaire.
3. **Agitation** : Commencez par une agitation rapide (environ 150 tr/min pendant 5 minutes) pour la coagulation, puis passez à une agitation lente (environ 40 tr/min pendant 20 minutes) pour favoriser la formation des floccs.
4. **Observation et analyse** : Après l'agitation, évaluez la qualité des floccs formés (taille, densité, clarté, stabilité). Ensuite, analysez les surnageant à l'aide de mesures telles que la turbidité, le pH et la conductivité afin de déterminer la dose optimale de produits chimiques.



Figure 18. Jar Test.

2.3.4. Turbidité

Les turbidimètres (Figure19) sont des instruments qui mesurent la turbidité des liquides. La turbidité d'un échantillon est directement proportionnelle à l'intensité de la lumière diffusée ou réfléchiée par les particules en suspension dans l'eau. Ses résultats sont exprimés en NUT (Unité de Turbidité Néphélométrique).



Figure .19. Turbidimètre.

2.3.5. Matières en Suspension (MES)

Les matières en suspension (MES) sont des particules solides non dissoutes dans l'eau. Leur analyse est essentielle pour :

- Évaluer la turbidité.
- Signaler la pollution.
- Assurer l'efficacité des processus de traitement des eaux usées.
- Les MES sont déterminées par la méthode de filtration gravimétrique (pesée avant et après filtration) selon la formule :

$$\text{MES} = \frac{M2 - M1}{V} \text{ (mg/L)}$$

Où M1 et M2 sont les masses du filtre sec (avant/après filtration) et V est le volume de l'échantillon.

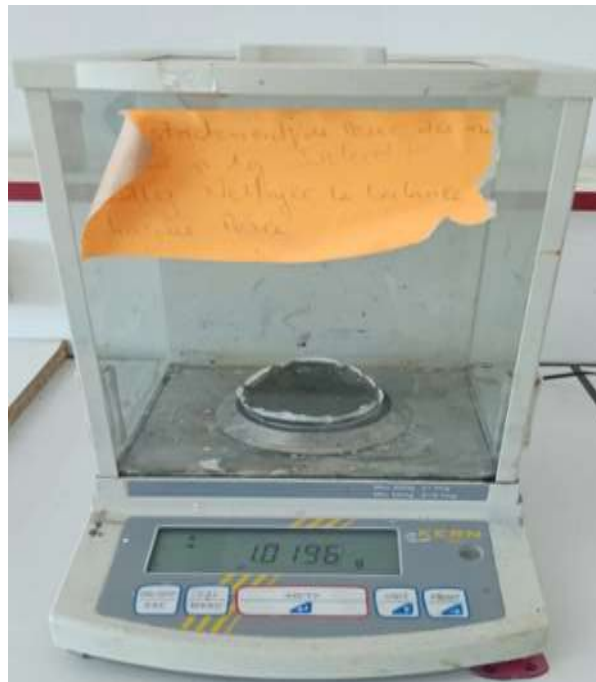


Figure .20. Mesure de la MES.

2.4. Méthodes de traitement

2.4.1 Coagulation et Flocculation

La coagulation-floculation est une technique de traitement de l'eau qui permet d'éliminer les fines particules en suspension, responsables de la turbidité et de la coloration de l'eau. Ce procédé s'appuie sur deux étapes distinctes : La Coagulation et la floculation sont des processus souvent indissociables. En effet, la coagulation, en diminuant les forces de répulsion entre les particules, favorise les collisions et la formation d'agrégats ; et la floculation, en permettant la croissance des agrégats accélère la séparation des phases (Mottot Y ;2000).

La coagulation, en procédé conventionnel, nécessite initialement une assez forte agitation mécanique pendant un certain temps pour permettre le contact des coagulants-floculants et du polluant à éliminer. Une fois les floes formés, l'agitation doit être réduite pour éviter leur dispersion.

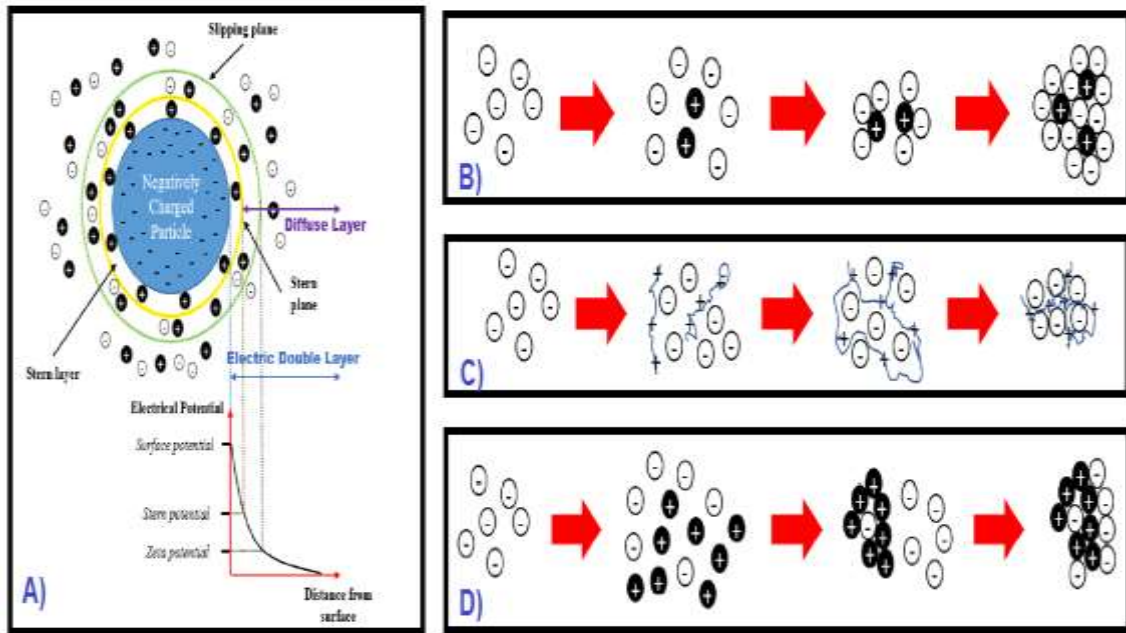


Figure .21. Phénomène de coagulation-floculation chimique

2.4.2. L'Électrocoagulation (EC)

L'électrocoagulation (EC) est une technologie efficace qui génère des agents coagulants à partir d'électrodes métalliques (fer/aluminium).

Son rôle principal est de :

- Destabiliser les polluants en neutralisant leurs charges et en formant des floccs.
- Utiliser les bulles de gaz générées pour faire remonter les floccs à la surface, permettant l'élimination efficace des polluants spécifiques à l'industrie papetière, tels que la couleur, la DCO/DBO5 et les Matières en Suspension (MES).

Les principaux avantages de l'EC pour l'industrie papetière comprennent la réduction de l'utilisation de produits chimiques, une production de boues plus faible et plus stable, ainsi que l'obtention d'une eau usée de haute qualité.

Le dispositif expérimental d'électrocoagulation est composé de deux électrodes en fer (acier ordinaire) identiques (7.3 cm x 3.5 cm) immergées dans un b cher d'une capacité de 150 ml. La surface immergée de chaque électrode est de 17.5 cm² et la distance entre les deux électrodes est de 1.5 cm.

Ces paramètres resteront constants tout au long des expériences. Les électrodes sont connectées à une source d'alimentation en courant continu (générateur) capable de fournir une tension maximale de 22.8 V et un courant maximal de 1 A.

Un générateur de courant est utilisé pour appliquer un courant constant aux plaques métalliques parallèles. Ce courant permet une dissolution uniforme du métal à l'anode et un dégagement régulier de gaz à la cathode.

Dans cette expérience, une prise d'essai de 100 ml de l'eau à traiter est disposée dans la cellule d'électrolyse où se trouve immergé deux électrodes (en Fer), branchées à un générateur de courant réglé à une intensité de courant de (0,1 à 1) A pendant un temps d'électrolyse variant entre 5 et 20 min. Après chaque opération :

Intensité de courant : Entre (0,35 - 0,5).

On a laissé décanter pendant 20 minutes ;

Après la décantation, on a fait un prélèvement avec une seringue de 50 mL de l'eau traitée et on le met dans un montage à filtre ; On mesure ensuite les paramètres suivants : La turbidité, le pH et la conductivité...Etc.

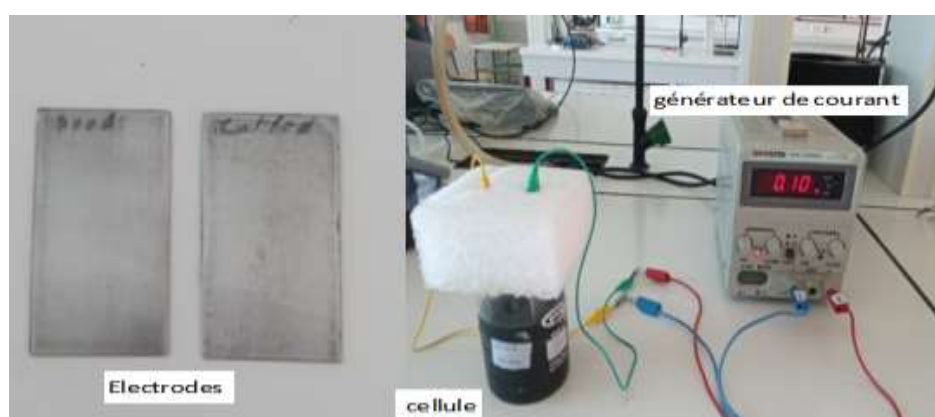


Figure .22. Traitement par électrocoagulation.

2.4.2.1. Principe

Le procédé électrochimique exploite le phénomène d'électrolyse. Cette réaction électrochimique implique le passage d'un courant électrique entre deux électrodes en acier, ce qui provoque l'oxydation et la dégradation automatique de la matière organique présente dans l'effluent. Ce processus se déroule dans une cellule contenant une anode et une cathode immergées dans le milieu réactionnel. Dès que les électrodes sont sous tension, la réaction s'active spontanément, entraînant la formation d'une mousse à la surface de la solution et sur la paroi intérieure du réacteur. Cette mousse résulte de l'oxydation des matières grasses et organiques (European Scientific Journal ; 2015).

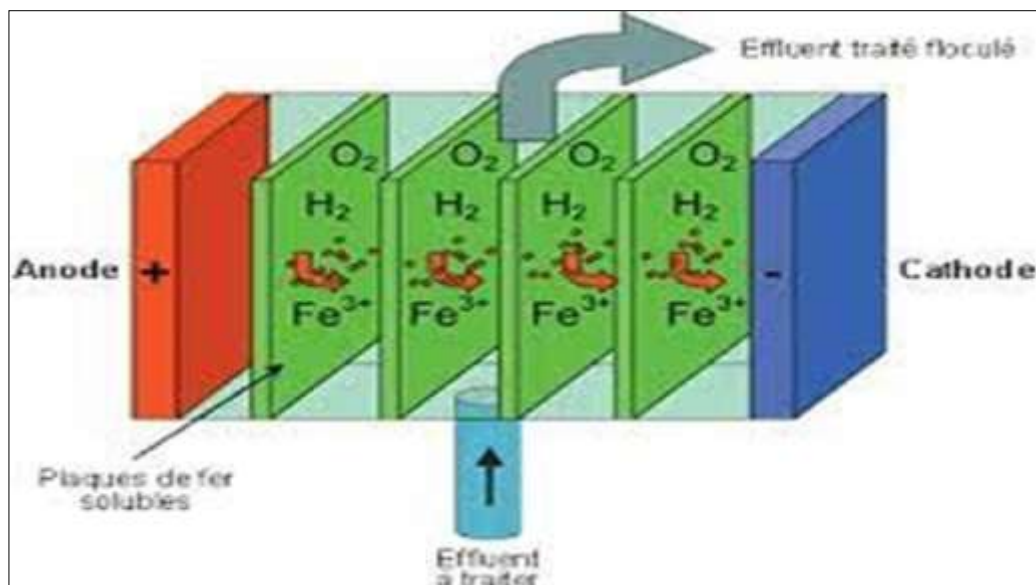
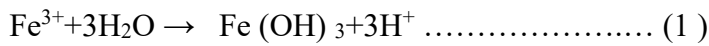


Figure .23. Schémas du procédé d'électrocoagulation.

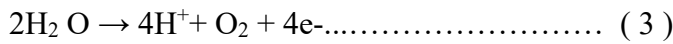
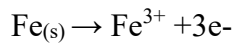
La Figure 23 illustre le principe du procédé électrochimique avec des électrodes en fer. Il existe différentes configurations possibles pour les anodes et les cathodes, qui peuvent se présenter sous forme de plaques, de sphères à lit fluidisé, de fils, de tiges ou de tubes. Le choix du matériau pour les électrodes est crucial pour optimiser le traitement. Deux métaux couramment utilisés sont le fer et l'aluminium.

2.4.2.2. Les principales réactions susceptibles de se produire aux électrodes de fer

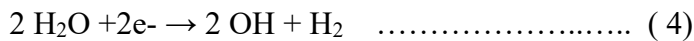
Compte tenu du pH, le fer ne reste pas sous forme cationique. Les cations formés réagissent avec l'eau pour former des complexes de type $Fe_2(OH)^{+5}$; $Fe_2(OH)_4^{+2}$; soit l'hydroxyde peu soluble $Fe(OH)_3$. Ce sont ces espèces qui jouent le rôle de coagulant en neutralisant les charges négatives à la surface des colloïdes.



➤ **À l'anode :**




➤ **À la cathode :**



Remarque :

$Fe(OH)_n$: L'hydroxyde de fer $Fe(OH)_n$ reste en suspension gélatineuse dans le flux aqueux. Il peut être éliminé des eaux usées par coagulation, adsorption, coprécipitation et floculation par balayage, comme l'ont démontré. (Martins et al.)



**Chapitre 3 :
Résultats et
discussion**

Dans ce chapitre, nous étudions le traitement de l'eau industrielle par électrocoagulation au laboratoire et la comparaison à la floculation et à la coagulation comme techniques de terrain dans l'usine, afin d'évaluer l'efficacité de la purification de l'eau industrielle et de chercher à obtenir une élimination optimale des contaminants de l'eau pour maximiser le taux de traitement à l'aide des deux méthodes.

3. Méthodes

3.1. Protocole de mise en marche de la station



Figure .24. Une représentation de processus de coagulation-floculation.

3.2. Protocole de traitement par électrocoagulation

Dans le protocole suivant, nous avons traité les eaux industrielles rejetées par l'usine EMBAG dans la wilaya de Bordj Bou Arreridj ; Les étapes générales sont les suivantes :

3.2.1. Caractérisation de l'effluent brut

Avant tout traitement, il est crucial de caractériser les eaux usées industrielles. Cela inclut la mesure de :

- pH initial.
- Conductivité électrique (essentielle pour l'efficacité du processus).
- Turbidité.
- Matières en suspension (MES).
- Concentration en polluants spécifiques dans les eaux usées traitées.
- Température.

3.2.2. Démonstration d'un réacteur d'électrocoagulation

- Nous avons choisi le matériau de l'électrode qui est le fer (Fe) Les électrodes en fer sont efficaces pour la turbidité et l'électrocoagulation
- **Configuration des électrodes** : en installant deux plaques métalliques en fer à l'intérieur du Becher en parallèle et en fixant la distance entre les deux plaques, qui est estimée à 1,5 cm
- En connectant les deux plaques au générateur de courant électrique en présence de fils de connexion de sorte que la cellule se compose de deux électrodes d'anode et de cathode.
- **Agitation** : Le système d'agitation (mécanique ou par bulles d'air) permet d'optimiser le mélange et la formation de la masse en plaçant un moteur électrique pour assurer l'homogénéisation de l'échantillon.

3.2.3. Procédure de traitement

- **Préparation de l'échantillon** : Prélever 200 ml d'eaux usées industrielles de l'usine EMBAG. L'échantillon a été traité en le plaçant dans le réacteur.
- **Immersion des électrodes** : Placer les électrodes dans le réacteur contenant l'effluent. Les électrodes peuvent être nettoyées au préalable (par exemple, à l'aide de papier abrasif) pour assurer une surface uniforme et éliminer les dépôts.

- **Application du courant électrique** : Connecter les électrodes à une source de courant continu et appliquer l'intensité de courant souhaitée pour le temps d'électrolyse spécifié (0,1 Ampère, 0,5 Ampère et 1 Ampère). L'échantillon étudié est soumis à une agitation continue sous plusieurs durées (10 min, 20 min, 30 min, 40 min).
- **Surveillance** : Observer la formation des floccs, les changements de couleur, la turbidité et éventuellement le pH pendant le traitement.
- **Repos** : Laisser l'échantillon de côté pour la sédimentation et la formation d'une couche de polluants et d'eau.
- **Post-traitement (séparation solide-liquide)** : Une fois l'électrocoagulation terminée, les floccs formés doivent être séparés de l'eau traitée. Ceci peut être réalisé par :
 - **Décantation** : Les floccs se déposent au fond du réacteur par gravité.
 - **Flottation** : Les bulles d'hydrogène (produites à la cathode) peuvent faire flotter les floccs à la surface, où ils sont écrémés.
 - **Filtration** : Filtrer l'échantillon à l'aide de papier filtre Whatman et conserver les résidus pour l'analyse des Matières En Suspension (MES).
 - **Séchage et pesée des résidus** : Le papier filtre contenant les résidus est ensuite séché dans une étuve à 105°C. Après refroidissement, le papier est pesé à l'aide d'une balance électronique de précision pour calculer la masse de MES.
- **Prélèvement et analyse de l'eau traitée** : L'eau soumise au processus d'électrocoagulation est prélevée et séparée. Les propriétés initiales de l'échantillon ont été mesurées : pH, turbidité, MES, conductivité électrique, solides dissous totaux (TDS), salinité. Quatre échantillons de 200 ml d'eau ont été utilisés pour chaque intensité de courant étudiée, sous des durées variables.

Analyses finales :

- Les valeurs finales du pH, de la turbidité, des MES, de la conductivité, des TDS et de la salinité ont été mesurées.
- Les masses initiale et finale de l'anode et de la cathode ont également été mesurées

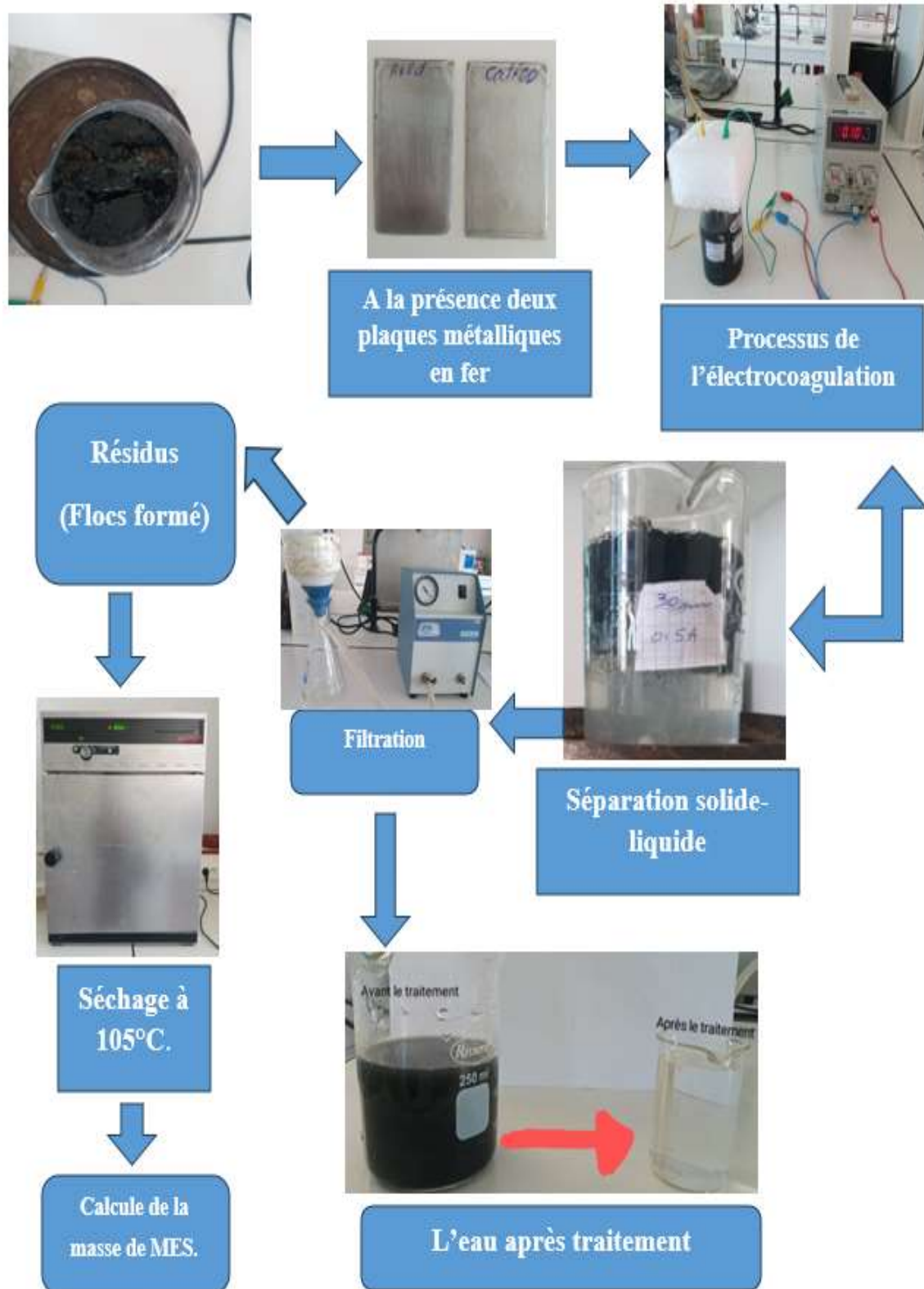


Figure .25. Représentation schématique de processus de l'électrocoagulation.

3.2.4. Les effets de différents paramètres étudiés**3.2.4.1. Effet de temps**

Pour examiner la cinétique d'électrocoagulations nous avons traité des échantillons de l'eau usée, l'expérience ont été réalisées en duplicata ; les béchers de 250mL contiennent 200 mL d'eau usée, ont été incubés sur un agitateur magnétique à une température ambiante, des échantillons de solution ont été prélevés dans chaque bécher à différents intervalles de temps (10,20,30,40 min) pour déterminer le temps d'agitation là où la teneur d'élimination optimale.

3.2.4.2. Effet de pH

Pour vérifier l'effet du Ph sur le traitement de eaux industriels nous avons étudié à différents régimes de pH (6,2 ; 4,3 ; 7,10 ; 8, 3 ; 10,2) sur les échantillons de 200mL.

3.2.4.3. Effet du courant

Cet effet a été étudié en faisant varier la tension de courant (0,1 ; 0,5 ; 1 A) dans des conditions variantes de pH le temps à une température ambiante.

3.3. Résultats et discussion

Tableau. 08. L'évolution des paramètres physico-chimiques de l'échantillons d'eau traitée par la technique de l'électrocoagulation en fonction de l'intensité du courant (0,1A) du temps et du pH

Courant		0.1A			
Temps	10min	20min	30min	40 MIN	
La masse de l'anode (g)	Avant :25.1407	Avant : 25,0606	Avant :24,9751	Avant :24,8848	
	Après :25.1350	Après :25,0491	Après :24,4538	Après :24,8488	
La masse de Cathode (g)	Avant :25,4480	Avant : 25,4090	Avant : 25,3898	Avant :25,3668	
	Après :25,4712	Après : 25,4750	Après : 25,4538	Après :25,4449	
Conductivité éus/cm	1899	1809	1721	1448	
Salinité	0.8	0.7	0.7	0.5	
TDS (mg/l)	1899	1809	1722	1466	
Turbidité NUT	10.05	7.07	3.87	2.71	
PH	8.11	8	7.7	9.3	
MES (mg/l)	1001,2	992	973	962	

3.3.1. Analyse des courbes

3.3.1.1. Analyse des variations de turbidité et de pH (0.1A)

L'électrocoagulation réduit efficacement la turbidité (de 10.05 à 2.71 NTU). Le pH initial diminue légèrement (8.11 à 7.7), une plage optimale pour la coagulation. Malgré une augmentation notable du pH à 9.3 à 40 minutes, la turbidité continue de baisser, indiquant une clarification réussie même à un pH plus élevé, potentiellement dû à la formation précoce des floes et à la production d'ions OH⁻ à la cathode.

3.3.1.2. Évolution de tous les paramètres en fonction du temps (pour 0,1 A)

Pour un courant constant de 0,1 A, l'augmentation du temps de traitement a des effets significatifs sur les paramètres mesurés :

- **Conductivité et Salinité** : Ces deux paramètres diminuent avec le temps. La conductivité est passée de 1899 à 1448 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et la salinité de 0,8 à 0,5. Cela indique l'élimination des ions et des sels dissous de l'eau au fur et à mesure que le traitement progresse.
- **TDS** : Le total des solides dissous diminue également (de 1899 à 1466 mg/litre), ce qui est cohérent avec la diminution de la conductivité et de la salinité.
- **Turbidité (NTU)** : La turbidité a montré une diminution significative et soutenue (de 10,05 à 2,71 NTU). C'est un excellent indicateur de l'élimination des particules en suspension et colloïdales,
- **pH** : Le pH fluctue. Il baisse légèrement de 8,11 à 7,7 à 30 minutes, puis remonte significativement à 9,3 à 40 minutes. Cette variation génère une bonne réduction de la turbidité.
- **MES (matières en suspension)** : Les MES ont également diminué avec le temps (de 1001,2 à 962 mg/litre), ce qui est cohérent avec une diminution de la turbidité et confirme l'élimination des solides.

Tableau .09. L'évolution des paramètres physico-chimiques de l'échantillons d'eau traitée par la technique de l'électrocoagulation en fonction de l'intensité du courant (0,5A) du temps et du pH.

Courant	0.5 A			
Temps	10min	20min	30min	40 min
La masse de l'anode (g)	Avant :24,7721 Après :24,7702	Avant :24,6348 Après :24,5627	Avant :24,3920 Après :24,2369	Avant :24,0230 Après :23,7802
La masse de Cathode (g)	Avant :25,3423 Après :25,4145	Avant :25,3371 Après :25,4078	Avant :25,2925 Après :25,3386	Avant :25,2718 Après :25,3005
Conductivité $\mu\text{s}/\text{cm}$	1444	1332	1249	1266
Salinité	0.5	0.5	0.4	0.4
TDS (mg/l)	1448	1332	1249	1266
Turbidité NUT	12,00	3,95	2,66	5,5
PH	8,4	8,37	9	9,5
MES (mg/l)	916	890	766,67	300,67

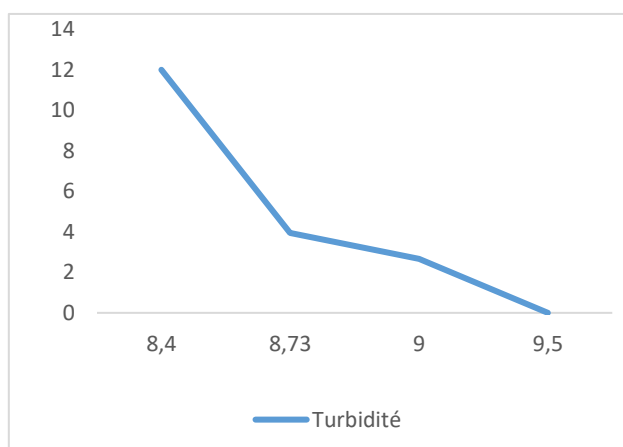


Figure .26. L'évolution de turbidité en fonction de pH a 0,5A

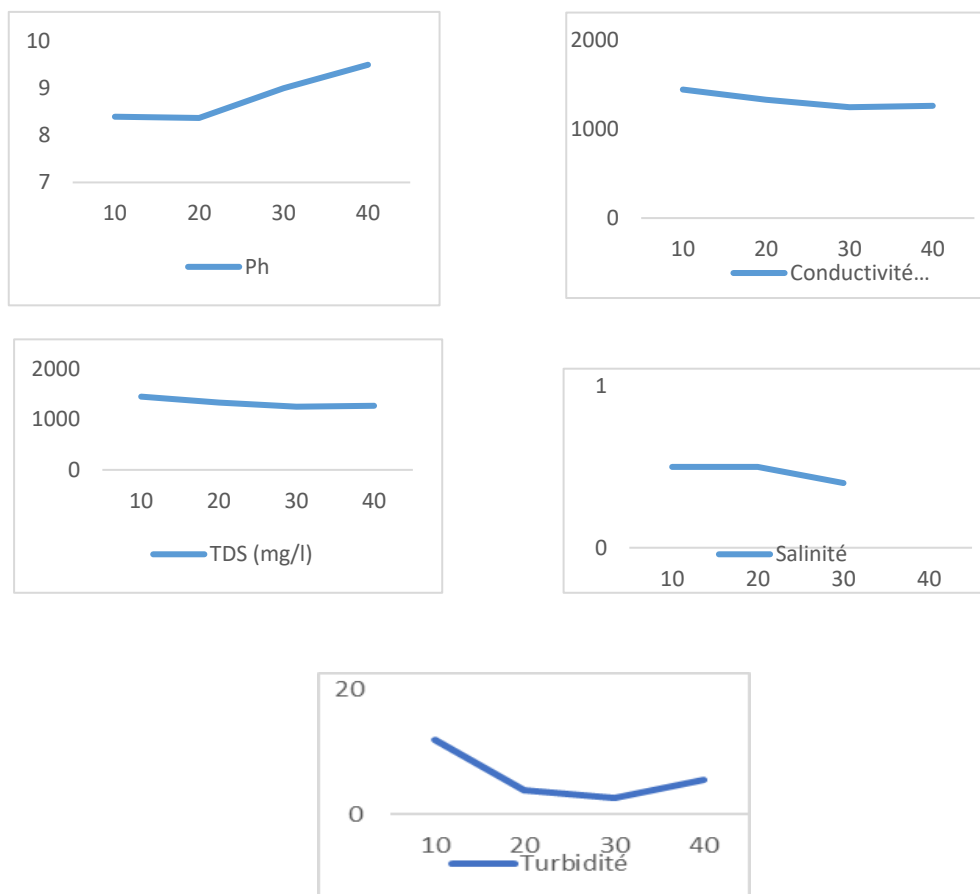


Figure .27. L'évolution des paramètres physico-chimique en fonction de temps a 0,5A

3.3.2. Analyse des Données d'Électrocoagulation à 0.5 A

3.3.2.1. Analyse des variations de turbidité et de pH (0.5A)

À 0.5A, la turbidité diminue très rapidement et efficacement jusqu'à 30 minutes (12.00 à 2.66 NTU). Le pH augmente progressivement de 8.4 à 9.5 entre 20 et 40 minutes. La légère remontée de turbidité à 40 minutes (5.5 NTU), malgré un pH élevé, pourrait indiquer une limite d'efficacité ou une redissolution partielle à des pH très alcalins, bien que la coagulation initiale soit performante.

3.3.2.2. Évolution de tous les paramètres en fonction du temps (pour 0,5 A)

- **Conductivité, salinité ,(TDS) :** Ces trois paramètres ont diminué de manière significative entre 10 et 30 minutes, passant respectivement de 1444 à 1249 $\mu\text{S}/\text{cm}$, de 0,5 à 0,4, et de 1448 à 1249 mg/L. Cette diminution est plus prononcée qu'à 0,1A, ce qui reflète une élimination plus efficace des ions et des solutés en raison d'une production accrue d'hydroxyde. La diminution est plus prononcée qu'à 0,1A, ce qui reflète une élimination plus efficace des ions et des solutés en raison d'une production accrue d'hydroxyde. Après 40 minutes, on a observé une légère augmentation (1266 $\mu\text{Ci}/\text{cm}$ et 1266 mg/L), qui peut être liée à la stabilisation des réactions ou à la redissolution de certains composés.
- **MES :** Les MES ont montré une réduction très significative et soutenue dans le temps (de 916 mg/L à 300,67 mg/L), ce qui confirme l'efficacité accrue du courant supérieur dans l'agglomération et la précipitation des solides en suspension. La performance est bien meilleure qu'à 0,1 A.

Tableau .10. L'évolution des paramètres physico-chimiques de l'échantillons d'eau traitée par la technique de l'électrocoagulation en fonction de l'intensité du courant (1A) du temps et du pH.

Courant 1 A				
Temps	10min	20min	30min	40 min
La masse de L'anod (g)	Avant :23,6036	Avant :23,3126	Avant :22,8921	Avant :22,2998
	Après :23,5202	Après :23,1095	Après:22,5340	Après:21,5636
La masse de Cathod (g)	Avant :25,2451	Avant :25,2216	Avant :25,2025	Avant :25,1713
	Après :25,3286	Après :25,2769	Après:25,2394	Après :25,2076
Conductivité $\mu\text{s/cm}$	1365	1300	1425	1180
Salinité	0,5	0,4	0,5	0,4
TDS (mg/l)	1365	1360	1425	11.80
Turbidité NUT	1,54	1,71	3,72	17,1
PH	8,15	8,20	8,17	8,65
MES (mg/l)	293	320	490	546,66

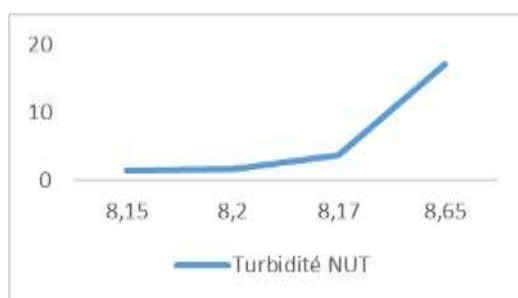


Figure .28. L'évolution de turbidité en fonction de pH a 1A

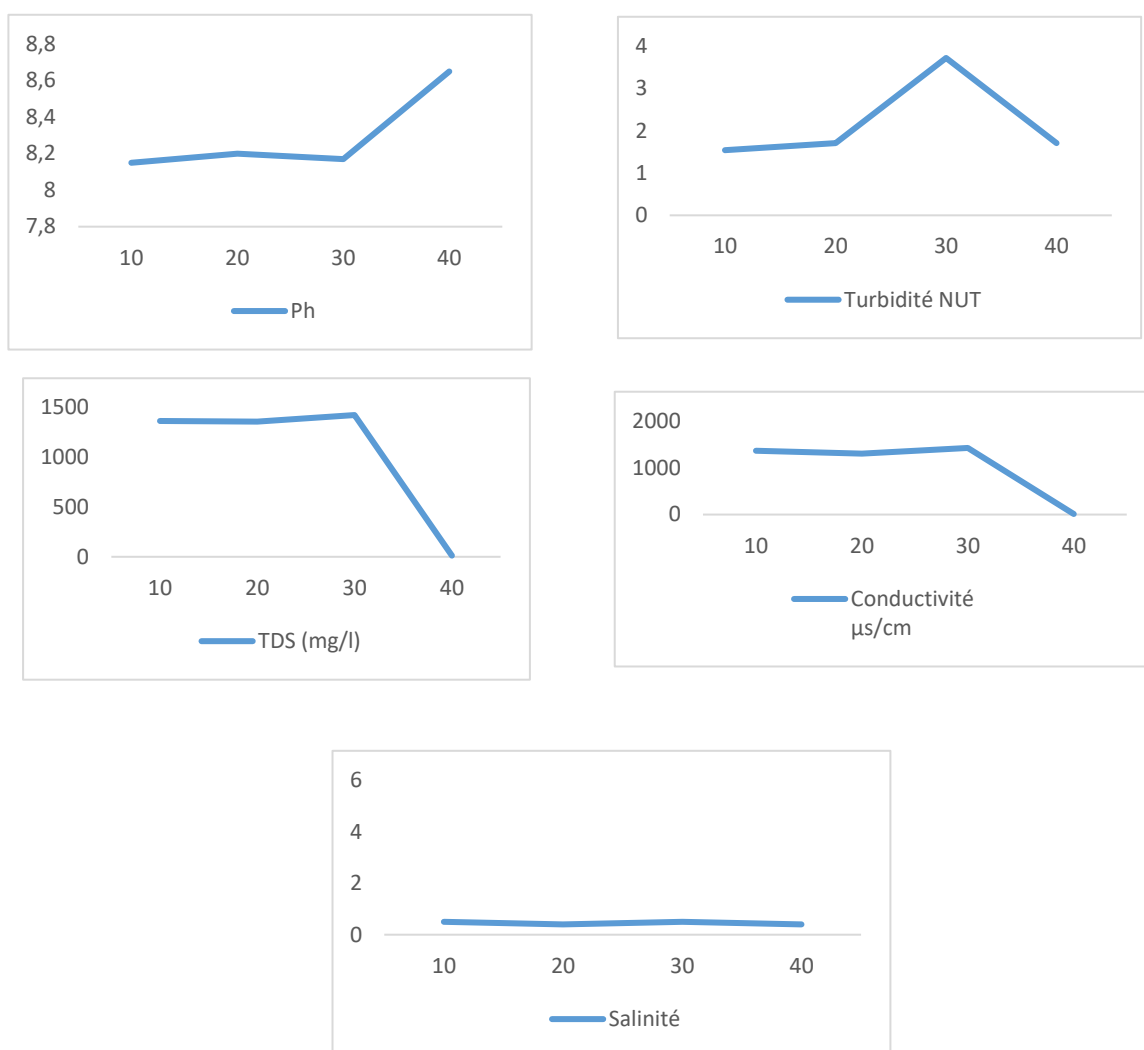


Figure .29. . L'évolution des paramètres physico-chimique en fonction de temps a 1A

3.3.3. Analyse des Données d'Électrocoagulation à 1 A

3.3.3.1. Analyse des variations de turbidité et de pH (1A)

À 1A, la turbidité démarre très bien (1.54 NTU à 10 min), mais augmente fortement avec le temps (jusqu'à 17.1 NTU à 40 min). Le pH reste stable autour de 8.15-8.20 puis monte à 8.65. Cette hausse de turbidité, malgré un pH de coagulation favorable, suggère une sur-coagulation ou une dispersion des floes due à l'intensité de courant trop élevée sur la durée, annulant l'efficacité de la clarification.

3.3.3.2. Évolution de tous les paramètres en fonction du temps (pour 1 A)

L'augmentation du courant à 1 A est un effet très sensible sur tous les paramètres :

- **Conductivité, Salinité et (TDS) :** La conductivité, la salinité et le TDS présentent des changements plus complexes. La conductivité a d'abord diminué (1365 à 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}$) à 20 minutes, puis a légèrement augmenté à 1425 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 30 minutes avant de chuter de façon spectaculaire à 1180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 40 minutes. La salinité et le TDS ont suivi des tendances similaires. Cette oscillation est due à une activité électrochimique intense et à la production d'ions à l'anode et d'oxygène à la cathode, ainsi qu'à l'élimination des ions par coagulation et précipitation.
- **MES (matières en suspension) :** Les MES augmentent de manière continue et significative au fil du temps (de 293 mg/litre à 546,66 mg/litre). Cette augmentation des MES est cohérente avec l'augmentation de la turbidité. Elle indique qu'après un certain temps, le courant 1A provoque une coagulation ou un cisaillement excessif des floes déjà formés, ce qui les rend plus petits et plus difficiles à séparer.

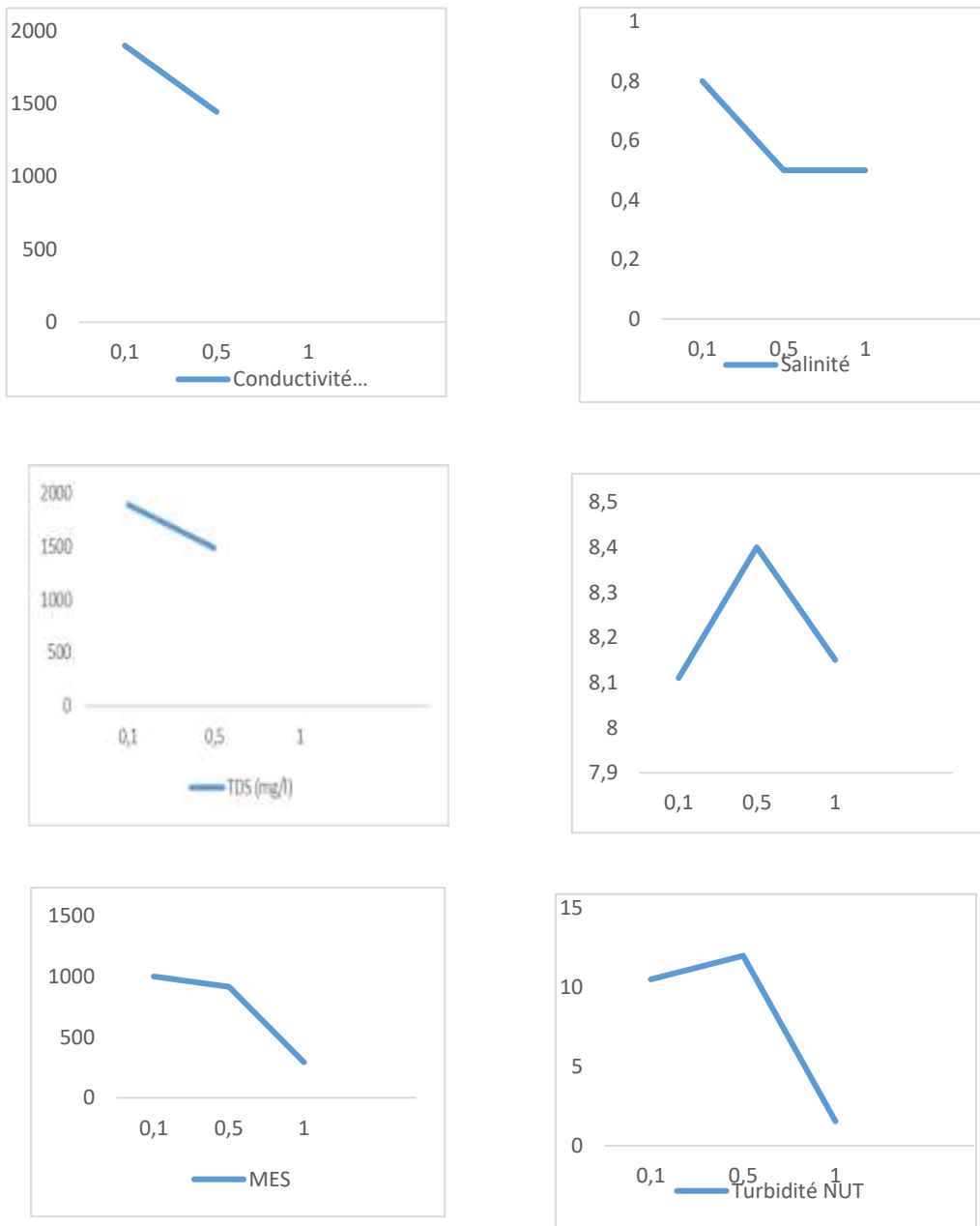


Figure .30. L'évolution des paramètres physico-chimiques fonction de courant a 10min

3.3.3.3. Analyse des variations des paramètres en fonction de courante a temps d'agitation (10 min)

Ici, nous avons fixé le traitement pendant 10 minutes, en augmentant le courant (de 0,1A à 1A) et les changements de paramètres ont été les suivants :

- **Turbidité** : elle est diminuée avec l'augmentation du courant. A 0,1 A (10,05 NTU), mais s'améliore à 0,5 A (12,00 NTU), puis 3,95 NTU à 20 min - 10 min de correction, la turbidité chute très fortement et devient excellente à 1 A (1,54 NTU). Ceci suggère que la production rapide de coagulation à des courants plus élevés est utile pour une préfiltration très rapide.
- **Le pH** : Il est resté relativement stable et légèrement basique pendant les 10 minutes, à environ 8,11 (0,1A), 8,4 (0,5A) et 8,15 (1A). Ceci indique que les conditions de pH sont restées favorables à la coagulation primaire quel que soit le courant testé
- **MES, conductivité, salinité et TDS** : Ces paramètres montrent des changements plus subtils à 10 minutes.
- La Conductivité, Salinité et TDS tendent à diminuer ou rester relativement stables entre 0.1A et 0.5A (environ 1899 vs 1444 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la conductivité). À 1A, la conductivité est à 1365 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cela suggère qu'à 10 minutes, l'efficacité de l'élimination des ions dissous ne suit pas une tendance linéaire parfaite avec le courant, mais qu'une augmentation du courant peut réduire la conductivité par élimination plus rapide des solides et certains ions.

Pour une durée courte de 10 minutes, l'augmentation du courant améliore l'efficacité de la clarification de l'eau

Tableau .11. Les tableaux d'évolution des paramètres physico-chimiques de l'échantillons d'eau traitée par la technique de l'électrocoagulation fonction de pH à (courant=1A ;temps=10min).

Courant :1A		Temps :10min	
pH	8.3		
	Avant le traitement	Après le traitement	
La masse de node (g)	Avant :20,9134 Après :20,80		
La masse de Cathode (g)	Avant :25,0506 Après:25,1020		
Conductivité µs/cm	4,46	3,71	
Salinité	2 ,3	1,9	
TDS (mg/l)	4920	3750	
MES (mg/l)	25143,33	360	
Turbidité NUT	139	195	

(Condition expérimentale : courant=1A ;pH =8,3 ;temps= 10 min)

Courant :1A		Temps:10min	
pH	10.2		
	Avant le traitement	Après le traitement	
La masse de L'anode (g)	Avant :20,6640 Après :20,5270		
La masse de Cathode (g)	Avant :25,0270 Après :25,0783		
Conductivité $\mu\text{s/cm}$	6,62	5,45	
Salinité	3	2.9	
TDS (mg/l)	5640	5610	
Turbidité NUT	55	304.5	

(Condition experimentale : courant= 1A ;pH = 10,2 ;temps=10min)

Courant :1A		Temps :10min	
pH	6.2		
	Avant le traitement	Après le traitement	
Anode (g)	Avant :21,1778 Après :21,1001		
Cathode (g)	Avant :25,0946 Après :25,1446		
Conductivité $\mu\text{s/cm}$	2.58	2.04	
Salinité	1,2	0,9	
TDS (mg/l)	2950	2000	
MES (mg/l)	23416.67	620	
Turbidité NUT	61,8	706	

(Condition experimentale : courant= 1A ;pH =6,2 ;temps= 10min)

Courant :1A		Temps :10min	
pH	4.3		
	Avant le traitement	Après le traitement	
Anode (g)	Avant :21,4423 Après :21,4230		
Cathode (g)	Avant :25,1447 Après :25,1826		
Conductivité µs/cm	3,48	3,10	
Salinité	1,7	1,5	
TDS (mg/l)	4044	3280	
MES (mg/l)	4600	896,67	
Turbidité NUT	401,6	912	

(Condition experimentale : courant=1A ;pH =4, 3 ;temps= 10min)

Traitement Par l'électrocoagulation	Courant :1A		Temps :10min	
	pH	7.10		
	Conductivité µs/cm	1365		
	Salinité	0,5		
	TDS (mg/l)	1365		
	MES (mg/l)	293		
	Turbidité NUT	1,54		

(Condition experimentale : courant=1A ;pH =7.10 ;temps=10min)



Figure.31 .L'évolution des paramètres physico-chimiques de l'échantillons d'eau traitée par la technique de l'électrocoagulation en fonction de pH à (courant=1A ;temps=10min)

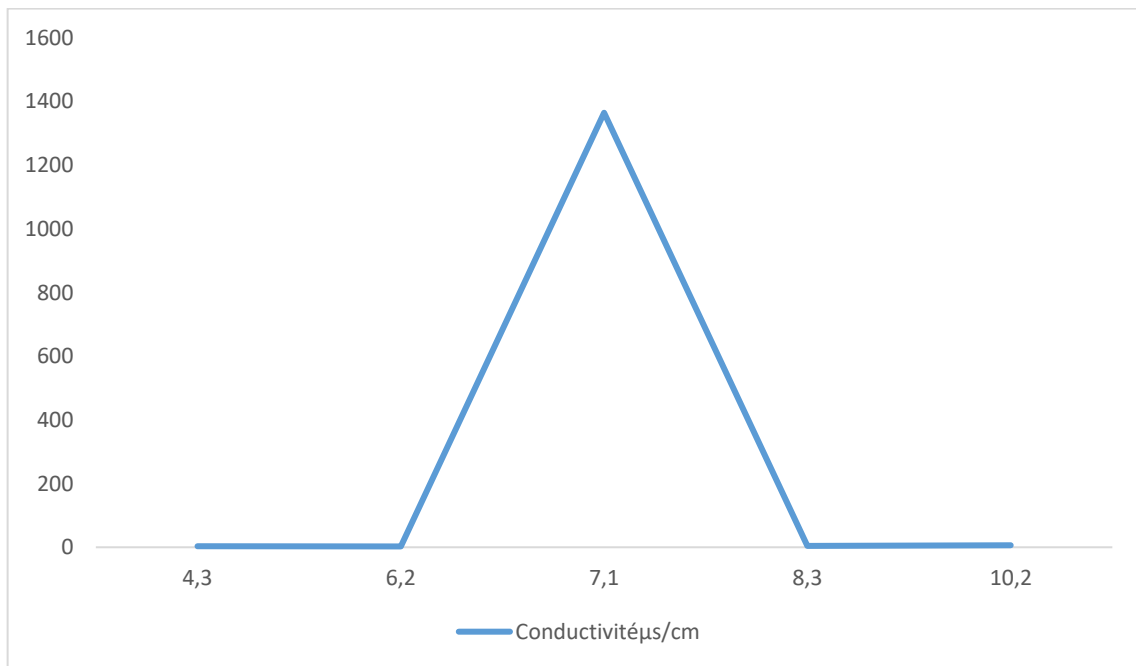


Figure. 32. L'évolution de conductivité en fonction de pH à (10min ;1A)

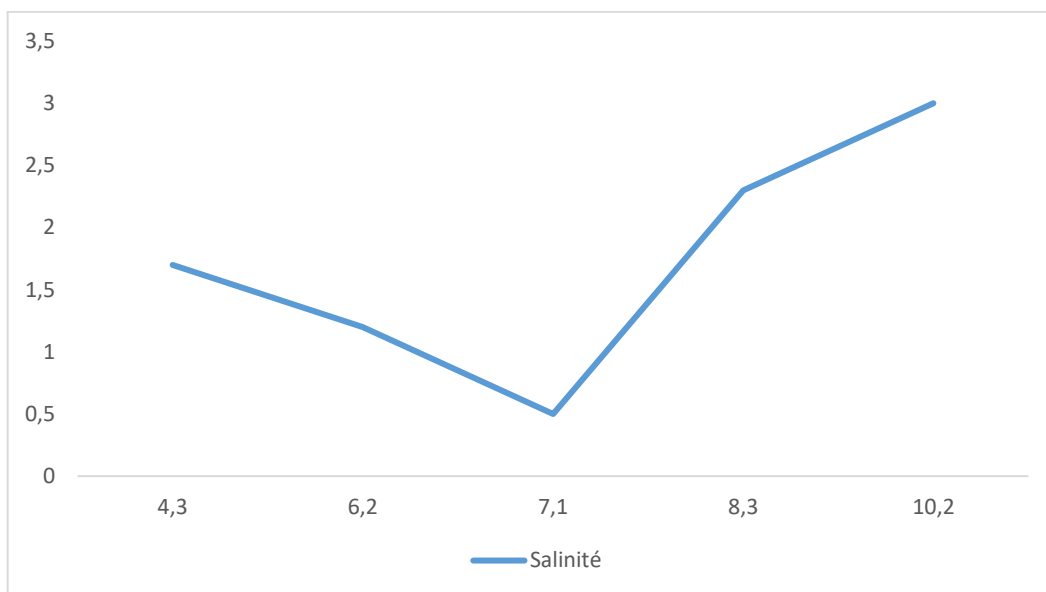


Figure. 33. L'évolution de salinité en fonction de pH à (10min ;1A)

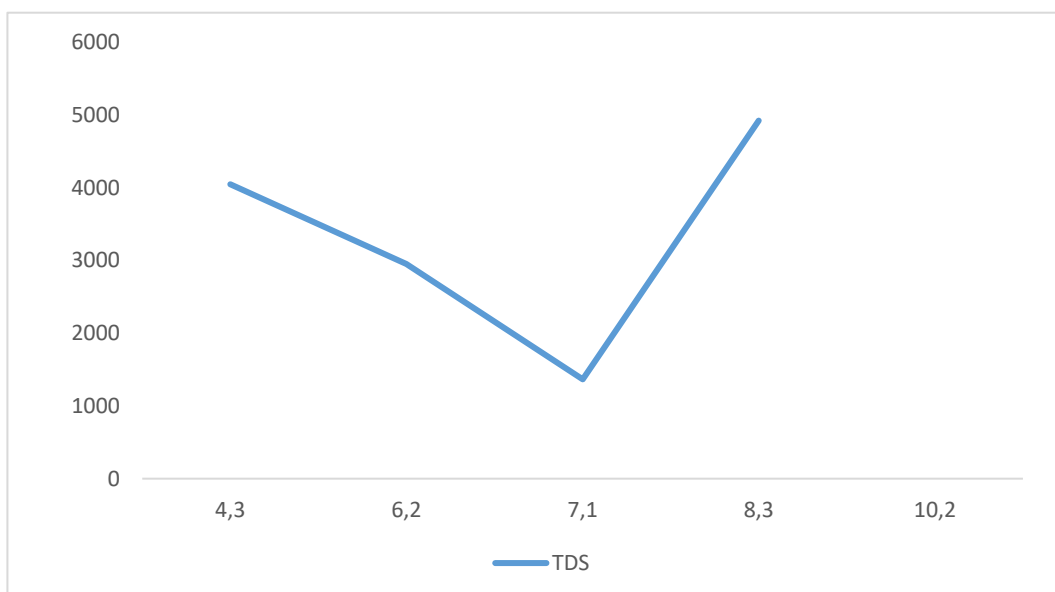


Figure .34 .L'évolution de TDS en fonction de pH à (10min ;1A)

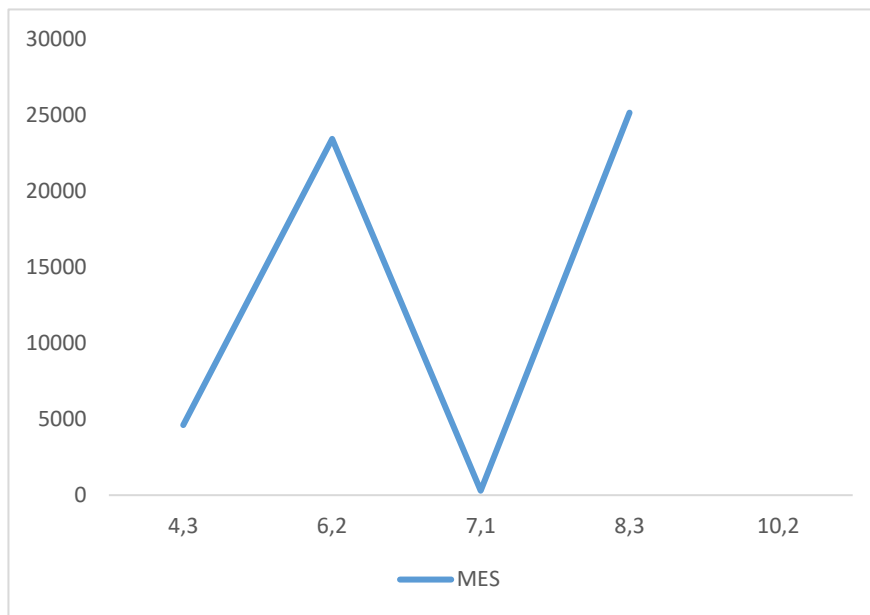


Figure .35. L'évolution de MES en fonction de pH à (10min ;1A)

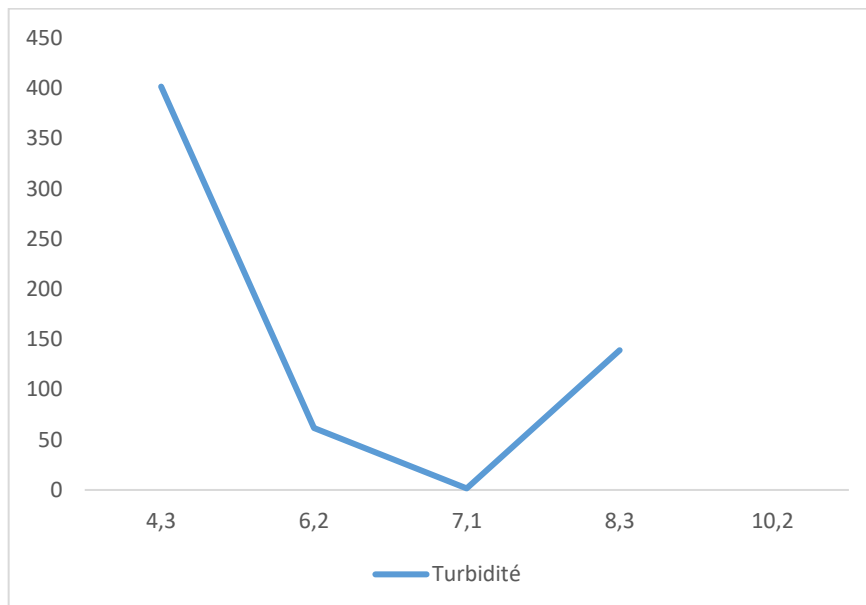


Figure .36. L'évolution de turbidité en fonction de pH à (10min ;1A)

3.3.3. 4. Analyse des variations des paramètres en fonction de pH à (10min ;1A)

Cette analyse compare la performance de l'électrocoagulation à un courant (1A) et un temps (10min) fixes, en faisant varier uniquement le pH initial de l'échantillon d'eau.

- **Conductivité** : Dans tous les cas, la conductivité a diminué après le traitement, comme prévu par le processus d'électrocoagulation qui élimine les ions et les particules chargées de la solution.

Valeur de conductivité à pH= 7,10 (1365 $\mu\text{S}/\text{cm}$) : Cette valeur correspond à la conductivité initiale de l'état optimisé qui a donné la meilleure perfusion (1,54 NTU).

- Les courbes montrent que la **salinité** et le **TDS** diminuent généralement après le processus d'électrocoagulation, ce qui indique que le processus contribue à l'élimination des sels et du TDS de l'eau et que la diminution est la plus importante à pH= 7,1
- **MES** : La diminution des MES a été très importante pour toutes les valeurs de pH testées, passant de plusieurs milliers de mg/L à quelques centaines. Ceci confirme la capacité de l'électrocoagulation à agglomérer efficacement les solides en suspension, en particulier à pH =7,1.
- **Turbidité**: Il s'agit de la courbe la plus importante. Les performances en matière de turbidité sont variables et représentent de faibles valeurs à un pH = 7,1.
- Il est clair que le pH 7,10 est le pH optimal, car il conduit à une turbidité finale très faible (1,54 NTU), ce qui indique une purification presque parfaite.

3.4. Le taux d'élimination

$$E (\%) = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

C_i : La concentration initiale de la pollution dans l'eau (avant le traitement).

C_f : La concentration finale de la pollution dans l'eau (après le traitement).

Tableau.12. L'évolution de taux d'éliminations des floes en fonction de temps à courant=0,1A

Temps (min)	10	20	30	40
Pourcentage de turbidité éliminer (%)	97,78	98,44	99,15	99,40
Pourcentage de MES éliminer (%)	92,95	93,01	93,15	93,23

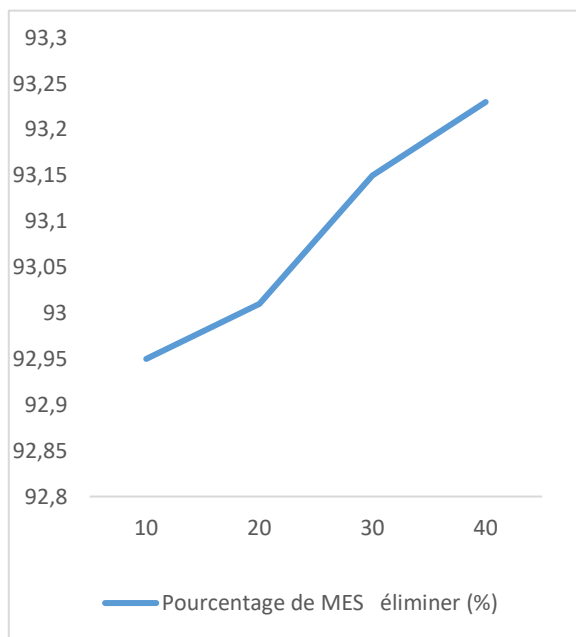


Figure .37. Taux d'éliminations de MES à 0.1A

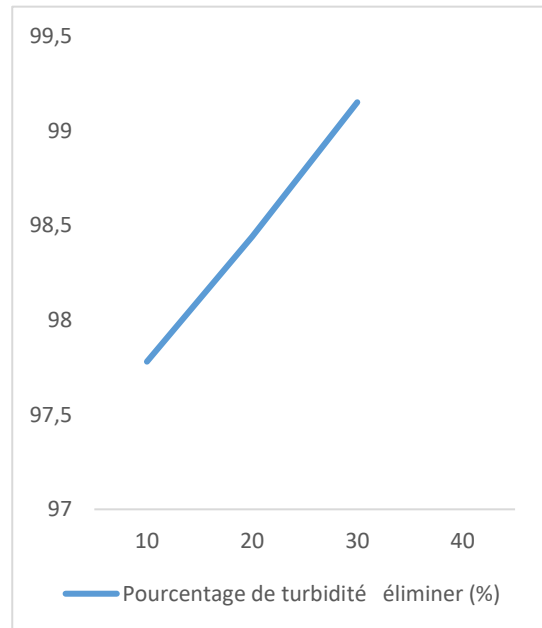


Figure .38. Taux d'éliminations de turbidité à 0.1A

Tableau .13. L'évolution de taux d'éliminations des floes en fonction de temps à courant=0,5A

Temps (min)	10	20	30	40
Pourcentage de turbidité éliminer (%)	97,35	99,13	99,41	98,79
Pourcentage de MES éliminer (%)	93,55	93,73	94,60	97,88

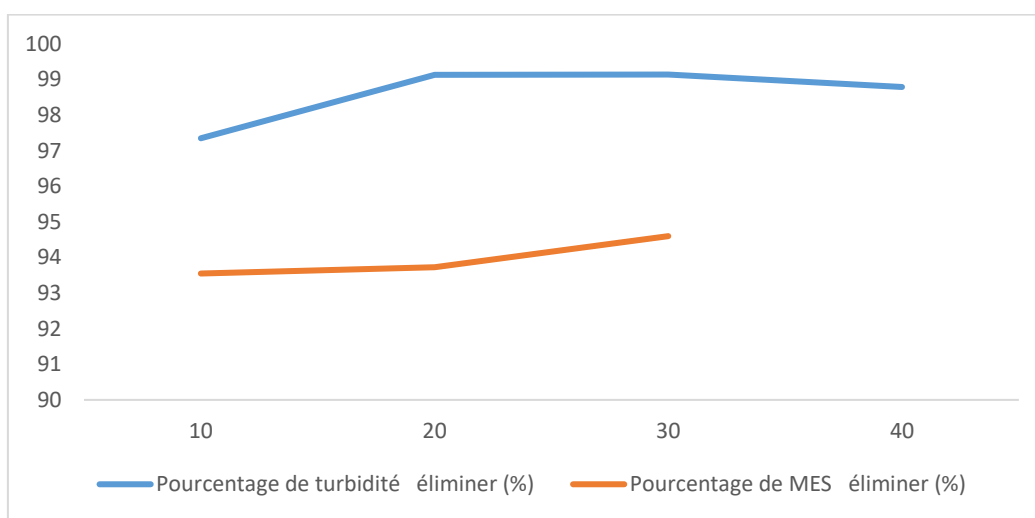


Figure. 39. Taux d'éliminations de turbidité et MES à 0,5A

Tableau .14. L'évolution de taux d'éliminations des floes en fonction de temps à courant=1A

Temps (min)	10	20	30	40
Pourcentage de turbidité éliminer (%)	99,66	99,62	99,18	96,23
Pourcentage de MES éliminer (%)	97,93	97,75	96,55	96,15

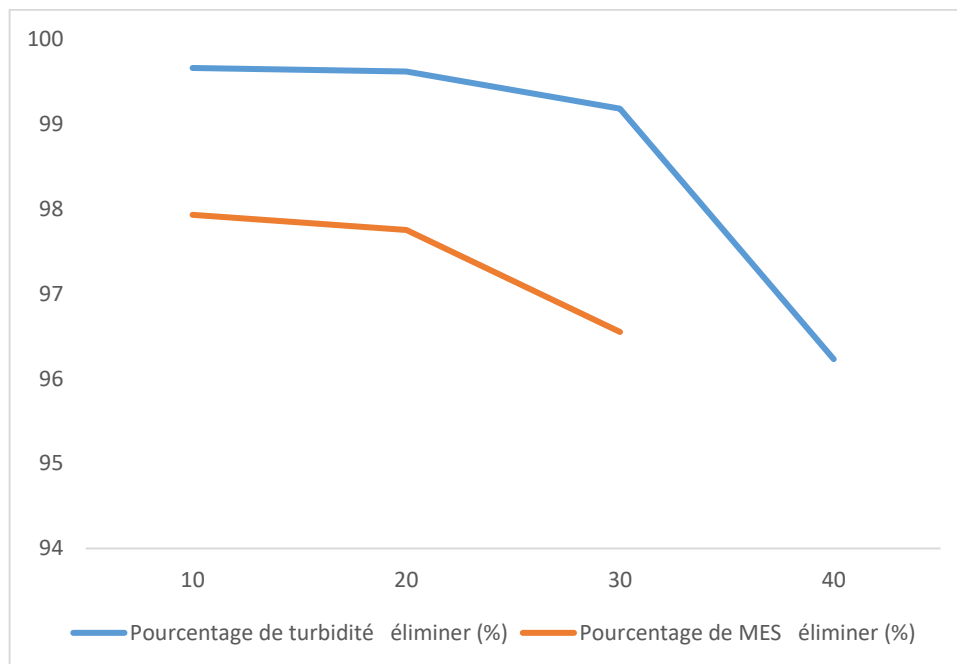


Figure .40. Taux d'éliminations de turbidité et MES à 1A

3.4.1. Analyse des Taux d'Élimination (Turbidité et MES)

Le taux d'élimination (E%) indique le pourcentage de polluants retirés de l'eau. Plus il est élevé, meilleure est la performance.

- **A 0,1 Ampère :** Bonne élimination globale (turbidité = 98-99%, MES =93%),
- **À 0,5A :** Très grande efficacité. La turbidité est rapidement améliorée (environ 97-99 %) et l'élimination de MES s'améliore fortement (environ 94-98 %) avec le temps.
- **À 1A :** Initialement très rapide et efficace (~99,6 % de turbidité et 97,9 % de MES en 10 minutes), mais l'efficacité diminue fortement avec l'allongement de la durée du traitement.

Alors, 1A est très rapide mais nécessite un contrôle précis du temps de traitement.

Tableau .15.Résultats des analyses physico-chimiques des eaux de l’usine de papier EMBAG traitées par coagulation floculation.

pH	7,08
Conductivité µs/cm	4,19
Salinité	2,1
TDS (mg/L)	4400
Turbidité (NUT)	1,12
MES (mg/L)	213,09

Tableau.16.La comparaison sur le pourcentage d’élimination entre coagulation -floculation et électrocoagulation

	MES	Turbidité	TDS	Salinité	Conductivité
Coagulation- floculation (%)	98,50	99,75	0,2	0,09	0,23
Électrocoagulation (%)	97,93	99,66	35,31	44,44	32

- L'analyse de la courbe et du tableau montre que les deux méthodes sont également efficaces pour purifier l'eau en éliminant les solides dissous et la turbidité. L'électrocoagulation se caractérise par sa capacité supplémentaire à réduire le TDS, la salinité et la conductivité, ce qui n'est pas le cas de la coagulation et de la floculation. L'électrocoagulation est donc beaucoup plus largement utilisée pour le traitement de l'eau.



Conclusion

Cette étude vise à purifier les eaux usées industrielles, notamment les eaux de l'usine EMBAG au niveau de Bordj Bou Arreridj, où nous avons réalisé plusieurs expériences sur un échantillon d'eau de l'usine sous l'influence de plusieurs facteurs, notamment le temps d'agitation, le pH, et la force du courant, puis suivi la présence de plusieurs facteurs physico-chimiques, la salinité, la turbidité, la conductivité, et MES, TDS...etc

L'étude menée sur le traitement des eaux usées industrielles par électrocoagulation a clairement démontré l'efficacité et la pertinence de cette méthode. Cette technologie moderne et respectueuse de l'environnement se distingue des procédés conventionnels par sa capacité à générer des coagulants in situ (dans notre cas, des ions de fer) par le biais du courant électrique, éliminant ainsi le besoin d'ajouter des produits chimiques externes coûteux et potentiellement polluants.

Les résultats expérimentaux sont particulièrement convaincants. En optimisant les paramètres tels que le courant (1 A), le pH (7,10) et le temps de traitement (10 minutes), un taux d'élimination de la turbidité exceptionnel de 99,66% a été atteint. Au-delà de la seule turbidité, le succès de cette épuration s'étend à des réductions significatives de (TDS), de la salinité et de la conductivité, qui sont des indicateurs clés de la qualité de l'eau.

En résumé, l'électrocoagulation représente une solution puissante et polyvalente pour le traitement des effluents industriels à partir d'une unité d'électrocoagulation. Ses performances élevées, associées à ses avantages environnementaux (réduction de l'utilisation de produits chimiques et de la production de boues), en font une technologie prometteuse pour relever les défis actuels et futurs de la gestion des eaux usées industrielles. Ce travail confirme le potentiel de l'électrocoagulation en tant qu'approche fiable pour atteindre les normes fixées par l'Union européenne.



Références

Thèse Sébastien Renoul. (2006). Institut National Polytechnique de Lorraine,

ASSAAD ,A., (24 avril 2014). Pollution anthropique de cours d'eau : caractérisation spatio-temporelle et estimation des flux. Thèse de doctorat. Université de Lorraine, pp41-43.

(Association Santé environnement France)

ABIBSI, N., (2011). Reutilization des eaux usées épurées par filtres plantes (phytoépuration) pour l'irrigation des espaces verts application à un quartier de la Ville de Biskra. Mémoire de Magister. Université de Mohamed Khider-Biskra.

Asaithambi ,P.; Studies on various operating parameters for the removal of COD from pulp and paper industry using electrocoagulation process; Department of Chemical Engineering, National Institute of Technology, Trichy 620 015, India.

Adhoum *et al.*;(2004).Treatment of electroplating wastewater containing Cu^{2+} , Zn^{2+} and Cr(VI) by electro-coagulation.

BENMOUSSA, A.; (2023). Traitement des eaux usées industrielles de l'Unité EMBAG-BBA. Mémoire pour obtenir le diplôme de Master. Université Mohamed El Bachir El Ibrahim, BBA.

Ballay, D., et Blais J. F.; (1998). Le traitement des eaux usées. Journal of Water Science, vol. 11, 1998, p. 77-86.

Boujema ,S.; (2011).Contrôle des procédures de traitement des eaux usées dans la STEP du grand Bizerte. Mémoire de licence.

Berland J.M., Boutin C., Molle P & Cooper P., (2001). Guide procédés extensifs d'épuration des eaux usées adaptés aux petites et moyennes collectivités (500-5000 éq hab) : mise en œuvre de la directive du Conseil n° 91-271 du 21 mai 1991 relative au traitement des eaux urbaines résiduaires. Luxembourg : Office international de l'eau, 41p.

Bessedik ,M.; (2012) traitement et épuration de l'eau, université de Tlemcen

Berland, J. M., Boutin, C., Molle, P. and Cooper, P., (2001) ; Procédés extensifs d'épuration des eaux usées. Office des publications des communautés européennes, Luxembourg.

Références bibliographiques

BENKADDOUR, B.; (2018). Contribution à l'étude de la contamination des eaux et des sédiments de l'Oued Cheliff (Algérie). Thèse de doctorat. Université de Perpignan via Domitia, et université de Mostaganem, p15.

CHAOUCH, N.; (2014). Utilisation des sous-produits du palmier dattier dans le traitement physico-chimique des eaux polluées. Thèse de doctorat. University Hadj Lakhdar – Batna.pp1-11. uelma, pp1-18-37-39-45

Chen *et al.*; (2000). Electrocoagulation and électroflottation of restaurant waste water ASCE J.

Dégremont, M.; (1978). Technique De L'eau. Huitième édition.

D.Chpman,A.; (1996). water quality assessments et FNSPON second edition, Unisco/Who/Unep,

Directive 2000/60/CE, du 23 octobre 2000, JOCE du 22 décembre (2000) [archive], sur legifrance.gouv.fr (consulté le 29 août 2022).

ESJARDIN , R., (1997). Le traitement des eaux, 2ème édition de l'école Polytechnique de Montréal.

Fournier ,D, E., (2008). Coagulation Flocculation Sédimentation des eaux usées Industrielles, McGill University

Faby ,J,A.; Brissaud ,F.; (1997). L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation. Office Internationale de l'Eau, 76 pages.

BOUZIT , F.; (2012). Etude d'un mécanisme de traitement des eaux superficielles à base des plantes végétales. Mémoire de Magister, Université 8 Mai 1945- Guelma.

Fechkeur, I, A.; & Ferik ,M.; (2023) .Control de qualité des eaux usée traitées au niveau de ma STEP de Mostaganem, mémoire master université Mostaganem (Algérie),p63.

GROSCLAUDE, G.; (1999). L'eau usages et polluants.Ed INRA, Paris 1999 tomeII.

GHRIBI ,F. ; (2011). Traitement des rejets de papeterie par procédé électrochimique, Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique,

Graeme, N.; (2024) . PET leader mondial dans le traitement de l'eau,(1984.mise à jour 01/2024) disponible sur : <https://petwatersolutions.com/fr/> , consulté septembre.

Henze, D ,K., Seinfeld, N,L, Ng.; Kroll, J,H,T,M.; Jacob, Fu, D.J.; and Heald, C,L.; (2008). Global modeling of secondary organic aerosol formation from aromatic hydrocarbons: High- vs. low-yield pathways, Atmos, Chem. Phys.

Hadj-Sadok, Z,M., (1999). Modélisation et estimation dans les bioréacteurs ; prise en compte des incertitudes : application au traitement de l'eau.Thèse : Faculté des sciences de l'ingénieur, Université de Nice – Sophia Antipolis, France.

Inan *et al.*; (2004). Olive mill waste water treatment by means of electrocoagulation Sep. Purif. Technol.

Journal Officiel de la République Algérienne.; (2006).

Jeppsson, U., (1996). Modelling Aspects of Wastewater Treatment Processes. These: Department of Industrial Electrical Engineering and Automation (IEA), Lund Institute of Technology (LTH), Lund University, Sweden.

Kramer, K,L.; (2018).Spatial Distribution of Sewage Pollution on a Hawaiian Coral Reef. Marine Pollution Bulletin, 130: 335-347.

Kabdaşlı, I.; Arslan-Alaton, T.; Ölmez-Hancı & Tünay, O.; (2012). Electrocoagulation applications for industrial wastewaters: a critical review; Received 30 Mar 2012, Accepted 18 Jul 2012, Published online: 06 Nov 2012 ;Pages 2-45.

Kara ,K.; (2013). Pollution de l'environnement, Université Mentouri, Constantine.

Kobyas et al.; (2003) .Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes.

Kettab, A.; (2001). Les ressources en eau en Algérie : stratégies, enjeux et vision.

Kreetachat *et al.*;(2006). Effects of ozonation process on lignin-derived compounds in pulp and paper mill effluents Biochem.

MEKHALIF, F .; (2009).Reutilisation des eaux résiduaires industrielles épurées comme eau d'appoint dans un circuit de refroidissement. Mem Magister, Université du 20 Aout 1955 Skikda, p3.

Metahri, M,S.; (2012). Elimination 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 doctorat). Université Mouloud Mammeri, Algérie.

Références bibliographiques

- Mottot, Y.; (2000).** Coagulants et flocculants, Texte des 2792 conférences de l'Université de tous les savoirs.
- OMS.; (2006).** Guidelines for the safe use of waste water, excreta and greywater. P35.
- Pronost, J., Pronost, R., Deplat, L., Malrieu, J., Berland, J, M.; (2002).** Station d'épuration : dispositions constructives pour améliorer leur fonctionnement et faciliter leur exploitation.
- Perera ,P.; et Baudot, B.;(1991).** Procédés extensifs d'épuration des eaux usées, France.
- Pulp and Mills,P.;(1998).** Pollution Prevention and Abatement Handbook, World Bank Group, July.
- POULIOT, Y.; and NOÛE, J.; (1985).** Mise au point d'une installation-pilote d'épuration tertiaire des eaux usées par production de microalgues.
- REJSEK, F.; (2002).** Analyse des eaux aspects réglementaires et techniques, Ed CRDP, Aquitaine. France.
- Renou, S. ; (2006).** Analyse de cycle de vie appliquée aux systèmes de traitement des eaux usées, Ingénieur génie des procédés et des produits, Institut national polytechnique de Lorraine, P 258.
- RODIER ,J.; et coll ,R.; (2005).** L'analyse de l'eau (eaux naturelles- eaux résiduaires- eau de mer), 8ème édition, Dunod, Paris.
- Rajoria, S.; Vashishtha ,M.; and Sangal, V, K.; (2022).** Traitement des eaux usées de l'industrie de l'électroplacage .
- Rajoria, S.; Vashishtha, M.; and Sangal, V, K.; (2022).** Treatment of electro plating industry wastewater: are view on the various techniques, Environ. Sci. Pollut. Res.
- Rabeh, A, A. ; (2012).** Elimination des métaux lourds (Cd, Pb, Cr, Zn et As) des eaux usées industrielles et naturelles par le procédé d'infiltration-percolation.
- Shengzong, Z.; (2017).** Le 9ème Forum Européen FCPAE, environnement, traitement des eaux.
- Vandermeersch, S.; (2006).** Etude comparative de l'efficacité des traitements d'épuration des eaux usées pour l'élimination des micro-organismes pathogènes.
- The United Nations World Water Development Report.; (2017).** Wastewater – The Untapped Resource.

Références bibliographiques

Thompson ,G *et al.*;(2001).The treatment of pulp and paper mill effluent: a review, Bioresour. Technol.

Vilagines ,R. ; (2003). Eau, environnement et santé publique. Introduction à l'hydrologie, 2^e édition, Editions Tec&Doc, P198.

Zaoui, Y , N.; (2023). Diagnostic et étude d'extension d'une station d'épuration Des eaux usées,(Doctoral dissertation) ,de la ville d'Ain Temouchent .

Zongo, I .; (2009). Etude expérimentale et théorique du procédé d'électrocoagulation : application au traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie, Thèse de doctorat ;Université de Nancy.