

FACULTE : DES SCIENCES  
DEPARTEMENT : DE CHIMIE  
N° :.....



DOMAINE : SCIENCE DE MATIERE  
FILIERE : CHIMIE  
OPTION : Chimie de l'environnement

**Mémoire pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique**

**Présenté Par:**

BEN CHABANE Sara

BEN HAMIDA Chaima

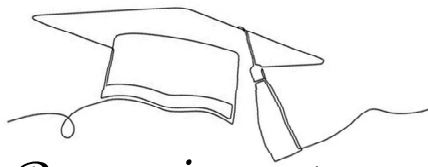
**Intitulé**

**Dépollution d'un effluent de laiterie par  
électrocoagulation en réacteur agité**

**Soutenu devant le jury composé de:**

Pr. ZEROUAL Larbi	Université de M'sila	Président
Dr. BEKRENTCHIR Khaida	Université de M'sila	Rapporteur
Dr. BERARMA Khadidja	Université de M'sila	Examineur
Mr. HAMOUDA Yassine	Université de M'sila	Représentant de l'incubateur
Mr. CHERIFI Abdelghafour	Hodna Lait M'sila	Représentant du partenaire économique

**Année universitaire : 2023 /2024**



## Remerciements

Merci

Tout d'abord, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné la force et la patience pour mener à bien ce travail.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réussite de notre formation et qui nous ont aidé à rédiger cette thèse.

Je voudrais tout d'abord exprimer notre profonde gratitude à ma directrice de thèse, MS. "**Khalida.Bekrentchir**" pour son encadrement, sa patience et sa confiance tout au long de ce travail de recherche. Ses précieux conseils, son expérience et son soutien indéfectible ont été inestimables et ont grandement contribué à la réussite de ce projet.

Il faut se souvenir, Monsieur le président du jury de cette mémoire. Nous avons nos remerciements des membres du jury, afin d'accepter l'examen.

J'adresse également mes sincères remerciements à tous les professeurs du Département de Chimie de l'Université de M'sila pour la qualité de leur enseignement et les connaissances qu'ils m'ont transmis au cours de nos années d'études. Leur passion et leur dévouement à la recherche nous ont inspiré et motivé à poursuivre nos questions scientifiques.

Un merci spécial à nos collègues et amis pour leurs encouragements, leurs échanges intellectuels stimulants et pour tous les moments partagés.

Nous ne pouvons pas oublier notre famille "Ben Hamida et Ben chaaban" pour son soutien indéfectible et sa confiance constante en nous. Leurs encouragements ont été notre refuge et notre motivation tout au long de notre parcours académique.

Enfin, nous ne pouvons que remercier toutes les personnes ayant contribué directement ou indirectement à la préparation de cette thèse. Que ce soit par des échanges enrichissants, des conseils ou simplement par leur présence, leur contribution a été inestimable.

Cette thèse est le fruit d'un travail d'équipe et personnel, et nous sommes très reconnaissants à tous ceux qui nous ont accompagnés. »

Louange à Dieu d'abord, puis merci à vous tous.





# Dédicace

«Au nom de Dieu le tout puissant et le très miséricordieux par la grâce duquel on a pu réaliser ce travail que je dédie : »

A deux étoiles qui m'ont éclairée le chemin de la vie. A ceux qui m'ont tout donné sans

rien en retour : Mes très chers parents. Par leur grand soutien et leurs encouragements, par leurs dévouements exemplaires et les énormes sacrifices qu'ils m'ont consentis durant mes études et qui ont toujours aimé me voir réussir : Je ne trouverai jamais les mots pour les remercier; Que Dieu vous Garde et vous Alloue bonne santé, bonheur, prospérité et vous

Offre le Paradis de votre choix,

A mes grands-parents Que Dieu les Protège et leur Prête une bonne santé et une longue vie.

À mon encadreur « Khalida Bekrentchir » pour sa patience, sa diligence et sa réactivité lors de la préparation de ce mémoire.

Mes frères : Mohamed, Saber, Monir, Zohir, Khaled .

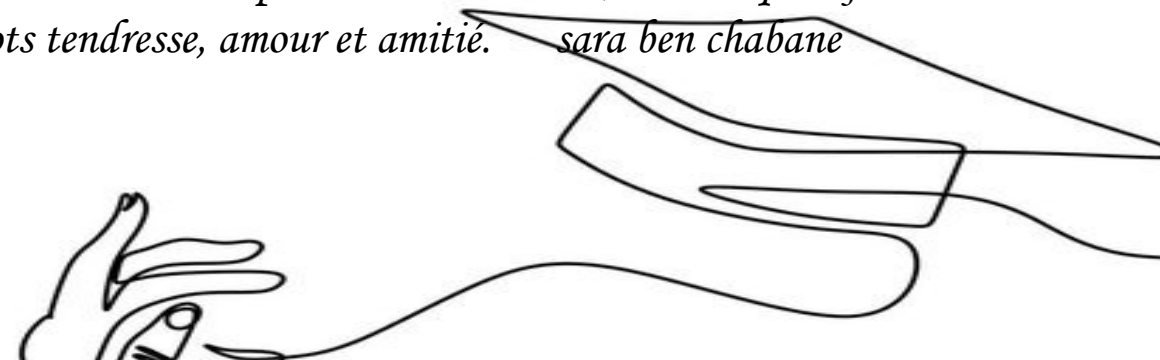
Mes sœurs : Habiba, Samira, Nadia, Chahla, Dalal

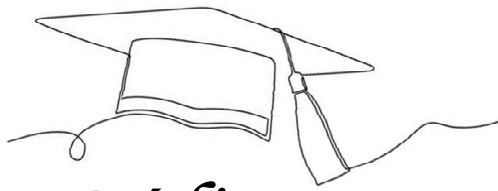
Mes amis : Ayla, Samah, Samia, Nour, Fatima, Assia, Amira, Rawan , Lili

A mon cher Binôme : Ben hemida Chaima, Nulle dédicace et nulle parole ne puissent exprimer ma profonde affection à ton égard. Je te souhaite tout le bonheur et le succès que tu mérites tant.

A tous ceux qui tiennent une place dans mon cœur, avec lesquels je partage les mots tendresse, amour et amitié.

sara ben chabane





# Dédicace

*Avec tous mes sentiments de respect, avec l'expérience de ma reconnaissance, je dédie ma remise de diplôme et ma joie.*

*À mon paradis, à la prunelle de mes yeux, à la source de ma joie et mon bonheur, ma lune et le fil d'espoir qui allume mon chemin, ma moitié  
maman.*

*À celui qui m'a fait une femme, ma source de vie, d'amour et d'affection,  
à mon support qui était toujours à mes côtés pour me soutenir et  
m'encourager, à mon prince papa.*

*À ma grande sœur à son mari Zineb et Islam qui n'a pas cessé de me  
conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études.*

*À mon adorable petite sœur Khawla, qui sait toujours comment  
procurer la joie et le bonheur pour toute la famille.*

*À mon encadreur « Khalida Bekrentchir » pour sa patience, sa diligence  
et sa réactivité lors de la préparation de ce mémoire.*

*Son oublier mon binôme Sarra pour son soutien moral, sa patience et sa  
compréhension tout au long de ce projet.*

*À toutes mes amies Rahma, Amira, Rawane, Lilya, Fatima, Samah, qui  
m'ont toujours encouragé et à qui je souhaite plus de succès.*

*À tous qui m'aiment.*

*Ben hamida Chaima*



**Résumé :** Cette étude porte sur le traitement des eaux usées laitières à l'aide d'un processus électrochimique. Pour ce faire, une nouvelle conception a été proposée, combinant les processus d'électrocoagulation et d'électroflottation. Dans un tel procédé, l'électrocoagulation joue le rôle principal dans la déstabilisation et l'agrégation des particules fines, tandis que l'électroflottation est responsable de la flottation des floes formés dans l'effluent de l'unité d'électrocoagulation. L'influence de la densité de courant, du temps de traitement, du pH initial de l'effluent et de la conductivité sur les performances du procédé a été évaluée en mesurant l'efficacité d'élimination la turbidité et des matières en suspension (MES). Les résultats obtenus dans cette étude suggèrent que cette combinaison est un procédé fiable pour le traitement des effluents laitiers et qu'elle permet d'obtenir une élimination de 89 % de la turbidité et de 92 % des MES à 26,3 mA/cm<sup>2</sup> pendant 60 minutes.

**Mots clés :** Effluent laitier, électrocoagulation, électroflottation, turbidité, matières en suspension.

**Abstract:** This study investigated the treatment of dairy wastewater using an electrochemical process. To achieve this goal, a new design was proposed, combining the processes of electrocoagulation and electroflotation. In such a process, electrocoagulation plays the main role in destabilizing and aggregating fine particles, while electroflotation is responsible for flotation of the floes formed in the effluent from the electrocoagulation unit. The influence of current density, treatment time, initial effluent pH and conductivity on process performance was evaluated by measuring turbidity and suspended solids (SS) removal efficiency. The results obtained in this study suggest that this combination is a reliable process for treating dairy effluent, and able achieve 89% removal of turbidity and 92% of SS at 26.3 mA/cm<sup>2</sup> for 60 minutes.

**Key words:** Dairy effluent, electrocoagulation, electroflotation, turbidity, suspended solids.

**المخلص:** بحثت هذه الدراسة في معالجة مياه الصرف الصحي للألبان باستخدام عملية كهروكيميائية. ولتحقيق هذا الهدف، تم اقتراح تصميم جديد يجمع بين عمليتي التخثير الكهربائي والتعويم الكهربائي. في مثل هذه العملية، يلعب التخثير الكهربائي الدور الرئيسي في زعزعة استقرار وتجميع الجسيمات الدقيقة، في حين أن التعويم الكهربائي مسؤول عن تعويم الكتل المتكونة في النفايات السائلة من وحدة التخثير الكهربائي. كما تم تقييم تأثير كثافة التيار، ووقت المعالجة، والأس الهيدروجيني الأولي للنفايات السائلة والتوصيلية على أداء العملية من خلال قياس كفاءة إزالة العكارة والمواد الصلبة العالقة (SS). أشارت النتائج التي تم الحصول عليها في هذه الدراسة إلى أن هذه التركيبة هي عملية موثوقة لمعالجة النفايات السائلة للألبان، وقادرة على تحقيق إزالة 89% من التعكر و92% من المواد الصلبة العالقة عند 26.3 ملي أمبير/سم<sup>2</sup> لمدة 60 دقيقة.

**الكلمات الرئيسية:** نفايات الألبان السائلة، التخثير الكهربائي، التعويم الكهربائي، التعكر، المواد الصلبة العالقة.

# Table des matières

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## Chapitre I : Généralités sur les eaux résiduaires de laiterie

I.1	Définition de pollution de l'eau.....	3
I.2	Principaux paramètres utilisés pour caractériser la pollution.....	3
I.2.1	Paramètres physiques.....	3
I.2.1.1	Turbidité.....	3
I.2.1.2	Matières en suspension (MES) .....	3
I.2.1.3	Matières volatiles en suspension MVS.....	4
I.2.1.4	Matières sèches totales (MST) .....	4
I.2.1.5	Température.....	4
I.2.1.6	Conductivité.....	4
I.2.2	Paramètres chimique.....	4
I.2.2.1	Potentiel d'hydrogène (pH) .....	4
I.2.2.2	Demande biologique en oxygène (DBO) .....	4
I.2.2.3	Demande chimique en oxygène (DCO) .....	4
I.2.2.4	L'azote (N) .....	4
I.2.2.5	Le phosphore (P) .....	5
I.2.2.6	Les métaux lourds.....	5
I.2.2.7	Matière oxydable (MO) .....	5
I.2.3	Paramètres organoleptiques.....	5
I.2.3.1	La coloration.....	5
I.2.3.2	Odeur – Saveur.....	5
I.2.4	Paramètres biologiques.....	5
I.3	Les sources de pollution.....	5
I.3.1	Pluviales.....	5
I.3.2	Agricoles.....	5
I.3.3	Domestique.....	6
I.3.4	Industrielle.....	6
I.4	L'industriel laiterie.....	6
I.4.1	Définition lait.....	6
I.4.2	Composition de lait.....	7
I.4.3	Origine des rejets Laitiers.....	8
I.4.3.1	Eaux de refroidissement et condensats.....	8
I.4.3.2	Eaux résiduaires de lavage.....	8
I.4.3.3	Eaux issues du produit.....	9
I.4.4	Caractéristiques des effluents laitiers.....	9

I.4.5	Normes et réglementation des effluents laitiers.....	11
-------	--	----

## Chapitre II : Traitement des eaux résiduaires de laitière

II.1	Traitements biologiques.....	13
II.1.1	Traitement par boues activées.....	13
II.1.2	Traitement par biofiltration.....	13
II.1.3	Traitement par procédé anaérobie.....	14
II.2	Traitements physico-chimiques.....	14
II.2.1	Traitement par coagulation chimique.....	14
II.2.2	Traitement par filtration sur sable.....	15
II.2.3	Traitement par filtration membranaire.....	15
II.3	Traitement électrochimiques.....	15
II.4	Le procédé d'électrocoagulation (EC) .....	16
II.4.1	Définition.....	16
II.4.2	Théorie de l'électrocoagulation.....	16
II.4.3	Principe de l'électrocoagulation.....	16
II.4.4	Réactions aux électrodes.....	18
II.4.5	Configuration des électrodes.....	20
II.4.5.1	Électrodes monopolaires.....	20
II.4.5.2	Électrodes bipolaires.....	20
II.4.6	Facteurs influençant le fonctionnement d'une cellule d'EC.....	21
II.4.6.1	Le type d'électrode.....	21
II.4.6.2	L'écart entre les électrodes.....	22
II.4.6.3	La surface active.....	22
II.4.6.4	L'intensité du courant.....	22
II.4.6.5	La conductivité de la solution.....	22
II.4.6.6	pH initial de la solution.....	23
II.4.6.7	La température de la solution.....	24
II.4.6.8	Effet du temps de l'électrocoagulation.....	24
II.4.6.9	Consommation de l'énergie électrique spécifique.....	25
II.4.7	Principales applications de l'électrocoagulation.....	25
II.4.8	Avantages et inconvénients de l'électrocoagulation.....	26
II.4.8.1	Avantages de l'électrocoagulation.....	26
II.4.8.2	Inconvénients de l'électrocoagulation.....	27
II.5	Le procédé d'électroflottation (EF) .....	27
II.5.1	Définition et principe de l'électroflottation.....	27
II.5.2	Paramètres influençant le processus d'électroflottation.....	29
II.5.2.1	Composition de la solution.....	29
II.5.2.2	Densité de courant.....	29
II.5.2.3	Nature des électrodes.....	30
II.5.2.4	La température.....	30
II.5.3	Application de l'électroflottation.....	30
II.5.4	Avantages et contraintes de l'électroflottation.....	31
II.5.4.1	Avantages de l'électroflottation.....	31
II.5.4.2	Contraintes de l'électroflottation.....	31

## Chapitre III : Conception et étude de performance de la cellule électrochimique

III.1	Préparation de la solution modèle « l'effluent synthétique » .....	33
III.2	Matériels et méthodes.....	34

III.2.1	Dispositif expérimentale.....	34
III.2.2	Méthodologie expérimentale.....	38
III.2.3	Analyses.....	41
	III.2.3.1 Mesure du pH et de la conductivité.....	41
	III.2.3.2 Mesure de la turbidité.....	42
	III.2.3.3 Mesure des matières en suspensions (MES) .....	43
III.3	Résultats et discussions.....	44
III.3.1	Évolution des paramètres électrochimiques.....	44
	III.3.1.1 Evolution du pH au cours de l'EC-EF.....	44
	III.3.1.2 Evolution de la conductivité de l'effluent.....	44
III.3.2	Influence des paramètres de fonctionnement sur l'efficacité de traitement.....	45
	III.3.2.1 Influence de la densité de courant et du temps de traitement de l'EC-EF.....	45
	III.3.2.2 Influence du pH initial.....	47
	III.3.2.3 Influence de la conductivité de l'effluent.....	48
	III.3.2.4 Influence de mode de fonctionnement.....	50
III.3.3	Masse dissoute de l'anode.....	51
	<b>Conclusion générale.....</b>	<b>53</b>

## **Bibliographie**

## Liste des figures

<b>Figure I.1:</b>	Fabrication et rejets en laiterie [2].....	8
<b>Figure II.1:</b>	Principe du procédé d'électrocoagulation [27] .....	17
<b>Figure II.2:</b>	Réactions typiques pendant le traitement par électrocoagulation.....	19
<b>Figure II.3:</b>	Configuration des branchements. (a) monopolaires en série, (b) monopolaires en parallèle, (c) bipolaire.....	21
<b>Figure II.4:</b>	Schéma de principe du procédé d'électroflottation [62] .....	28
<b>Figure III.1:</b>	Schéma représentatif de la cellule électrochimique.....	34
<b>Figure III.2:</b>	Position des électrodes pour les différents processus électrochimiques	36
<b>Figure III.3:</b>	Dimensions des électrodes.....	36
<b>Figure III.4:</b>	Alimentation double de laboratoire RXN-3050D-II.....	37
<b>Figure III.5:</b>	Etat des électrodes après une manipulation (avant nettoyage) .....	38
<b>Figure III.6:</b>	Dispositif expérimental de l'électrocoagulation-électroflottation.....	39
<b>Figure III.7:</b>	Etapas de traitement par EC-EF, prélèvements et décantation.....	40
<b>Figure III.8:</b>	Microprocesseur pH Mètre "Hanna pH 210" .....	41
<b>Figure III.9:</b>	Conductimètre "Hanna, EC214" .....	42
<b>Figure III.10:</b>	Turbidimètre WTW "Turb 555IR" .....	42
<b>Figure III.11:</b>	Mesure des matières en suspensions.....	43
<b>Figure III.12:</b>	Evolution du pH au cours de traitement EC-EF, pour différentes valeurs de densité de courant en fonction du temps (pH=7,59, conductivité = 2,72 mS/cm <sup>2</sup> ).....	44
<b>Figure III.13:</b>	Evolution de la conductivité au cours de traitement EC-EF, pour différentes valeurs de densité de courant en fonction du temps (pH=7,59, conductivité = 2,72 mS/cm <sup>2</sup> ) .....	45
<b>Figure III.14:</b>	Evolution de la turbidité au cours de traitement EC-EF, pour différentes valeurs de densité de courant en fonction du temps (pH=7,59, conductivité = 2,72 mS/cm <sup>2</sup> ).....	46
<b>Figure III.15:</b>	Evolution du MES au cours de traitement EC-EF, pour différentes valeurs de densité de courant en fonction du temps (pH=7,59, conductivité = 2,72 mS/cm <sup>2</sup> ) .....	47
<b>Figure III.16:</b>	Influence du pH initial sur l'abattement de la turbidité et les MES après 40 min du traitement (conductivité = 2,72 mS/cm, densité de	

	courant $I = 26,3 \text{ mA/cm}^2$ ).....	48
<b>Figure III.17:</b>	Influence du pH initial sur l'efficacité d'abattement de la turbidité et de MES après 40 min du traitement (conductivité = $2,72 \text{ mS/cm}$ , densité de courant $I = 26,3 \text{ mA/cm}^2$ ).....	48
<b>Figure III.18:</b>	Influence de la conductivité sur l'abattement de la turbidité et les MES après 30 minutes de traitement EC-EF (pH initial = $7,59$ , densité de courant $I = 26,3 \text{ mA/cm}^2$ ) .....	49
<b>Figure III.19:</b>	Influence de la conductivité sur l'efficacité d'abattement de la turbidité et les MES après 30 minutes de traitement EC-EF (pH initial = $7,59$ , densité de courant $I = 26,3 \text{ mA/cm}^2$ ) .....	50
<b>Figure III.20:</b>	Influence de la technique de traitement électrochimique sur l'abattement de la turbidité en fonction du temps (pH initial = $7,59$ , conductivité = $2,72 \text{ mS/cm}$ et densité de courant $I = 26,3 \text{ mA/cm}^2$ )....	51
<b>Figure III.21:</b>	Evolution de la forme de l'anode après l'expérience.....	53

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1:</b>	La composition moyenne du lait de vache [9].....	7
<b>Tableau I.2:</b>	Valeurs moyennes des différents paramètres analysés d'un effluent laitier issu de la laiterie d'Edough à Annaba [11].....	10
<b>Tableau I.3:</b>	Valeurs moyennes des paramètres du lait produit par la laiterie fromagerie de Tizi-Ouzou [12].....	10
<b>Tableau I.4:</b>	Normes algérienne et française des rejets d'effluents industriels.....	12
<b>Tableau III.1:</b>	Caractéristiques l'effluent synthétique.....	33
<b>Tableau III.2:</b>	Les principales dimensions de la cellule électrochimique.....	35
<b>Tableau III.3:</b>	Paramètres utilisés lors de traitement électrochimique.....	38
<b>Tableau III.4:</b>	Masse dissoute de l'anode.....	51

# Nomenclature

- $a_R$  : Largeur de la colonne montante « Riser », (cm)  
 $a_D$  : Largeur de la colonne descendante « downcomer », (cm)  
 $b$  : Profondeur de la colonne, (cm)  
 $d$  : Distance entre les électrodes, (cm)  
 $d'$  : Distance entre l'électrode et le fond de la colonne, (cm)  
 $F$  : constante de Faraday = 96485,3≈96500, (C/mol)  
 $h$  : Niveau de l'effluent, (cm)  
 $H$  : Hauteur de la colonne, (cm)  
 $h'$  : Hauteur des chicanes, (cm)  
 $I$  : Intensité imposée aux bornes des électrodes (A)  
 $m$  : masse théoriquement dissoute (g)  
 $M$  : masse molaire de l'ion considéré (g/mol)  
 $m_B$  : masse de l'espèce formée (g)  
 $M_B$  : masse molaire de l'espèce formée (g/mol)  
 $n$  : Nombre d'électrons mis en jeu dans la réaction considérée  
 $t$  : temps (s)  
 $Turb_i$  : Turbidité de la solution avant traitement, (NTU)  
 $Turb_f$  : Turbidité de la solution après traitement, (NTU)  
 $Tur \%$  : Rendement d'élimination de la turbidité, (%)  
 $U$  : Tension de courant électrique, (Volt)  
 $V$  : Volume de la colonne, (l)  
 $w$  : Distance entre les chicanes et le fond de la colonne, (cm)  
 $\Phi$  : rendement faradique (%)

## Abréviation

- DBO : Demande biologique en oxygène  
DCO : Demande chimique en oxygène  
EC : électrocoagulation  
EF : électroflottation  
MES : Matières en suspension  
MO : Matière oxydable

MST : Matières sèches totales

MVS : Matières volatiles en suspension

NTU : Nephelometric turbidity unit

PH : Potentiel d'hydrogène

# **Introduction générale**

## **Introduction**

L'industrie alimentaire génère chaque année plusieurs milliers de tonnes de matières résiduelles dont l'impact n'est pas minime sur l'environnement. La transformation industrielle des aliments nécessite une énorme quantité d'eau et qui génère des eaux usées très polluées. Parmi les industries agroalimentaires très polluantes les laiteries de part leur volume d'eau rejeté (en moyenne 3 à 6 litres d'eau usée par litre de lait produit) et leur très forte charge polluante estimée à quelques dizaines de grammes de matières organiques fermentescibles, constituent une menace sérieuse pour l'environnement. La composition des eaux résiduaires laitières dépend des produits laitiers transformés et de leurs dérivés et, par conséquent, des processus de production mis en œuvre. Les eaux usées laitières contiennent généralement des concentrations élevées de lactose, de protéines, de lipides, de sels et de minéraux, ce qui entraîne des niveaux élevés de demande biochimique en oxygène, de demande chimique en oxygène (DCO), de solides totaux en suspension et de solides totaux dissous.

En raison de l'importance des matières polluantes, le traitement des eaux usées laitières est devenu une nécessité absolue avant leur déversement dans les cours d'eau. Les méthodes conventionnelles généralement utilisées pour le traitement des eaux polluées industrielles, sont principalement les traitements biologiques et physicochimiques ainsi que leurs diverses combinaisons. Les procédés biologiques (système aérobie et anaérobie) sont certes efficaces et économiques pour le traitement de certains effluents, mais ils requièrent souvent des temps de rétention élevés et l'installation de bassins de grandes dimensions, ce qui limite parfois l'implantation de ces technologies à l'échelle réelle. Par comparaison, les procédés physicochimiques requièrent des temps de rétention relativement courts (0.5 à 2h). La coagulation-floculation est un procédé physicochimique qui a été largement utilisé pour la clarification des eaux et l'élimination des composés organiques et inorganiques. Ce procédé utilise des concentrations importantes de réactifs augmentant ainsi le volume des boues générées et, par conséquent, le coût du traitement.

Le processus d'électrocoagulation /électroflottation peut être un autre processus alternatif pour traiter les effluents de déchets laitiers. Cette technologie a été utilisée avec succès pour éliminer les huiles/grasses et les matières en suspension (MES) d'une variété d'effluents industriels (par exemple, les déchets des raffineries de pétrole). Il s'agit d'un processus combiné de coagulation et de flottation induit par le passage d'un courant électrique. L'électrocoagulation avec des électrodes en aluminium et en fer a été brevetée aux États-Unis

en 1909. L'électrocoagulation de l'eau potable a été appliquée pour la première fois à grande échelle aux États-Unis en 1946. Ces dernières années, l'électrocoagulation a été testée avec succès pour traiter diverses eaux usées industrielles, telles que la décoloration des solutions de teinture et des eaux usées textiles, le traitement des eaux usées de galvanoplastie et de polissage, l'élimination des ions arsenic et fluor des eaux usées industrielles, la dégradation électrochimique des substances organiques, le traitement du chrome (VI) des eaux usées, l'élimination des particules colloïdales, l'élimination des composés phénoliques, la clarification de l'eau potable, l'élimination du phosphate, l'élimination du bore et le traitement des eaux usées pétrochimiques.

L'objectif de notre travail consiste à évaluer les performances épuratoires des procédés d'électrochimiques pour le traitement d'un effluent laitier. Pour ce faire, une nouvelle conception a été proposée en combinant l'électrocoagulation et le processus d'électroflottation pour améliorer la flottation des particules en produisant des bulles de gaz d'hydrogène et d'oxygène. Le processus combiné permet aux particules de flotter à la surface du réacteur électrochimique et d'être immédiatement séparées de la surface du liquide. Par conséquent, les unités finales de flottation et de sédimentation ne sont pas nécessaires.

Quelques paramètres influençant sur l'efficacité de ce procédé ont été étudiés, à savoir : la densité du courant, le temps du traitement ainsi que le pH et de la conductivité initiale de l'effluent.

Pour présenter le travail réalisé, nous proposons les chapitres suivants :

- Le premier chapitre de l'étude présente les sources de pollution, les principaux paramètres utilisés pour caractériser la pollution et un aperçu général sur les eaux résiduaires de laiterie.
- Le deuxième chapitre de ce mémoire met particulièrement l'accent sur les procédés de traitement, notamment le procédé de traitement par électrocoagulation et électroflottation.
- Le troisième chapitre comprend deux parties. La première partie est consacrée à la description du matériel, la méthodologie expérimentale suivie ainsi que les analyses effectuées, et la deuxième, à la discussion des résultats obtenus.

En fin on termine notre travail par une conclusion générale, résumant résultats expérimentaux obtenus.

# **Chapitre I : Généralités sur les eaux résiduaires de laiterie**

Terre, Planète Bleue », « L'eau est source de vie ». Deux expressions courantes nous rappellent l'importance de l'eau dans notre quotidien. Aujourd'hui, la question de l'eau et de sa pollution est devenue au centre des préoccupations des pays du monde entier, et la pollution de l'eau est principalement due aux activités humaines et aux phénomènes naturels. La pollution de l'eau, qui touche les rivières, les mers, les nappes phréatiques et les lacs, est le résultat d'un rejet d'eaux usées sans traitement ou avec un niveau de traitement insuffisant : cela conduit à la dégradation de l'écosystème. Le problème devient plus grave dans le cas des effluents industriels, qui présentent un caractère toxique plus prononcé. La lutte contre la pollution de l'eau est l'un des principaux domaines d'activité scientifique. Il peut donc être utile d'évoquer, quoique brièvement, les différents types et sources de pollution de l'eau que l'on rencontre plus ou moins fréquemment.

### **I.1 Définition de pollution de l'eau**

La pollution de l'eau est tout changement physique, chimique ou biologique de la qualité de l'eau, causé directement ou indirectement par l'homme et ses activités, qui affectent négativement les organismes vivants et l'équilibre de l'environnement naturel [1].

### **I.2 Principaux paramètres utilisés pour caractériser la pollution**

Il y a différentes façons de classer la pollution. La pollution peut être divisée en trois catégories selon le type de polluant : pollution physique, pollution chimique et pollution biologique [2].

#### **I.2.1 Paramètres physiques**

##### **I.2.1.1 Turbidité**

La turbidité correspond à l'effet optique qui reflète la qualité trouble de l'eau, qui fluctue en fonction des composés colloïdaux ou des acides humiques. On mesure la turbidité en utilisant la méthode optique : L'absorption ou la diffusion des rayons lumineux par les particules suspendues. L'évaluation de la turbidité est réalisée en utilisant un turbidimètre, et l'unité principale est le NTU (unité de turbidité néphélométrique).

##### **I.2.1.2 Matières en suspension (MES)**

Les particules très fines en suspension (sable, argile, produits organiques, micro-organismes...) sont appelées matières en suspension, exprimées en gramme de matière sèche par litre d'effluent après filtration.

### **I.2.1.3 Matières volatiles en suspension (MVS)**

Les MVS sont les résidus de la calcination des MES à 600°C pendant 2h. La différence entre ces deux valeurs donne la quantité de matière organique en suspension.

### **I.2.1.4 Matières sèches totales (MST)**

C'est la quantité de matière obtenue après évaporation d'un volume d'effluent donné à 100°C. La calcination de ce résidu à 600 °C pendant 2 heures donne les matières minérales totales et permet ainsi de déterminer par différence les matières organiques totales de l'effluent.

### **I.2.1.5 Température**

La température influence tous les phénomènes physico-chimiques et biologiques présents dans la nature. Elle contribue également à la performance de certains traitements tels que la décantation, la coagulation-floculation et la désinfection.

### **I.2.1.6 Conductivité**

La conductivité est un indicateur de la capacité de l'eau à transmettre le courant entre deux électrodes. La majorité des substances dissoutes dans l'eau sont des ions électriquement chargés. La conductivité est donc utilisée pour évaluer la quantité de sels dissous dans l'eau. On la mesure en utilisant un conductimètre, et l'unité utilisée est le milli-siemens/cm (mS/cm) ou le micro-siemens/cm ( $\mu$ S/cm).

## **I.2.2 Paramètres chimique**

### **I.2.2.1 Potentiel d'hydrogène (pH)**

Ce paramètre donne le degré d'acidité ou d'alcalinité d'une eau. C'est la concentration en ion  $H^+$  qui est importante car les microorganismes utilisés ne fonctionnent que pour un certain intervalle de pH.

### **I.2.2.2 Demande biologique en oxygène (DBO)**

C'est la quantité d'oxygène consommée dans l'obscurité à 20°C pendant un temps donné par des microorganismes pour oxyder la matière organique. La plupart des temps, l'incubation dure 5 jours et on écrit  $DBO_5$ . Elle est exprimée en gramme d'oxygène par litre d'effluent.

### **I.2.2.3 Demande chimique en oxygène (DCO)**

C'est la quantité d'oxydant chimique nécessaire pour oxyder la matière organique et est exprimée de la même manière que la DBO.

### **I.2.2.4 L'azote (N)**

Il est présent sous forme organique, ammoniacale ou oxydée sous forme de nitrite  $NO_2^-$  et nitrate  $NO_3^-$  exprimé en milligramme d'azote élémentaire par litre d'effluent.

### **I.2.2.5 Le phosphore (P)**

Il est sous forme de phosphate organique ou minéral, il est donné en milligramme de phosphore élémentaire par litre d'effluent.

### **I.2.2.6 Les métaux lourds**

Ces métaux sont ceux dont le poids atomique dépasse celui du fer (55,845 g/mole), les métaux lourds peuvent présenter des risques importants tels que la toxicité, la non-biodégradabilité dans les chaînes alimentaires.

### **I.2.2.7 Matière oxydable (MO)**

La matière oxydable est définie par :

$$MO = 2 * DBO + DCO / 3 \quad (\text{Equation I.1})$$

Ces trois grandeurs (DBO, DCO et MO) sont exprimées en grammes d'oxygène par litre d'effluent.

## **I.2.3 Paramètres organoleptiques**

### **I.2.3.1 La coloration**

La couleur des eaux usées domestiques est principalement grisâtre, La couleur de l'eau peut provenir de substances minérales comme le fer ou le manganèse et/ou de substances organiques colloïdales. Le noir indique une décomposition partielle, d'autres couleurs indiquent l'afflux d'effluents industriels [3].

### **I.2.3.2 Odeur – Saveur**

L'eau d'égout fraîche a une odeur fade qui n'est pas désagréable, par contre en état de fermentation, elle dégage une odeur nauséabonde [3].

## **I.2.4 Paramètres biologiques**

La pollution est associée au développement de micro-organismes (virus) ou de plantes micro ou macroscopiques (champignons) qui entraînent un déséquilibre environnemental.

## **I.3 Les sources de pollution**

### **I.3.1 Pluviales**

L'origine naturelle implique un phénomène tel que la pluie, lorsque par exemple l'eau de ruissellement passe à travers des terrains riches en métaux lourds ou encore lorsque les précipitations entraînent les polluants de l'atmosphère vers le sol [4].

### **I.3.2 Agricoles**

Il s'agit d'eau polluée par des substances utilisées en agriculture. Dans le contexte d'une agriculture performante et intensive, l'agriculteur est conduit à utiliser divers produits d'origine industrielle ou agricole (engrais, pesticides) dont certains présentent ou peuvent

présenter, des risques pour l'environnement et plus particulièrement pour la qualité des eaux. Il s'agit principalement [5].

### **I.3.3 Domestique**

Les eaux usées domestiques comprennent les eaux ménagères (lavage, toilette, cuisine) et les eaux vannes (urines et matières fécales), dans le système dit « tout-à-l'égout. Les eaux usées domestiques contiennent des matières organiques et des matières minérales. Les matières Organiques constituées de composés ternaires, tels que les sucres et les graisses (formés de Carbone, oxygène et hydrogène, mais aussi d'azote et, dans certains cas, d'autres corps tels Que soufre, phosphore, fer, etc.) et les matières minérales (chlorures, phosphates, sulfates, etc.) [6].

### **I.3.4 Industrielle**

Elles sont très différentes des eaux usées domestiques. Leurs caractéristiques varient d'une industrie à l'autre. En plus de matières organiques, azotées ou phosphorées, elles peuvent également contenir des produits toxiques, des solvants, des métaux lourds, des micropolluants organiques, des hydrocarbures. Selon leur origine industrielle elles peuvent également contenir :

- des graisses (industries agroalimentaires, équarrissage) ;
- des hydrocarbures (raffineries) ;
- des métaux (traitements de surface, métallurgie) ;
- des acides, des bases et divers produits chimiques (industries chimiques divers, tanneries);
- de l'eau chaude (circuit de refroidissement des centrales thermiques)

Avant d'être rejetées dans les réseaux de collecte, les eaux usées industrielles doivent faire l'objet d'un traitement Elles sont mêlées aux eaux domestiques que lorsqu'elles ne présentent plus de danger pour les réseaux de collecte et ne perturbent pas le fonctionnement des usines de dépollution [7].

## **I.4 L'industriel laiterie**

### **I.4.1 Définition lait**

Selon le codex (norme 206-1999), le lait est la sécrétion mammaire normale d'animaux de traite obtenue à partir d'une ou plusieurs traites, sans rien y ajouter ou en soustraire, destiné à la consommation comme lait liquide ou à un traitement ultérieur [8].

Selon le Congrès international de la répression des fraudes en 1909, le lait est le produit intégral de la traite totale et ininterrompue d'une femelle laitière bien portante, bien nourrie et non surmenée [8].

Il doit être recueilli proprement et ne pas contenir de colostrum. Le décret du 25 mars 1924 indique la définition « lait » que sans indication de l'espèce animale de provenance, est réservée au lait de vache. Tout lait provenant d'une femelle laitière autre que la vache devra être clairement caractérisé [8].

#### I.4.2 Composition de lait

Le lait est un milieu aqueux caractérisé par différentes phases en équilibre instable :

- **La phase aqueuse:** phase dispersante continue contenant des molécules (exemple : lactose) ou des ions (exemple : calcium) à l'état dissout. Cette phase est stable [8].

- **Une suspension colloïdale de caséines:** associées à des minéraux (( $\text{PO}_4$ ) $_2\text{Ca}_3$ ), ce sont les micelles phosphocalciques ou micelles de caséines. Ces agrégats macromoléculaires de forme et de masses variées sont chargés négativement dans le lait frais. Il en résulte une répulsion électrostatique des micelles, ce qui assure la stabilité en évitant l'agglomération. Il faut noter que les micelles de caséines peuvent être déstabilisées sous l'action de facteurs extérieurs qui neutralisent les charges négatives ou désagrègent leur intégrité. Il en résulte alors l'agglutination des micelles de caséines puis la séparation du liquide aqueux dispersant. C'est la coagulation du lait stable [8].

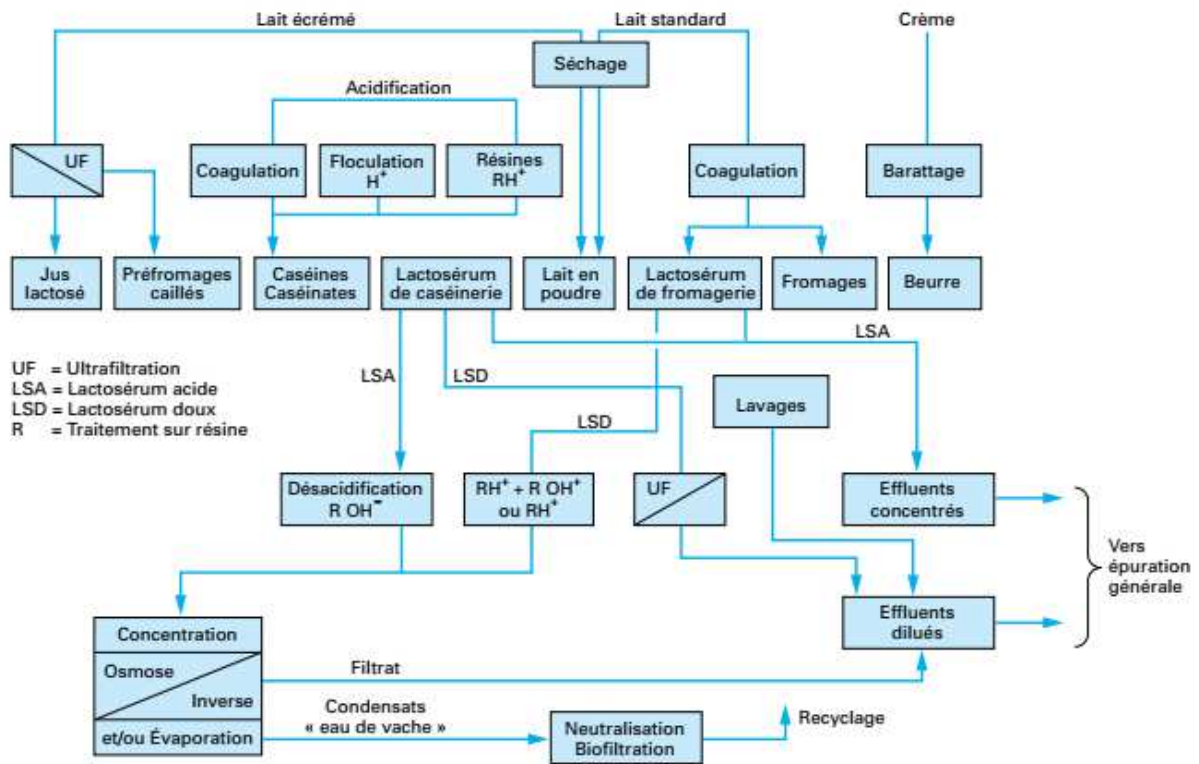
La composition moyenne des principaux constituants du lait de vache est indiquée dans le tableau I.1 [9].

**Tableau I.1 :** La composition moyenne du lait de vache [9].

	Les teneurs du lait en ses différents constituants (g.l <sup>-1</sup> )
Constituants minéraux	
Eau	902
Sels minéraux	6.2
Gaz dissous	0.1
Constituants organiques	
Sels organiques	1.7
Lactose	49
Matière grasse	38
Protéines ou constituants azotés	32
Protéiques	26
- Caséine	6
- Protéines solubles	1.5

**I.4.3 Origine des rejets Laitiers**

La nature des effluents issus des laiteries dépend en grande partie des procédés de fabrication. La figure I.1 présente une schématisation de la genèse des effluents. La composition de ces eaux usées dépend bien sûr de la nature du produit formé et donc des procédés mis en œuvre dans la laiterie. Les produits retrouvés dans les effluents sont ceux qui proviennent de la matière première (lactose, protéines, lipides, sels minéraux...) et ceux qui sont ajoutés ou utilisés à des fins de lavage et d'hygiénisation (bactéricides, antiseptiques, soude, acides phosphorique et nitrique...). Il est important de noter que sa composition dépendra aussi du comportement des hommes et notamment de la rigueur avec laquelle les sous-produits seront récupérés [2].



**Figure I.1 :** Fabrication et rejets en laiterie [2].

**1.4.3.1 Eaux de refroidissement et condensats**

Ces eaux sont généralement très peu polluées, ce qui permet souvent leur recyclage. Elles peuvent recevoir des produits destinés à éviter la présence de micro-organismes.

**1.4.3.2 Eaux résiduelles de lavage**

Dans les laiteries, le nettoyage est un facteur essentiel qui agit sur la qualité du produit fini. Des programmes automatisés sont mis en place et sont chargés de gérer les différentes séquences de lavage appliquées aux différents secteurs à traiter. Ces programmes comportent généralement des rinçages poussés, des lavages alcalins avec des solutions de soude ou acides

avec des solutions d'acides phosphorique et nitrique. Certains établissements n'utilisent qu'une seule fois leur solution et d'autres les stockent pour un usage multiple avant rejet. Bien sûr, un rejet instantané de ces effluents peut créer des problèmes au niveau d'une station biologique de traitement. C'est pourquoi il est nécessaire de le prendre en compte. De plus, une mauvaise récupération du lactosérum peut conduire à des dimensionnements de station d'épuration bien supérieurs au strict nécessaire.

#### **1.4.3.3 Eaux issues du produit**

Certains procédés, comme la fabrication de lait ou de lactosérum en poudre, génèrent des eaux qui se retrouvent dans les effluents. Elles sont généralement peu chargées.

#### **I.4.4 Caractéristiques des effluents laitiers**

Dans la composition du lait on trouve, outre l'eau, des graisses, des protéines (tant en solution qu'en suspension), des sucres et des sels minéraux. Les produits laitiers, outre les éléments qui composent le lait, peuvent contenir du sucre, du sel, des colorants, des stabilisateurs, etc., suivant la nature et le type de produit ainsi que le type de technologie de production employé. Tous ces composants se retrouvent dans les eaux résiduaires en quantité plus ou moins grande, ceci est dû à la dissolution ou à l'entraînement de ces éléments par les eaux de nettoyage.

En général, les effluents liquides d'une industrie laitière présentent les caractéristiques suivantes [10].

- Haute teneur en matière organique, en raison de la présence de composants du lait. La DCO moyenne des eaux résiduaires d'une industrie laitière se situe entre 1 000 et 6 000 mg DBO/l.
- Huiles et graisses, à cause de la graisse du lait et d'autres produits laitiers, comme c'est le cas des eaux de lavage du babeurre.
- Niveaux élevés d'azote et de phosphore, issus principalement des produits de nettoyage et de désinfection.
- Variations importantes du pH, rejets de solutions acides et basiques. Issus surtout des opérations de nettoyage et pouvant osciller entre des valeurs allant d'un pH 2 à 11.
- Conductivité élevée (tout particulièrement dans les entreprises productrices de fromage à cause du rejet de chlorure sodique issu du salage).
- Variations de température (en prenant en considération les eaux de refroidissement).

Les pertes de lait, qui peuvent atteindre de 0,5 à 2,5 % de la quantité de lait reçu ou dans les cas les plus défavorables jusqu'à 3-4 %, constituent un apport considérable à la charge

polluante de l'effluent final. Un litre de lait entier équivaut à une DBO<sub>5</sub> de 110 000 mg O<sub>2</sub>/l et à une DCO de 210 000 mg O<sub>2</sub>/l [10].

La composition des effluents laitiers est très variable à cause de la diversité des produits laitiers produits (lait, yaourt, fromage, beurre et crème....). Les produits retrouvés dans les effluents proviennent de la matière première (lactose, protéines, lipides, sels minéraux...) et des produits de lavage ou d'hygiénisation (bactéricides, antiseptiques, soude, acides phosphorique et nitrique...). À titre d'exemple, les tableaux I.2 et I.3 donnent la variabilité de la composition des effluents laitiers issus des unités Algériennes.

**Tableau I.2.** Valeurs moyennes des différents paramètres analysés d'un effluent laitier issu de la laiterie d'Edough à Annaba [11].

Paramètres	Unités	Plage
pH		2.3-12.8
Conductivité	μS/cm	1138-1619
Turbidité	NTU	948-1874
MES	mg/l	260-637
DCO	mg/l	1720 - 2780
DBO <sub>5</sub>	mg/l	824 - 1340
N-NTK	mg/l	92 - 227
P-PT	mg/l	17 - 47
CF	UFC/mL	112 x10 <sup>4</sup> – 187x10 <sup>4</sup>
SF	UFC/mL	126 x10 <sup>3</sup> – 120 x10 <sup>4</sup>

**Tableau I.3 :** Valeurs moyennes des paramètres du lait produit par la laiterie fromagerie de Tizi-Ouzou [12].

Paramètres	Unités	Valeurs moyennes	Paramètres	Unités	Valeurs moyennes
pH	(-)	7.4	NH <sup>+</sup> <sub>4</sub>	(mg/l)	62.71
DBO <sub>5</sub>	(g/l)	76.00	NO <sub>3</sub>		408.85
DCO	(g/l)	133.00	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>		435.71

Selon les caractéristiques de la différente origine d'effluents, on constate que la charge polluante est très élevée par rapport à d'autres industries. La composition de ces effluents s'apparente à celle du lait plus ou moins dilué. Le rapport DCO/DBO<sub>5</sub> est proche de 2, ce qui montre que la matière organique est moyennement biodégradable. Les valeurs de DCO, DBO<sub>5</sub> montrent que l'effluent présente une très forte charge organique.

Si l'on considère que la DBO<sub>5</sub> moyenne des effluents domestiques est de 300 mg/L, il apparaît que les effluents laitiers sont environ 5 fois plus concentrés. Si l'on se réfère aux valeurs de DCO et de DBO<sub>5</sub> du lait entier produit par la laiterie fromagerie de Tizi-Ouzou évaluées respectivement à 133 g/l et 76 g/l, on peut également considérer que l'eau usée de la laiterie représente du lait dilué 45 fois environ.

#### **I.4.5 Normes et réglementation des effluents laitiers**

La multiplicité de situations de rejets rencontrés dans la filière lait amène à considérer deux principaux cas :

1) La production d'eaux résiduaires industrielles, qui dans la plupart des cas rejoignent les réseaux habituels de traitement des eaux usées urbaines en station d'épuration.

2) Les rejets d'eaux blanches en milieu rural, cas dans lequel compte tenu de la dispersion géographique des fermes d'élevages, le regroupement des effluents sur une STEP n'est pas envisageable et des solutions spécifiques doivent être proposés en réponse à des critères locaux de respect du milieu récepteur.

Les normes applicables aux rejets des eaux usées industrielles sont de plus en plus strictes. La réglementation algérienne sur la pollution des eaux qui fixe les conditions du rejet et leur traitement est régie par le décret N°26 du 23 avril 2006 et l'arrêté N°08 qui correspond aux limites des rejets pour les secteurs industriels (Décret N°26 du 23 avril 2006,)

Le Tableau I.4 présente les normes algérienne et française indiquant ainsi que les rejets ne doivent pas contenir de substances de nature à favoriser la manifestation d'odeurs, que leur pH doit être compris entre 5,5 et 8,5 et leur température inférieure à 30°C.

**Tableau I.4 :** Normes algérienne et française des rejets d'effluents industriels.

<b>Paramètres</b>	<b>Unités</b>	<b>Normes Algériennes limite des rejets</b>	<b>Normes françaises limite des rejets</b>
Couleur	/	/	/
pH	/	6.5 - 8.5	6 - 9
Conductivité électrique	(ms/cm)	/	/
DBO <sub>5</sub>	(mgO <sub>2</sub> /l)	35	<25
DCO	(mgO <sub>2</sub> /l)	120	<125
Turbidité	NTU		
MES	mg/l	35	<50
Huile et graisse	/	20	<10
Azote total	/	30	<10
Phosphore total	/	10	0.4-5

# **Chapitre II : Traitement des eaux résiduelles de laitière**

Les eaux usées de l'industrie laitière sont traitées de différentes manières afin de gérer les eaux usées produites lors de la production et de la transformation du lait. Ces déchets renferment de grandes quantités de matière organique, d'azote et de phosphore. Le but du traitement des eaux résiduaires est de produire une eau purifiée qui respecte les normes de rejet établies par la législation et qui puisse être évacuée sans danger dans le milieu naturel, notamment dans les zones industrielles. Par exemple, pour éliminer la pollution provenant de la production laitière qui fait l'objet de notre étude, nous utilisons principalement des méthodes biologiques (en aérobie et anaérobie) et/ou physico-chimiques et l'électrocoagulation, l'adsorption, etc.

## **II.1 Traitements biologiques**

Les procédés de traitement biologique sont habituellement retenus pour le traitement secondaire des eaux usées. Le traitement biologique est capable de traiter un volume très important des eaux usées industrielles [13]. Il a été recommandé selon El-Bestawy et al. [14] que le procédé de traitement biologique est une technologie très efficace pour l'élimination du phosphore, de l'azote et de la matière organique. Les traitements biologiques sont classés en deux grande catégories distinctes, soit les procédés en boues (boues activées, lagunage, etc.) et les procédés sur pellicules fixes (biofiltres, lit bactérien, etc.).

### **II.1.1 Traitement par boues activées**

Le principe de traitement par boues activées consiste à mélanger dans le même réacteur la biomasse avec l'eau usée. Le brassage permet non seulement le contact entre la biomasse et les polluants, mais il permet aussi d'incorporer de l'oxygène, nécessaire à la croissance bactérienne, dans le système. Le traitement par boues activées dépend principalement de la charge à traiter et de l'âge des boues. Le processus de traitement par boues activées comporte de nombreux inconvénients, tels que la faible efficacité de séparation des solides de l'eau, le faible mélange des MES et un taux de biodégradation faible [15].

### **II.1.2 Traitement par biofiltration**

Dans un processus de traitement par biomasse fixée, les microorganismes sont immobilisés sur des supports solides et l'eau percole à travers ces biofiltres afin d'être traitée. Selon Metcalf et Eddy Inc. [16], les traitements par biomasse fixée ont la capacité de surmonter les lacunes de traitements à biomasse libre. La présence d'insectes, les odeurs, le besoin en espace et l'encrassement d'un tel filtre sont considérés comme les principaux inconvénients d'une telle technique.

Les traitements par biofiltration et par boues activées sont classés dans la catégorie des procédés de traitement aérobies. Ces procédés (en présence d'oxygène) favorisent le développement des microorganismes qui décomposent les substances biodégradables.

### **II.1.3 Traitement par procédé anaérobie**

Les procédés anaérobies (sans oxygène) permettent le développement des microorganismes qui stabilisent les substances biodégradables en les transformant en biogaz (méthane, gaz carbonique). D'après Ruiz et al. [17], la technologie de traitement anaérobie a été appliquée pour traiter les effluents de faible concentration, telle que les eaux usées municipales. Par comparaison au traitement aérobies, le traitement anaérobie permet de générer moins de boue, la demande en énergie est beaucoup plus faible et les coûts d'opération sont habituellement inférieurs puis que le traitement anaérobie ne requiert pas d'apport d'oxygène [18]. La forte sensibilité du procédé anaérobie au pH et aux substances toxiques, ainsi que la faible activité bactérienne à basse température représentent les principaux inconvénients du procédé anaérobie.

## **II.2 Traitements physico-chimiques**

Les traitements physico-chimiques des eaux usées sont généralement des procédés de traitement qui permettent d'éliminer la plupart des particules en suspension et des matières colloïdales par une adsorption sur des particules grossières. Dans les lignes qui suivent, nous présenterons un bref résumé des différentes techniques de traitement physiques et chimiques mises en place pour le traitement des eaux usées.

### **II.2.1 Traitement par coagulation chimique**

Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (2004), le processus de coagulation chimique se base sur l'ajout d'un réactif chimique (le coagulant) dont la plupart du temps est un sel métallique ( $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{FeSO}_4$ , alun, etc.). L'efficacité du processus de coagulation chimique dépend principalement de la nature et de la dose de l'agent coagulant, du pH, de la force ionique et de la concentration des composés présents dans les eaux usées [19]. La coagulation chimique est un procédé de traitement qui peut être utilisée seule ou en combinaison avec la floculation qui assure un attachement entre les particules plus fines. Le processus de floculation est généralement assuré par l'ajout des chaînes polymériques. Dans le traitement des eaux, ces deux techniques sont souvent utilisées conjointement afin de former des floes plus stables et plus denses, facile à récupérer par décantation ou filtration. À l'échelle industrielle, les recherches s'orientent de plus en plus à remplacer la coagulation chimique par un processus d'électrocoagulation. La nécessité d'ajouter des produits chimiques augmente le coût du

traitement et représente le majeur inconvénient de la coagulation chimique. Selon Wang et al. [19], la quantité de boues produite par coagulation chimique sera beaucoup plus importante par comparaison avec un procédé traitement par électrocoagulation.

### **II.2.2 Traitement par filtration sur sable**

La filtration est un procédé physique de traitement surtout utilisée dans les eaux usées industrielles. La filtration est considérée comme la dernière étape de clarification. En effet, l'eau usée qui a subi une étape de coagulation, floculation et décantation passe à travers un médium poreux. Le sable et l'antracite, utilisés séparément ou dans des filtres multicouches, sont considérés comme les principaux types de supports utilisés dans le domaine de filtration des eaux. Les principales caractéristiques de ces types de milieux filtrants sont les suivantes: le diamètre effectif, le coefficient d'uniformité, la densité relative et la porosité [20]. La grande superficie nécessaire à l'installation, le manque d'efficacité et de souplesse représente les principaux inconvénients liés à ce type de traitement.

### **II.2.3 Traitement par filtration membranaire**

Lors des trois dernières décennies, les procédés de filtration membranaire ont su démontrer leur efficacité dans le domaine du traitement des eaux usées industrielles [21]. Blstáková et al. [22] ont utilisé les techniques de filtration membranaire afin d'éliminer les différents polluants (bactéries, phosphore, azote, MES, DBO<sub>5</sub>, etc.) présents dans les eaux usées. Les techniques de séparation membranaire assurent un traitement poussé des effluents, sans recours à une utilisation excessive de produit chimique, d'une part, et offre la possibilité de diminuer le rejet, d'autre part [21]. Le risque de colmatage très important reste le facteur essentiel qui limite l'utilisation des procédés de filtration membranaire.

## **II.3 Traitement électrochimiques**

Les traitements électrochimiques sont de plus en plus développés dans le domaine des technologies environnementales. Ils sont reconnus pour leur efficacité de traitement et d'assainissement des eaux [23]. Les techniques électrolytiques se caractérisent par un aspect non polluant et une facilité d'automatisation et constituent l'une des méthodes visant à réduire l'emploi de réactifs. En fait, les techniques électrochimiques sont de plus en plus sollicitées parce que les techniques biologiques sont parfois limitées pour traiter différents composés plus réfractaires ou bio-résistants [24]. Parmi les méthodes électrochimiques, on peut citer l'électrodialyse, l'électrofiltration, l'électrocoagulation, l'électroflottation, l'électrosorption et l'électro-oxydation. La partie qui suit présente les techniques de traitement par électrocoagulation et électroflottation.

## II.4 Le procédé d'électrocoagulation (EC)

### II.4.1 Définition

C'est un procédé électrochimique d'oxydation indirect dans lequel un réactif redox dissous existe ou est généré à partir de l'électrolyte ou à partir de la phase de l'électrode dans le but de participer à la réaction de coagulation [25]. Les électrodes sont généralement en alliages d'aluminium ou de fer et peuvent être arrangées en mode monopolaire ou bipolaire [26].

### II.4.2 Théorie de l'électrocoagulation

L'EC est un procédé complexe impliquant plusieurs phénomènes physiques et chimiques qui utilisent des électrodes consommables (sacrificielles) pour fournir des ions dans l'effluent des eaux usées.

Trois étapes successives principales sont impliquées durant l'EC :

- 1) Formation des coagulants par oxydation électrolytique de l'électrode sacrificielle.
- 2) Déstabilisation des contaminants, suspension particulaire et rupture des émulsions.
- 3) Agrégation des phases déstabilisées pour former les floes.

Le mécanisme de déstabilisation des contaminants, de la suspension particulaire et la rupture des émulsions peut être résumé comme suit [25] :

- a) Compression de la couche diffuse autour des espèces chargées par les interactions avec les ions générés par l'oxydation de l'anode sacrificielle.
- b) Neutralisation de la charge des espèces ioniques présentes dans le rejet aqueux à l'encontre des ions produits par dissolution électrochimique de l'anode sacrificielle. Ces ions réduisent la répulsion électrostatique entre les particules jusqu'à ce que les forces d'attraction de Van der Waals prédominent, causant ainsi la coagulation.
- c) Formation du floe : le floe formé suite à la coagulation crée les boues qui piègent et relient les particules colloïdales restant dans le milieu aqueux.

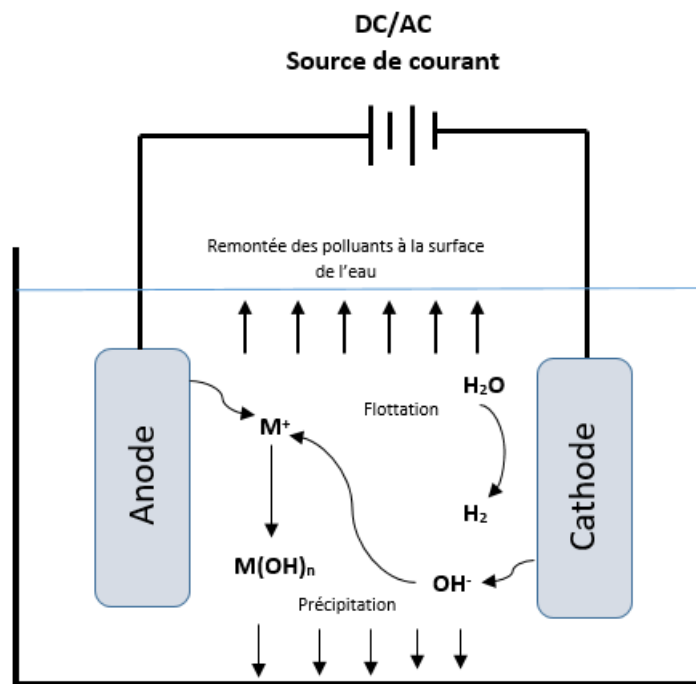
Les floes d'hydroxydes métalliques-colloïdes obtenus sont ensuite séparés du liquide purifié par électroflottation ou sédimentation. L'électroflottation est la conséquence de l'ascension des bulles de gaz qui entraînent les floes par flottation. En effet, l'électrolyse de l'eau génère des microbulles d'hydrogène à la cathode et dans une moindre part d'oxygène à l'anode. Leur densité et leur géométrie est un facteur important. De manière générale, plus le rapport surface/volume des floes est grand, plus ils pourront fixer les microbulles [26].

### II.4.3 Principe de l'électrocoagulation

Le procédé d'électrocoagulation est basé sur le principe des anodes solubles. Il s'agit, d'imposer un courant (ou potentiel) entre deux électrodes (fer ou aluminium) immergées dans un électrolyte contenu dans un réacteur pour générer, in situ, des ions ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ),

susceptibles de produire un coagulant en solution et de provoquer une coagulation-floculation des polluants que l'on souhaite éliminer. L'électrolyse peut également coaguler les composés solubles oxydables ou réductibles contenus dans l'effluent. Le champ électrique crée un mouvement d'ions et de particules chargées. Cette action permet de rassembler les matières en suspension sous forme de floccs qu'on élimine ensuite par un procédé physique classique (décantation, flottation, filtration) [25].

La figure II.1 présente le principe du procédé d'EC en utilisant des électrodes en fer à titre d'exemple.



**Figure II.1 :** Principe du procédé d'électrocoagulation [27].

La coagulation est l'opération de déstabilisation des particules colloïdales en suspension par neutralisation de la charge surfacique négative responsable de la force de répulsion entre ces particules à l'aide des cations générés par le matériau de l'anode et produits de leur hydrolyse.

Les particules déstabilisées s'adsorbent sur les précipités tels que  $M(OH)_3$  et s'agglomèrent pour former des floccs ; c'est la floculation.

Les anodes et les cathodes utilisées peuvent avoir différentes configurations. Elles peuvent se présenter sous forme de plaques, de boules, de sphères à lit fluidisé, de fil, de tige ou de tube. Ces électrodes peuvent être constituées de divers métaux qui sont choisis de manière à optimiser le procédé d'électrocoagulation. Les deux métaux communément utilisés sont le fer et l'aluminium [28].

Une des principales lois explicitant les réactions d'électrocoagulation est la seconde loi de Faraday. Elle montre que la quantité d'ions métalliques dissous par oxydation anodique est proportionnelle à l'intensité imposée et à la durée d'électrolyse mais inversement proportionnelle à la valence de l'ion formé expriment la seconde loi de Faraday relative à une électrode comme [29]:

$$m = \frac{ItM}{nF} \quad (\text{Equation II.1})$$

$m$ : masse théoriquement dissoute (g) ;

$M$ : masse molaire de l'ion considéré (g/mol) ;

$n$ : Nombre d'électrons mis en jeu dans la réaction considérée ;

$I$ : Intensité imposée aux bornes des électrodes (A) ;

$t$ : temps (s) ;

$F$ : constante de Faraday = 96485,3≈96500 C/mol.

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

$$\Phi = \frac{nFm_b}{QM_b} \quad (\text{Equation II.2})$$

$\Phi$ : rendement faradique (%) ;

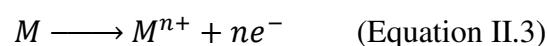
$m_B$ : masse de l'espèce formée (g) ;

$M_B$ : masse molaire de l'espèce formée (g/mol).

#### II.4.4 Réactions aux électrodes

Un réacteur simple d'électrocoagulation est composé d'une anode et une cathode comme il est représenté dans la Figure II.2. Quand une tension est appliquée à partir d'une source d'alimentation externe, le matériau de l'anode subit l'oxydation, tandis que la cathode est soumise à la réduction [30].

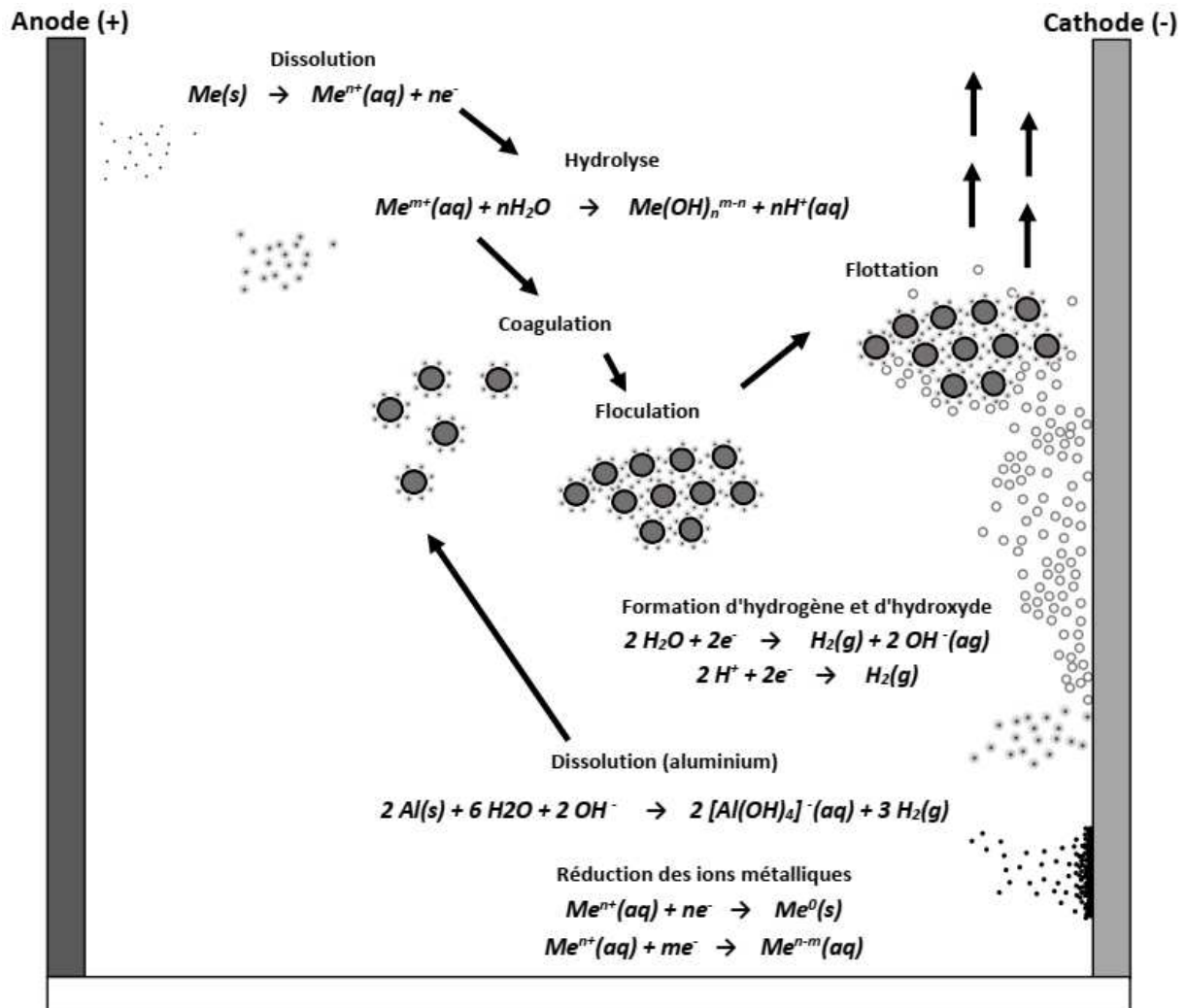
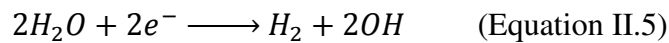
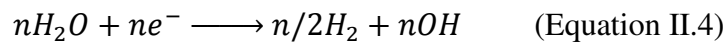
- ❖ A l'anode : On a l'oxydation et le métal va passer de l'état solide à l'état ionique selon la réaction :



$M$ : Matériel de l'anode.

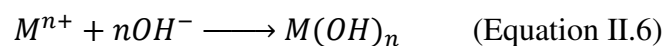
$n$ : Nombre d'électrons mis en jeu (Oxydation / Réduction).

❖ A la cathode : l'eau est réduite suivant la réaction :



**Figure II.2 :** Réactions typiques pendant le traitement par électrocoagulation.

Les ions métalliques libérés à l'anode, se complexent aux ions hydroxydes libérés par l'électrolyse de l'eau et génèrent des hydroxydes de métal, selon la réaction suivante :



Ces hydroxydes de métal sont insolubles et jouent le rôle de coagulant et réagissent avec les matières en suspension et/ou les colloïdes, d'où élimination des polluants. Généralement, pour la dépollution des eaux usées, on utilise des électrodes en aluminium ou en fer.

Dans le cas de l'aluminium, la formation du coagulant  $Al(OH)_3$  passe par la formation et la transformation de divers espèces monomériques, tel que :  $Al(OH)_4^{2+}$ ,  $Al(OH)_2^+$ ,  $Al(OH)_4^-$ , et

polymériques tel que :  $Al_2(OH)_2^+$ ,  $Al_6(OH)_{15}^{3+}$ ,  $Al_7(OH)_{17}^{4+}$ ,  $Al_8(OH)_{20}^{4+}$ ,  $Al_{13}O_3(OH)_{24}^{7+}$ ,  $Al_8(OH)_{34}^{5+}$ .

De même que pour les électrodes en fer, la formation du coagulant  $Fe(OH)_3$  passe par la formation et la transformation de divers espèces qui sont :  $Fe(H_2O)_6^{3+}$ ,  $Fe(H_2O)_5(OH)^{2+}$ ,  $Fe(H_2O)_5(OH)_2^+$ ,  $Fe(H_2O)_8(OH)_2^{4+}$  et  $Fe(H_2O)_6(OH)_4^+$ .

Il est aussi possible d'utiliser d'autres métaux comme anode soluble. Néanmoins, l'aluminium et le fer restent les plus utilisés grâce à leur prix abordable et à leur forme ionique qui présente une valence élevée [31].

## II.4.5 Configuration des électrodes

Une cellule d'EC à deux électrodes ne convient pas pour le traitement des eaux usées, du fait que la vitesse de dissolution du métal n'est pas exploitable et il est alors nécessaire d'utiliser des électrodes présentant de grandes surfaces. Ceci est rendu possible par l'utilisation d'électrodes supplémentaires monopolaires ou bipolaires [25].

### II.4.5.1 Electrodes monopolaires

Les électrodes monopolaires peuvent être connectées soit en parallèle, soit en série.

**1) Connexion en parallèle :** Cette cellule EC consiste essentiellement en paires de plaques de métal conducteur placées entre deux électrodes parallèles et une source de courant continu. Les plaques métalliques conductrices sont appelées communément « électrodes sacrificielles ». L'anode sacrificielle abaisse le potentiel de dissolution de l'anode et minimise la passivation de la cathode. La figure II.3.a montre des électrodes en connexion parallèle.

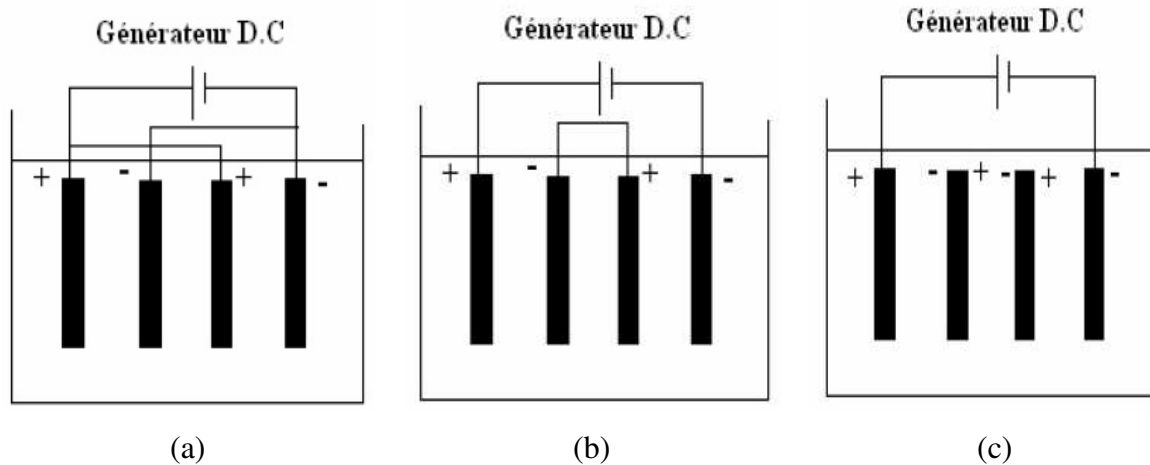
**2) Connexion en série :** Comme le montre la figure II.3.b, chaque paire d'électrodes sacrificielles est interconnectée l'une avec l'autre, et n'a donc pas d'interconnexions avec les électrodes externes. Cette disposition de cellules EC avec des électrodes monopolaires en série est similaire du point de vue électrique à une simple cellule avec plusieurs électrodes et des interconnexions.

Dans un montage en série, une même intensité de courant traverse toutes les électrodes, la tension (différence de potentiel) nécessaire sera plus importante, puisque les résistances s'additionnent. Il faudrait un générateur permettant d'imposer des intensités relativement faibles et des tensions plus élevées.

### II.4.5.2 Electrodes bipolaires

Seules les deux électrodes monopolaires sont connectées à la source de courant sans aucune interconnexion entre les électrodes sacrificielles. Les différentes électrodes sont placées comme l'indique la figure II.3.c.

Cet arrangement permet une installation plus simple, qui facilite la maintenance lors de l'utilisation. Quand le courant électrique traverse les deux électrodes monopolaires, les faces non chargées des plaques conductrices seront transformées en faces chargées, qui auront alors une charge opposée par rapport au côté parallèle qui lui est adjacent ; les électrodes sacrificielles sont alors dites électrodes bipolaires [26].



**Figure II.3** : Configuration des branchements. (a) monopolaires en série, (b) monopolaires en parallèle, (c) bipolaire.

Dans la plupart des installations industrielles, les électrodes sous forme de plaques sont placées verticalement les unes faces aux autres. Cela s'explique par la simplicité de montage, de remplacement et de nettoyage. Trois possibilités s'offrent à l'utilisateur pour la circulation de l'effluent : système discontinu système continu et système continu avec recirculation [26].

## II.4.6 Facteurs influençant le fonctionnement d'une cellule d'électrocoagulation

### II.4.6.1 Le type d'électrode

Le type d'électrode (Fe ou Al) utilisé peut avoir un impact sur la qualité du traitement des eaux usées. L'anode en Al est plus efficace que celle en fer pour le traitement de la couleur et de la turbidité. En revanche, le taux d'abattement de la DCO n'est pas significativement influencé par le type d'électrode [32].

Tsai et al. [33] ont également montré que l'utilisation d'une anode en Fe donne de meilleurs résultats par rapport à une anode en Al à des faibles valeurs de tension. Les hydroxydes de fer décantent mieux que les hydroxydes d'aluminium. Ceci peut être expliqué du fait que le fer présente une masse molaire plus élevée que l'Al [34]. Le volume des résidus métalliques générés est deux fois plus élevé en changeant l'électrode de Fe par une électrode d'Al [32].

#### **II.4.6.2 L'écart entre les électrodes**

La distance inter-électrode est un paramètre pouvant influencer la qualité du traitement des eaux usées. En effet, pour un courant électrique constant, l'augmentation de l'écart entre les deux électrodes cause une augmentation de la consommation énergétique et de la température du milieu, ce qui peut modifier l'efficacité du traitement. Ce facteur est en grande partie responsable de la baisse du rendement énergétique dans une cellule électrolytique. D'une façon générale, l'écart entre les deux électrodes obéit à un compromis entre la régulation du débit et une énergie de dissipation acceptable. Yu et al. [35] ont étudié l'effet de l'espacement entre les deux électrodes sur l'efficacité d'élimination du phosphore. Les résultats de cette étude ont prouvé que la meilleure efficacité d'élimination de ce polluant a été obtenue pour un espacement entre 1 et 2 cm.

#### **II.4.6.3 La surface active**

La surface active est définie comme étant la surface de l'électrode mise en contact avec la solution à traiter. Plus la surface active est grande, plus le transfert électrochimique entre les molécules organiques et les électrodes est important, améliorant l'efficacité du traitement [36].

Ainsi, de nombreux types d'électrodes ont été développés pour augmenter la surface spécifique, par exemple, électrode poreuse, électrode constituée d'un empilement de tissus de fibres de carbone, électrode de forme parallélépipédique combinée de plusieurs grilles de métal déployé en acier inoxydable, etc

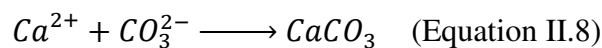
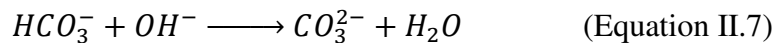
#### **II.4.6.4 L'intensité du courant**

L'intensité du courant imposée au système est un paramètre déterminant de l'efficacité de la technique à éliminer les polluants des eaux usées. En effet, cette intensité de courant appliquée permet d'une part, de contrôler la cinétique électrochimique de dissolution des électrodes anodiques et, d'autre part, de contrôler le dégagement de bulles d'hydrogène sur la cathode [37,38]. L'intensité de courant appliquée dans un système d'EC détermine la quantité des ions  $Al^{3+}$  ou de  $Fe^{2+}$  libérée des électrodes [39]. L'application d'un courant de faible intensité entraîne la production d'une faible quantité d'ions hydroxyde et le dégagement d'une faible quantité d'ions hydrogène au niveau de la cathode. Par contre, un courant plus élevé provoque une augmentation de la vitesse de la réaction d'où une consommation rapide des électrodes et une dépense énergétique plus importante.

#### **II.4.6.5 La conductivité de la solution**

La conductivité de la solution touche l'efficacité du courant, la tension et la consommation de l'énergie électrique dans une cellule électrolytique [40,41]. La conductivité du milieu doit être assez élevée pour assurer un bon transfert ionique dans l'effluent à traiter. En effet, dans le

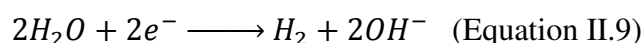
cas où la conductivité est trop faible, la résistance du milieu est trop forte, ce qui oblige à appliquer une tension très élevée pour faire passer le courant. Dans ce cas, et pour éviter des coûts de traitement élevés, l'utilisation d'un électrolyte est nécessaire pour améliorer la conductivité électrique. Le NaCl est le sel le plus souvent utilisé parce que d'une part, il est non toxique et, d'autre part, son coût est relativement faible [42]. De plus, une augmentation de la conductivité de la solution en utilisant le NaCl a d'autres avantages, les ions chlorures évitent le phénomène de l'inhibition par la déposition du magnésium et de calcium à la surface de l'électrode [43]. L'existence des ions carbonates ou sulfates dans les eaux à traiter conduirait à la précipitation des ions  $Ca^{2+}$  ou  $Mg^{2+}$  en formant une couche isolante à la surface de l'électrode. Cette couche isolante entraîne une augmentation du potentiel entre les deux électrodes, d'où une diminution de l'efficacité de courant [39]. La réaction qui décrit l'effet des ions carbonates dans la solution est la suivante [41]:



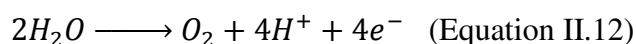
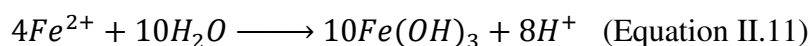
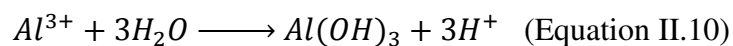
L'utilisation d'un autre électrolyte comme le  $Na_2SO_4$  aide également au passage du courant entre les électrodes sans réagir nécessairement avec les autres ions présents en solution. D'après la littérature, plusieurs études s'intéressent à étudier l'effet de la conductivité sur l'efficacité d'élimination de la DCO et des MES qui caractérisent les eaux usées [40]. Il a été prouvé que la conductivité n'a pratiquement aucun effet sur l'efficacité d'élimination des polluants, mais c'est l'augmentation de la densité du courant appliquée qui est responsable de l'accroissement de l'efficacité d'élimination des polluants.

#### II.4.6.6 pH initial de la solution

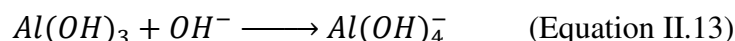
Le pH initial de l'eau brut est un facteur pouvant influencer la performance d'un processus d'EC [39-41,44]. Après le traitement des eaux usées par un processus d'EC, nous remarquons une élévation de la valeur du  $pH_{(final)}$ . Ce phénomène a été décrit par Vik et al. [45]. L'augmentation du pH lors de l'EC est dû principalement à la formation des ions hydroxydes à la cathode qui s'accompagne par d'une libération de bulles d'hydrogène suivant l'équation II.9 :



La production des ions  $H^+$  issus, d'une part, de la formation des hydroxydes de fer ou d'aluminium (Equations II.10 et II.11) et, d'autre part, de la réaction de l'oxydation de l'eau en oxygène (Equation II.12) peut entraîner la diminution du pH de l'eau, dépendamment de la cinétique des réactions [39] :



De plus, au cours d'un procédé d'EC, la formation de  $Al(OH)_4^-$  par réaction entre  $Al(OH)_3$  et les ions  $OH^-$  est à l'origine de la baisse de la valeur du pH lorsque la solution est initialement basique [39].



#### II.4.6.7 La température de la solution

L'effet de la température dans la technologie de l'EC n'a pas été discuté malgré que cette technologie existe depuis des centaines d'années. Des chercheurs soviétiques ont cependant montré que l'efficacité maximum du procédé d'EC a été obtenue avec une valeur de température de 60°C et que tout dépassement de cette valeur entraîne une diminution de l'EC [46]. En effet, l'augmentation de l'EC avec la température a été attribuée à la plus grande activité de la destruction du film d'oxyde d'aluminium sur la surface de l'électrode. Quand la température est trop élevée, il y a un rétrécissement des pores de  $Al(OH)_3$  ayant pour résultats des floculations plus compactes qui seront déposées trop vite à la surface [39]. Aussi, une température trop élevée est défavorable car elle risque de changer l'interface gaz liquide et implique une production de bulles d'hydrogène de taille plus importante d'où une diminution de l'accrochage des MES. Pour le traitement des eaux usées contenant de l'huile, la consommation de l'énergie est maximum pour des valeurs de température légèrement inférieures à 35°C car un accroissement de la température donne une conductivité élevée et, par conséquent, une moindre consommation d'énergie [39, 47].

#### II.4.6.8 Effet du temps de l'électrocoagulation

L'efficacité de l'EC est fortement influencée par le temps de fonctionnement en mode discontinu et l'espace-temps en mode continu, déduit du rapport entre le volume de la cellule et le débit volumétrique. La quantité de coagulant produite pendant l'EC est directement proportionnelle à la charge électrique ajoutée par unité de volume [48]. Il est possible de calculer la quantité de coagulant produite en utilisant la loi de Faraday lorsque le courant et le temps de fonctionnement sont connus. Même si une élimination complète des polluants n'est jamais atteinte, l'efficacité de l'élimination des polluants augmente avec le temps d'électrolyse. Cependant, au-delà du temps d'électrolyse optimal, l'efficacité de l'élimination des polluants reste constante et n'augmente pas avec l'augmentation du temps d'électrolyse. Cela est dû au fait

qu'il y a suffisamment de flocons pour l'élimination du polluant [49,50]. En conclusion, en ce qui concerne la densité de courant. Le temps d'électrolyse est un paramètre clé dans la conception et la mise à l'échelle d'une cellule EC.

#### II.4.6.9 Consommation de l'énergie électrique spécifique

Le paramètre coût est considéré parmi les facteurs qui affectent grandement l'application de tout procédé de traitement des eaux usées. Dans un processus d'EC, la consommation de l'énergie électrique spécifique et l'efficacité du courant sont les deux paramètres liés au coût d'énergie [41]. En effet, selon Tezcan et al. [51], la consommation de l'énergie électrique spécifique est définie comme étant la quantité de l'énergie électrique consommée par une unité de masse de la charge organique éliminée et elle peut être calculée suivant cette formule [52] :

$$CEES \left( \frac{kWh}{kg} \right) = \frac{nFU}{\phi M 3.6 \times 10^3} \quad (\text{Equation II.14})$$

Avec  $n$  est le nombre de charge (égal à 3, en considérant l'électrode d'aluminium) dans la réaction et  $\phi$  est l'efficacité du courant pour la dissolution d'une électrode d'aluminium. Une augmentation de la conductivité entraîne une diminution de la consommation de l'énergie électrique spécifique. En effet, il est clair que lorsque la conductivité de la solution à traiter augmente, la résistance diminue et par conséquent la tension nécessaire pour atteindre la densité du courant optimum diminue d'où une baisse de la consommation de l'énergie électrique. La consommation de l'énergie électrique dépend du type de la configuration (monopolaire ou bipolaire) utilisée dans un réacteur d'EC. Il est préférable d'utiliser une configuration monopolaire car la consommation de l'énergie électrique est beaucoup plus importante dans une cellule électrochimique bipolaire qu'une cellule électrochimique monopolaire pour une même intensité de courant imposée et tout en gardant le même espacement entre les deux électrodes [35].

#### II.4.7 Principales applications de l'électrocoagulation

Actuellement, les avantages du processus d'électrocoagulation le placent parmi les processus les plus prometteurs dans différents domaines du traitement. Ses domaines d'application sont très vastes et l'amélioration des procédés électrochimiques réduit la plupart des inconvénients qui ont freiné l'utilisation de l'électrocoagulation. L'électrocoagulation a le potentiel d'être le choix économiques et environnemental distinct pour le traitement de l'eau usagée et d'autres issues relatives de gestion de l'eau.

L'électrocoagulation a été appliquée avec succès dans le traitement de plusieurs types de pollution : effluents de l'industrie de textile [53].

De plus, dans les dernières décennies l'EC a été proposé comme procédé efficace pour éliminer les espèces ioniques solubles des solutions, en particulier les métaux lourds. Le processus d'électrocoagulation a été prouvé efficace dans la séparation (solide/liquide). Ce procédé l'EC a été utilisé pour le traitement de solutions colorées par différentes substances telles que le Bleu méthylène et jaune éosine [54].

Le traitement de l'eau polluée par les rejets d'une industrie de raffinage mécanique et chimique, caractérisée par une teneur élevée en matières suspensions, une DCO supérieur à 500 mg.l<sup>-1</sup>, une concentration en cuivre de l'ordre de 100 mg/l, a permis d'atteindre 99% d'élimination du cuivre et 75% de DCO par électrocoagulation en utilisant des électrodes en fer et en aluminium [55].

#### **II.4.8 Avantages et inconvénients de l'électrocoagulation**

Comme n'importe quelle méthode de traitement, l'EC comporte des Avantages et des inconvénients que l'on peut résumer comme suit :

##### **II.4.8.1 Avantages de l'électrocoagulation**

- L'électrocoagulation utilise un équipement simple, compact et pratique à utiliser, offrant une grande flexibilité opérationnelle, ce qui permet de résoudre la plupart des problèmes rencontrés lors de la manipulation ;
- Le traitement d'une eau usée par électrocoagulation donne une eau agréable au goût, claire, sans couleur et inodore [56] ;
- Le processus d'électrocoagulation ne requiert pas l'emploi de substances chimiques, ce qui permet d'éviter la neutralisation des substances chimiques en excès utilisées lors de la coagulation chimique, et qui génèrent une pollution secondaire ;
- L'électrocoagulation permet de diminuer le temps de traitement : cette méthode offre un avantage considérable en termes de taille des installations et de possibilité d'automatisation [24] ;
- Des boues ont été obtenues qui sont plus denses et moins hydrophiles. Ce procédé facilite la décantation et la flottation et réduit le volume des boues. Il a été démontré que ces travaux ont permis de diminuer le temps et les coûts de traitement des boues [57] ;
- La méthode d'EC peut également être utilisée de manière pratique dans des zones rurales où l'électricité n'est pas disponible, car un panneau solaire connecté à l'unité peut suffire pour suivre le processus [27] ;
- L'électrocoagulation présente l'avantage d'éliminer les particules colloïdales de petite taille, car le champ électrique appliqué crée un mouvement rapide qui facilite la coagulation ;

- Les bulles d'air générées peuvent entraîner la présence de polluants à la surface de la solution à traiter, ce qui facilite leur concentration, leur rassemblement et leur élimination ;
- Les boues obtenues à l'aide de l'électrocoagulation sont faciles à décanter et à assécher, car elles sont principalement constituées d'oxydes ou d'hydroxydes de métaux. Il s'agit également d'une technique qui génère peu de boues ;
- L'utilisation de l'électrocoagulation nécessite moins de réactifs et permet de diminuer le volume de boues produit par rapport à la coagulation chimique classique.

#### **II.4.8.2 Inconvénients de l'électrocoagulation**

Les inconvénients de la technique d'EC peuvent être résumés comme suit :

- Par effet d'oxydation, les électrodes sacrificielles sont dissoutes dans l'eau usée, ce qui demande un remplacement régulier de ces électrodes ;
- Il est essentiel que la conductivité du rejet à traiter soit adéquate afin de faciliter le passage du courant sans entraîner une consommation excessive d'électricité ;
- Une concentration élevée d'ions calcium et hydrogénocarbonate entraîne la formation d'un dépôt de tartre au niveau de la cathode, ce qui accroît la résistance de la cellule.

Il ressort clairement que les avantages de l'EC sont bien plus que ses inconvénients, qui peuvent également être contrôlés ou réduits. Par conséquent, l'EC est un choix recommandé, efficace et respectueux de l'environnement pour le traitement des eaux usées industrielles, commerciales et municipale.

### **II.5 Le procédé d'électroflottation (EF)**

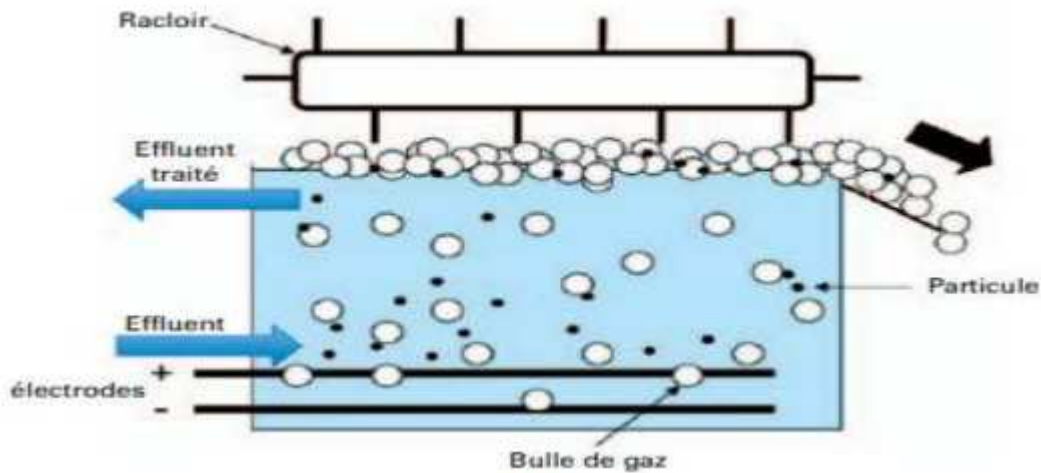
#### **II.5.1 Définition et principe de l'électroflottation**

L'électroflottation (EF) est une technique de séparation solide/liquide basée sur la suspension des particules par les bulles générées lors de l'électrolyse de l'eau. Elle est basée sur la génération d'hydrogène et d'oxygène pendant l'électrolyse de l'eau par l'application d'un courant électrique à la solution traitée. Les bulles de gaz se formant à la surface des électrodes remontent à la surface du liquide, entraînant avec elles les particules en suspension [58].

Ce procédé constitue la version électrochimique de la flottation traditionnelle. Il se distingue par son mécanisme de formation des bulles d'hydrogène et d'oxygène produites par électrolyse de l'eau en utilisant des électrodes appropriées [59,60].

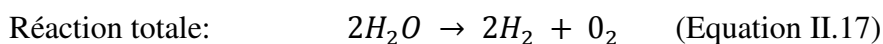
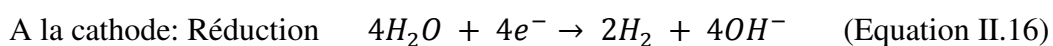
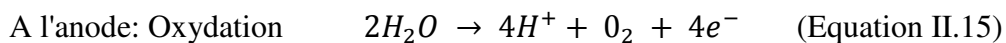
L'EF a l'avantage de générer des bulles plus fines et plus nombreuses que la flottation par air dissous, ce qui améliore l'efficacité du procédé [60,61]. Plus de 90% des combinaisons entre les microbulles et les particules en suspension se produisent pendant les premières minutes dans la cellule d'électroflottation. L'électroflottation est efficace quand la surface totale des bulles

de gaz et la surface de contact avec les particules à flotter sont grandes. Les bulles d'hydrogène qui se dégagent au niveau de la cathode jouent le rôle principal dans le phénomène de séparation.



**Figure II.4** : Schéma de principe du procédé d'électroflottation [62].

Le mécanisme de l'opération est extrêmement complexe. Les améliorations obtenues avec ce procédé semblent liées non seulement à la faible dimension des bulles, mais aussi à une modification de la tension superficielle des particules colloïdales et des variations locales de pH [63]. Les réactions chimiques qui sont produites à la surface des électrodes pour générer les bulles de gaz sont les suivantes :



A partir de ces réactions, on peut constater que pour 4 électrons de courant qui passent entre les électrodes, une molécule d'oxygène et deux molécules d'hydrogène sont formées. Le processus physique d'évolution des gaz peut être divisé en trois étapes: La nucléation, la croissance et le détachement.

Les bulles se forment à la surface des électrodes à partir des solutions hautement sursaturées en gaz. Elles croissent ensuite par diffusion des gaz dissous vers la surface des bulles ou par coalescence à l'électrode avec d'autres bulles. Elles se détachent de l'électrode lorsque les forces de flottation dépassent celles des liaisons à l'électrode [64]. Il a été proposé que l'interaction électrostatique entre les bulles et les doubles couches de l'électrode contrôle le diamètre de détachement des bulles [65].

La dimension des bulles formées à la surface des électrodes varie entre 22 et 50  $\mu\text{m}$  de diamètre selon les conditions expérimentales [66]. L'efficacité de l'électroflottation dépend du flux et de la dimension des microbulles qui sont générées pendant l'électrolyse de l'eau.

### **II.5.2 Paramètres influençant le processus d'électroflottation**

La flottation est un procédé physico-chimique extrêmement complexe par le nombre important de paramètres qui peuvent influencer sa performance. Ces paramètres peuvent être classifiés de façon grossière selon leur nature physique ou chimique. Les bulles jouent un rôle très important dans la séparation des solides de la phase liquide. Il apparaît évident que la taille des bulles est intimement liée au processus de séparation [67].

Plusieurs facteurs peuvent influencer la performance de l'électroflottation tel que la composition de la solution, la densité de courant, la température, le degré de rugosité de la surface de l'électrode, le matériau de l'électrode et le pH du milieu [60].

#### **II.5.2.1 Composition de la solution**

La composition de la solution influe sur la phase gazeuse, ainsi que sur les propriétés physicochimiques des particules flottées. Au cours de l'électrolyse, la présence des ions exerce un effet négatif sur la performance du processus d'électroflottation.

#### **II.5.2.2 Densité de courant**

La densité de courant joue un rôle très important, dans la production de bulles de gaz. En général, plusieurs millions de bulles par seconde et par  $\text{dm}^2$  sont entraînées [61]. La quantité de gaz produite est proportionnelle à l'intervalle de courant, qui se situe habituellement à 100  $\text{A/m}^2$ . Si la densité de courant est faible, la vitesse de formation de bulles est évidemment petite et dans ce cas, l'efficacité du processus est peu importante. Pour des grandes valeurs de densité de courant, la quantité de gaz dégagée est énorme, ce qui provoque l'encrassement de la solution à traiter.

Burns et al [58] ont étudié l'effet de la tension, l'intensité du courant et de la force ionique sur la dimension des bulles de gaz produites dans les processus d'électroflottation. Les résultats ont montré que le flux de gaz produit augmente en fonction de la tension et l'intensité du courant. Le flux augmente aussi avec la force ionique du milieu aqueux. Cependant, aucun lien évident n'a pu être établi entre ces paramètres et la taille des bulles. Les résultats expérimentaux obtenus n'indiquent pas de tendances claires du diamètre des bulles en fonction de la densité de courant pour des valeurs faibles (4-21  $\text{mA/cm}^2$ ). D'autres auteurs ont établi la présence de bulles d'hydrogène et d'oxygène de plus grande dimension dans les pH acides et dans les pH alcalins respectivement. Brandon et Kelsall [65], ont démontré que la taille de détachement des bulles d'hydrogène est élevée à bas pH et faible à haut pH, à l'opposé des bulles d'oxygène.

### II.5.2.3 Nature des électrodes

Des recherches sont encore menées à l'heure actuelle pour accroître la longévité des électrodes tout en diminuant la consommation d'électricité. La faible durée de vie des électrodes est en effet le principal handicap de l'électroflottation. Les anodes sont très sensibles à la corrosion due essentiellement aux polluants présents dans l'effluent [61]. Les cathodes subissent un entartrage par dépôts de carbonates qui réduisent progressivement leur efficacité. Pour éliminer ces phénomènes et pour une meilleure tenue à la corrosion compatible avec la composition physico-chimique des effluents à traiter, des anodes peu solubles donnent d'excellents résultats. Actuellement, on utilise des électrodes à âme en titane recouvertes de bioxyde de plomb et des électrodes en alliage de fer-silicium. Les électrodes doivent assurer une bonne circulation de l'effluent ou le liquide à traiter à travers leur structure et donner une distribution harmonieuse du flux de bulles. De plus, le mouvement des bulles à l'intérieur de la cellule d'électroflottation est important pour le procédé. Leur trajectoire est affectée par l'hydrodynamique et la position des électrodes dans la cellule. Le succès de la flottation dépend de la présence d'un volume suffisant de bulles de gaz par rapport aux particules en suspension. Cependant, un trop grand nombre de bulles peut amener à leur coalescence ou agrégation plutôt qu'à l'attachement aux particules [60].

Les deux types de structures d'électrodes les plus fréquentes sont:

- Des grillages en métal déployé (pourcentage de vide de l'ordre de 75%) ;
- Des plaques verticales parallèles disposées en peigne, quand on recherche une grande rigidité mécanique.

### II.5.2.4 La température

Une augmentation de la température favorise la diminution de la surtension de dégagement d'hydrogène, la viscosité et la tension interfaciale, ce qui intensifie le processus de séparation.

### II.5.3 Application de l'électroflottation

L'électroflottation trouve son application dans divers domaines tel que :

- Traitement des eaux usées surtout avec la combinaison de l'électrocoagulation ;
- Éliminer les huiles insolubles finement dispersées (huile de coupe, émulsion, peintures, etc.);
- L'épuration des effluents d'industrie textile, alimentaire, papier, métallurgie, lisier des porcs...etc. ;
- L'élimination des métaux lourds (nickel, cuivre, zinc, plomb et cadmium) ;
- Élimination des hydrocarbures, des colorants et les pigments ;

- La séparation des minerais ;
- La clarification des jus de pomme et de raisins ;
- Transformation des produits alimentaires [68].

## **II.5.4 Avantages et contraintes de l'électroflottation**

### **II.5.4.1 Avantages de l'électroflottation**

En général, la technique d'électroflottation présente trois avantages principaux qui la différencient des autres techniques de flottation:

- 1) Les bulles de gaz dispersées formées de l'électrolyse sont extrêmement fines et uniforme avec le diamètre moyen de bulle autour de 20 $\mu$ m. Cela augmente la surface de contact entre les particules en suspension et les bulles de gaz.
- 2) Une densité de courant variable donne la possibilité de varier la concentration de bulles de gaz dans le milieu de flottation, augmentant de ce fait les probabilités de collision entre les bulles de gaz et les particules.
- 3) La sélection de la surface d'électrode appropriée et le choix des conditions de la solution permet d'obtenir des résultats de séparation optimaux pour un procédé spécifique [60,64].

Les autres avantages de l'électroflottation inclus :

- Simplicité de l'installation et moindre encombrement ;
- Réduction des installations en amont (coagulation-floculation) ;
- La technique demande une automatisation poussée, donc économe en personnel.
- Fonctionnement silencieux ;
- Possibilité de traiter les effluents à haute température (jusqu'à 100 °C) sans perte sensible d'efficacité ;
- Un haut taux d'élimination de la DBO due à l'oxydation des molécules organiques à l'anode et aussi à l'élimination des graisses et huiles ;
- La montée des floes à la surface donne une écume contenant de 9 à 12% de solides [61, 69] ;
- Présence des réactions secondaires utiles de l'électrolyse de l'eau, qui contribuent à réduire la charge polluante de l'effluent.

### **II.5.4.2 Contraintes de l'électroflottation**

L'électroflottation présente certaines contraintes, parmi lesquelles, on peut citer :

- Corrosion anodique fréquente, surtout en présence de certains polluants comme les acides gras ;
- L'oxydation des boues peut être gênante quand le recyclage des boues est important ;

- Carbonatation des cathodes, impose un détartrage périodique ;
- Corrosion des cuves métalliques par les courants vagabonds dans les petites installations, nécessite de les protéger.

# **Chapitre III : Conception et étude de performance de la cellule électrochimique**

Dans ce chapitre, nous présentons le dispositif expérimental employé pour l'étude de l'électrocoagulation et électroflottation d'un effluent organique issue de la production laitière ainsi la méthodologie expérimentale, les méthodes d'analyse utilisés et les résultats obtenues.

Dans une première partie, l'effluent modèle sera présenté et leurs caractéristiques décrites. Ensuite, les différents dispositifs des expériences seront exposés ainsi que les protocoles expérimentaux utilisés dans ces expériences. En second lieu, les différentes méthodes d'analyse employées pour évaluer la performance de la cellule électrochimique seront présentées. La troisième partie exposera les résultats expérimentaux de caractérisation de la cellule électrochimique.

### III.1 Préparation de la solution modèle « l'effluent synthétique »

Afin de représenter les effluents générés par l'industrie laitière, la solution modèle a été préparée à partir de lait écrémé commercial (Milkospray-Algerie), en dissolvant du lait en poudre avec de l'eau du robinet. La poudre de lait demi-écrémé présentait la composition suivante : 38,7% d'hydrates de carbone (principalement du lactose), 27,1 % de protéines, 15,7 % de matières grasses saturés, 1% de sels minéraux.

Certains auteurs [70-72] ont montré que les teneurs en lait des effluents laitiers étaient généralement inférieures à 5,5 g. l<sup>-1</sup>. Pour cette raison, 15 g de lait a été dissous dans 3000 ml d'eau du robinet, agitée pendant 10 min, pour permettre la dissolution complète du lait en poudre. La composition et les propriétés de l'effluent laitier synthétique ont été mesurées à l'aide des méthodes décrites à la section III.4. Les caractéristiques de l'effluent laitier obtenu sont reportées dans le tableau III.1.

**Tableau III.1** : Caractéristiques l'effluent synthétique.

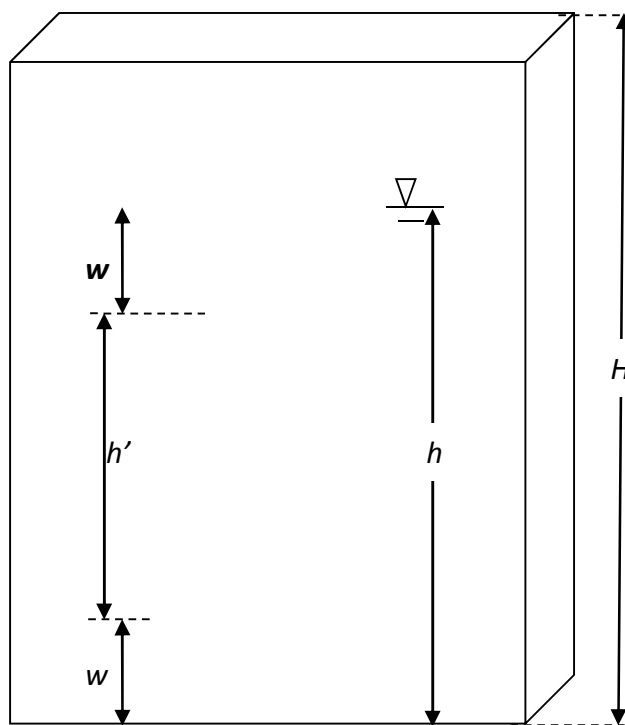
Paramètres	Valeurs
Couleur	Blanc laiteux
Température (°C)	28
pH	7,59
Conductivité (mS/cm)	2,72
MES (g. l <sup>-1</sup> )	1,08
Turbidité (NTU)	4,49

L'utilisation d'un effluent synthétique a été justifiée, d'une part, par les contraintes techniques inhérentes aux difficultés de prélèvement et de transport des échantillons, et d'autre part par la nécessité expérimentale de travailler avec des effluents de composition constante et contrôlable.

## III.2 Matériels et méthodes

### III.2.1 Dispositif expérimentale

Les expériences ont été réalisées dans une cellule électrochimique constituée d'une colonne rectangulaire de 5 cm de profondeur, 17 cm de largeur et 39 cm de hauteur comme indiqué dans le schéma Figure III.1.

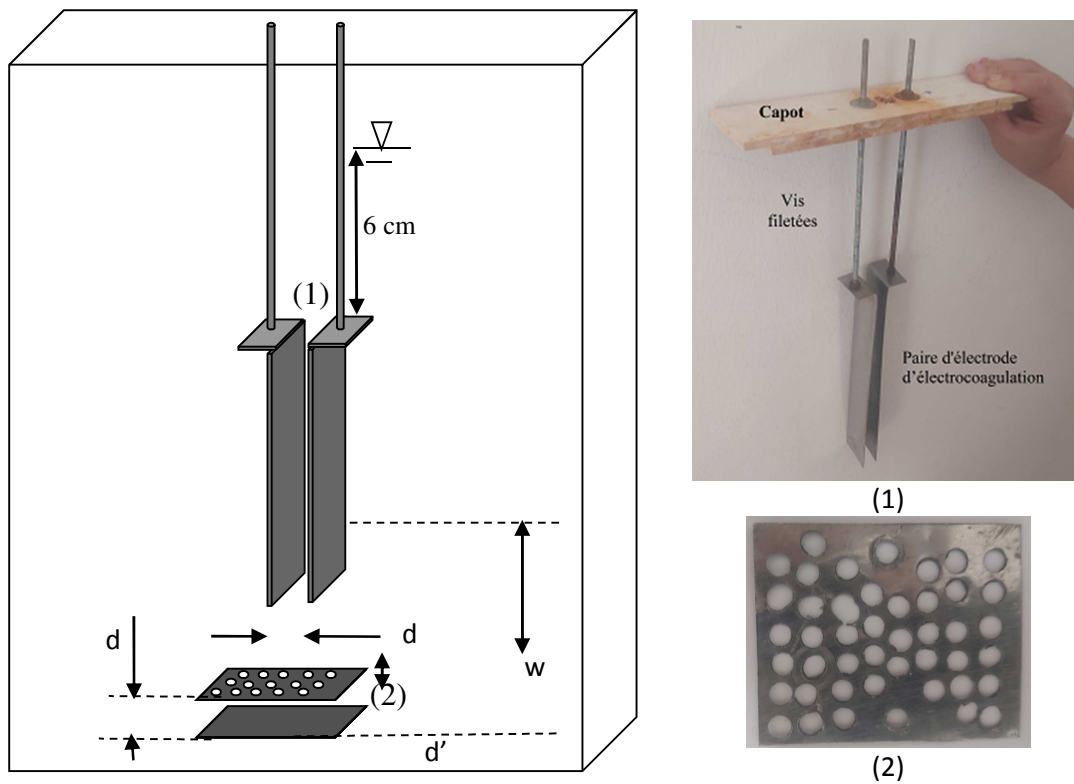


**Figure III.1** : Schéma représentatif de la cellule électrochimique.

**Tableau III.2** : Les principales dimensions de la cellule électrochimique.

Paramètres	Valeurs
Profondeur de la colonne, b	5 cm
Hauteur de la colonne, H	39 cm
Hauteur des chicanes, h'	20 cm
Distance entre les chicanes et le fond de la colonne, w	6 cm
Niveau de l'effluent, h	32 cm
Volume de la colonne, V	3 l

La figure III.2 présente la configuration des électrodes utilisées dans les expériences. Les électrodes utilisées sont en acier inoxydable d'une pureté d'environ 98% (Figure III.2). Leur conductivité électrique est de l'ordre de  $13,3 \cdot 10^6$  mS/cm. Le métal des électrodes peut être obtenu par récupération des déchets d'acier inox, ce qui rend leur coût supportable pour un procédé de dépollution.



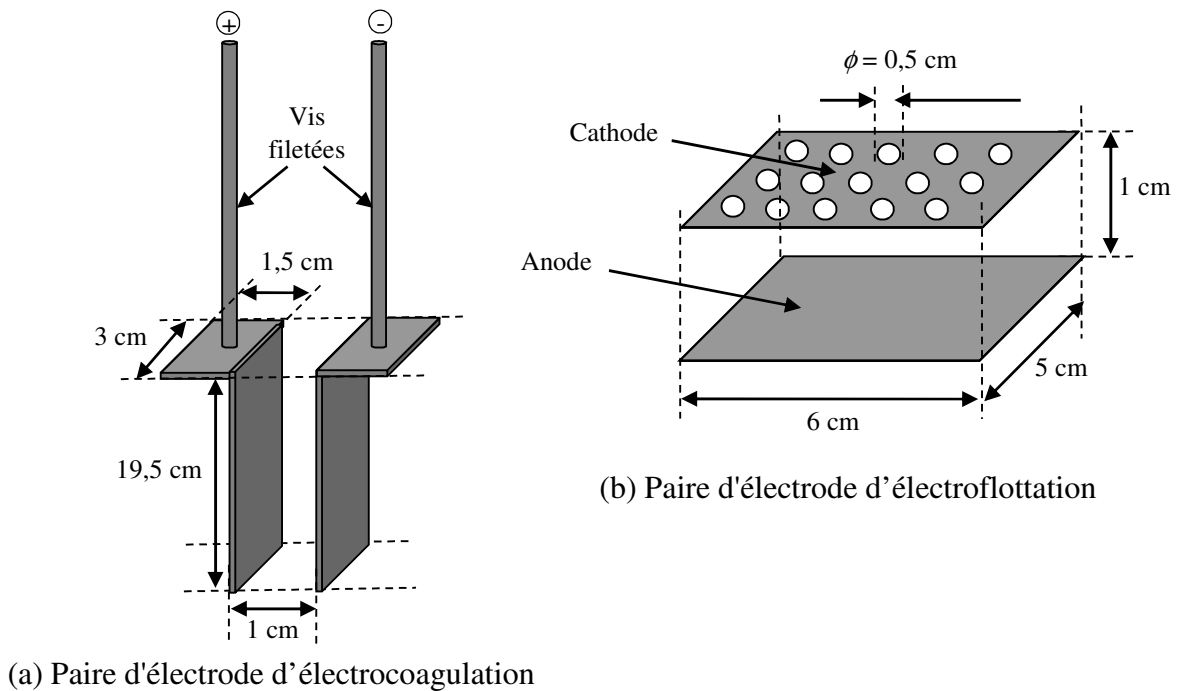
(1) Paire d'électrodes d'électrocoagulation

(2) Paire d'électrodes d'électroflottation

d : Distance entre les électrodes (1 cm)

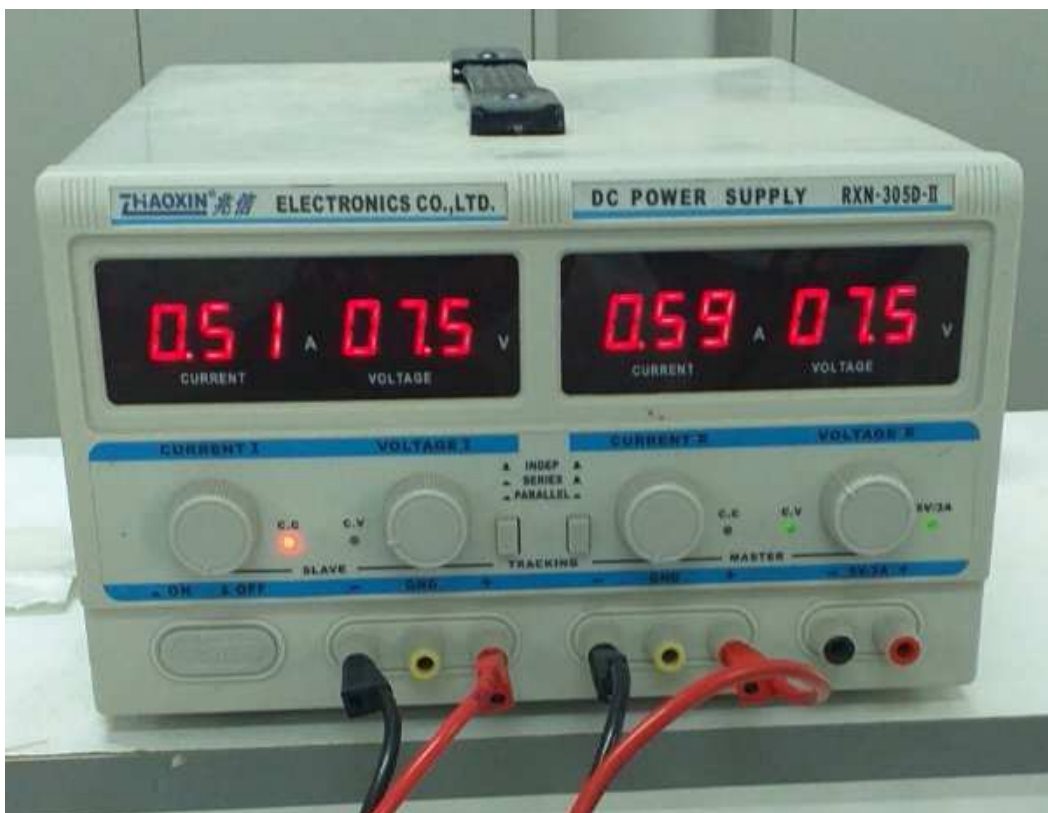
d' : Distance entre l'électrode et le fond de la colonne (1 cm)

**Figure III.2** : Position des électrodes pour les différents processus électrochimiques.



**Figure III.3 :** Dimensions des électrodes.

Le courant a été imposé à l'aide d'un générateur de type RXN-3050D-II capable de générer une tension maximale de 30 V et une intensité maximale de 5 A (Figure III.4).



**Figure III.4 :** Alimentation double de laboratoire RXN-3050D-II.

Les électrodes ont été préalablement traitées avec un papier abrasif au niveau de leur surface, dans le but d'homogénéiser celles-ci et d'éliminer les impuretés et les dépôts qui peuvent les contaminer. Les électrodes sont extraites de la cellule, après chaque manipulation dans le but de les examiner, et de les nettoyer, étant donné que les résidus de décomposition des polluants peuvent se déposer sur leur surface (Figure III.5). Le nettoyage s'effectue avec une solution d'acide chlorhydrique de 0,2 N et à l'eau savonneuse, puis rincés à l'eau de robinet, permettant ainsi de d'éliminer les dépôts des polluants pouvant former une couche résistante sur la surface.



**Figure III.5** : Etat des électrodes après une manipulation (avant nettoyage)

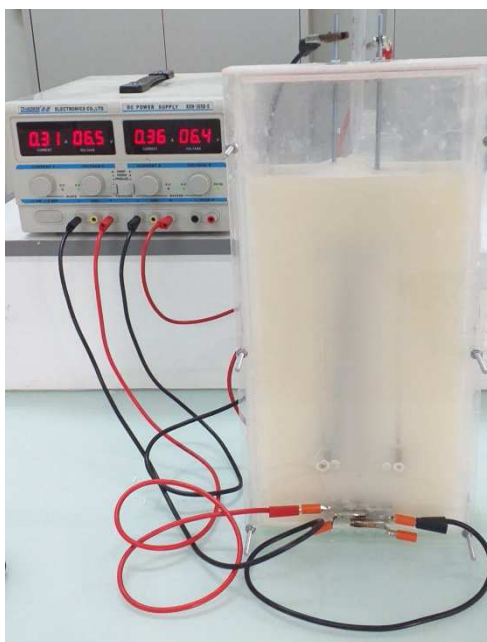
### III.2.2 Méthodologie expérimentale

Notre objectif consiste à évaluer les performances épuratoires du procédé d'électroflottation combiné de l'électroflottation pour le traitement d'un effluent laitier. Différents paramètres ont été étudiés afin de choisir les paramètres optimaux pour le procédé: la densité du courant (26,3 à 37,5 mA/cm<sup>2</sup>), le temps du traitement ainsi que le pH et de la conductivité initiale de l'effluent. Dans le tableau III.3 sont reportées les conditions opératoires de l'ensemble des manipulations réalisées.

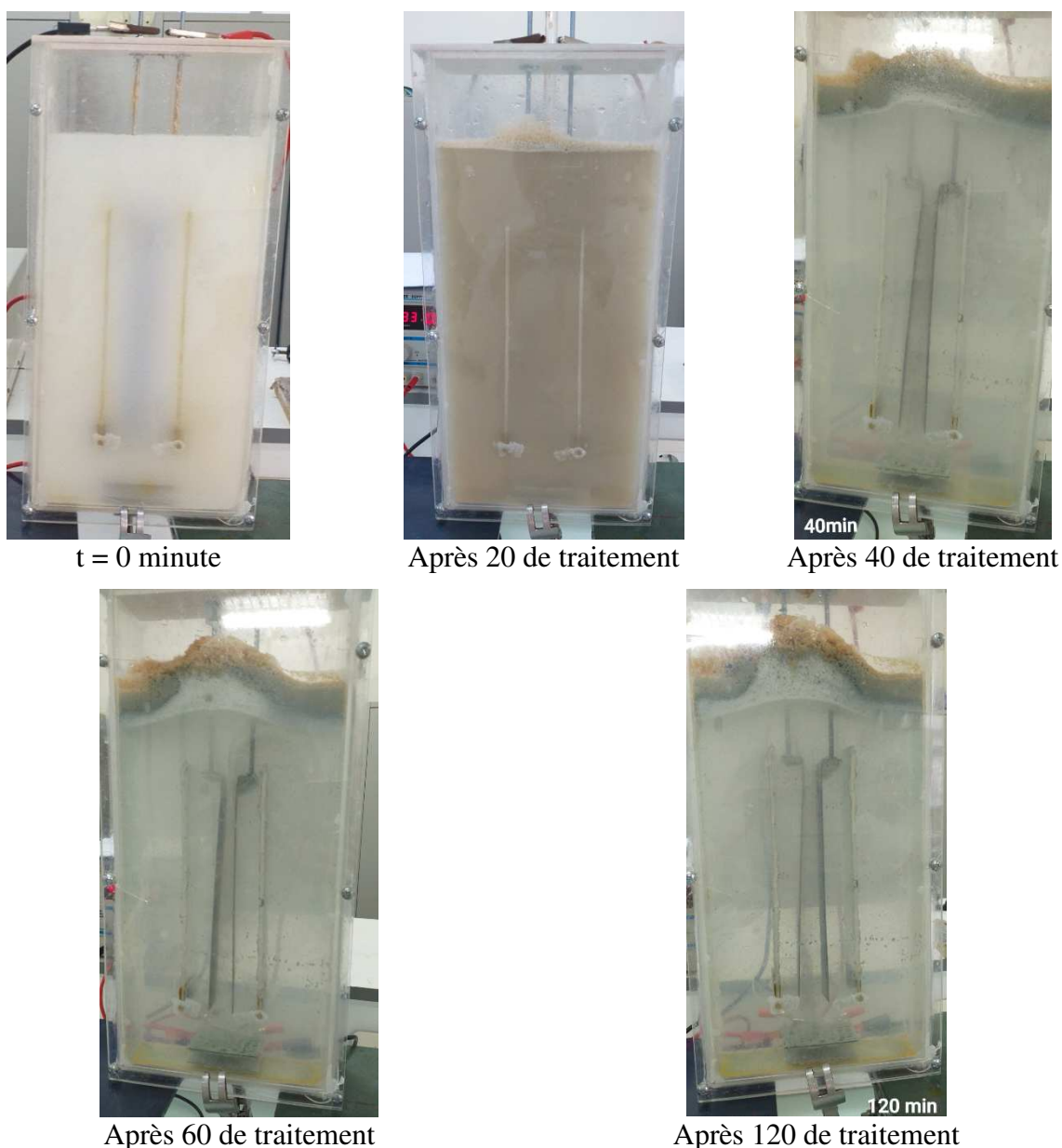
**Tableau III.3** : Paramètres utilisés lors de traitement électrochimique.

Manipulations	Mode de fonctionnement	pH initial de l'effluent	Conductivité initiale de l'effluent (mS/cm)	densité de courant (mA/cm <sup>2</sup> )
Test 01	Combiné EC-EF	7,59	2,72	26,3
Test 02	Combiné EC-EF	7,59	2,72	32,3
Test 03	Combiné EC-EF	7,59	2,72	37,5
Test 04	Combiné EC-EF + 5gr de NaCl	7,36	7,45	26,3
Test 05	Combiné EC-EF + 10 gr de NaCl	7,5	11,9	26,3
Test 06	Combiné EC-EF + 20 gr de NaCl	7,5	19,34	26,3
Test 07	Combiné EC-EF + 3 gr de NaOH	11,88	2,23	26,3
Test 08	Combiné EC-EF + 5 ml de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> à 98%	2,11	2,72	26,3
Test 09	EC seule	7,59	2,72	26,3
Test 10	EC suivi EF	7,59	2,72	26,3

Dans une première étape le traitement d'électrocoagulation-électroflottation est effectué à une densité de courant variant de 26,3 à 37,5 mA/cm<sup>2</sup> pendant 120 min. La distance entre les électrodes est fixée à 1cm. Les paires d'électrodes d'électrocoagulation et d'électroflottation sont branchées simultanément et en parallèle au générateur de courant. Chaque expérience est réalisée séparément à une température de 25 °C (Figure III.6).

**Figure III.6** : Dispositif expérimental de l'électrocoagulation-électroflottation.

Pendant la manipulation, nous avons suivi en ligne l'évolution des paramètres électrochimiques comme le pH, la conductivité, la température ainsi que la tension, et effectuée des prélèvements de 50 ml à des intervalles de 20, 40, 60, 90 et 120 minutes de traitement pour mesurer la turbidité et les MES. Ces échantillons sont prélevés à un niveau constant à proximité des d'électrodes d'électrocoagulation, où l'on suppose avoir la plus grande efficacité du processus, grâce à une soupape fixée sur la capot de la cellule (Figure III.6). Les échantillons ont subi des décantations de 24 heures afin d'aboutir à une bonne clarification. Après décantation, environ 10 ml de surnageant est échantillonné pour mesurer la turbidité. Un exemple de résultat de traitement par électrocoagulation-électroflottation est présenté sur la figure III.7.



(a) Evolution de traitement par EC-EF (résultats test 02)



(b) Prélèvements et décantation pendant 24 heures

**Figure III.7 :** Etapes de traitement par EC-EF, prélèvements et décantation (résultats test 02).

Dans une seconde étape, à la lumière des résultats obtenus, le traitement est effectué à une densité de courant constante de  $26,3 \text{ mA/cm}^2$  pendant 30 minutes. Le pH initial a été varié entre 2,11 et 11,88 en utilisant une solution 5 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  à 98% ou 3g d'hydroxyde de sodium [73, 74]. La conductivité de la solution a été contrôlée par l'ajout du chlorure de sodium (de 5g à 20 g). Elle a été variée de 2,72 à 19,34 mS/cm. Cette gamme est identique à celle généralement utilisée dans la littérature pour l'étude de ce paramètre [75, 76]. NaCl est un sel présentant une faible toxicité à des concentrations modérées, un coût raisonnable, une conductivité et une solubilité élevée. Il joue aussi le rôle d'un électrolyte support. L'ajout de NaCl est presque sans effet sur le pH initial de la solution. L'évolution des paramètres électrochimiques pendant le traitement est suivi à la fin du traitement.

Dans une troisième étape, deux types de traitements ont été appliqués : (i) Traitement par électrocoagulation seule ; (ii) Traitement par électrocoagulation suivi d'électroflottation après 30 minute de traitement. Les différentes expériences sont effectuées à une densité de courant de courant constante de  $26,3 \text{ mA/cm}^2$  pendant 30 minutes. La distance entre les électrodes est fixée à 1 cm. L'évolution des paramètres électrochimiques pendant le traitement est suivi de la même façon décrite dans la première étape.

### III.2.3 Analyses

#### III.2.3.1 Mesure du pH et de la conductivité

Pour chaque expérience, les pH des échantillons prélevés sont mesurés par un pH mètre "Hanna, pH210" muni d'une électrode en verre contenant une solution de KCl de concentration 4M (Figure III.8). La tension aux bornes des électrodes est enregistrée en continu. Le pH initial a été varié entre 2,11 et 11,88 en utilisant une solution de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  à 98% ou 3g d'hydroxyde de sodium.



**Figure III.8 :** Microprocesseur pH Mètre "Hanna pH 210".

Les mesures de conductivité sont effectuées à l'aide d'un conductimètre "Hanna, EC214 conductimètre " (Figure III.9).



**Figure III.9 :** Conductimètre "Hanna, EC214 ".

### III.2.3.2 Mesure de la turbidité

La turbidité a été mesurée après 24 heures de décantation et sur le surnageant clair. Nous avons utilisé un appareil de type WTW instruments "Turb 555IR" comportant une diode infrarouge de longueur d'onde 890 nm et un détecteur de lumière réfléchi qui est un appareil à lecture directe pour la mesure de la turbidité. La mesure est basée sur l'absorption par les particules en suspension. L'unité utilisée pour la turbidité est la Néphélogétrie Turbidity Unit (NTU). L'appareil est étalonné avant chaque mesure (figure III.10).



**Figure III.10** : Turbidimètre WTW "Turb 555IR".

Le rendement d'élimination de la turbidité  $Turb$  (%) est déterminé par la relation suivante :

$$Turb (\%) = \frac{(Tur_i - Tur_f)}{Tur_i} \cdot 100 \quad \text{Equation III.1}$$

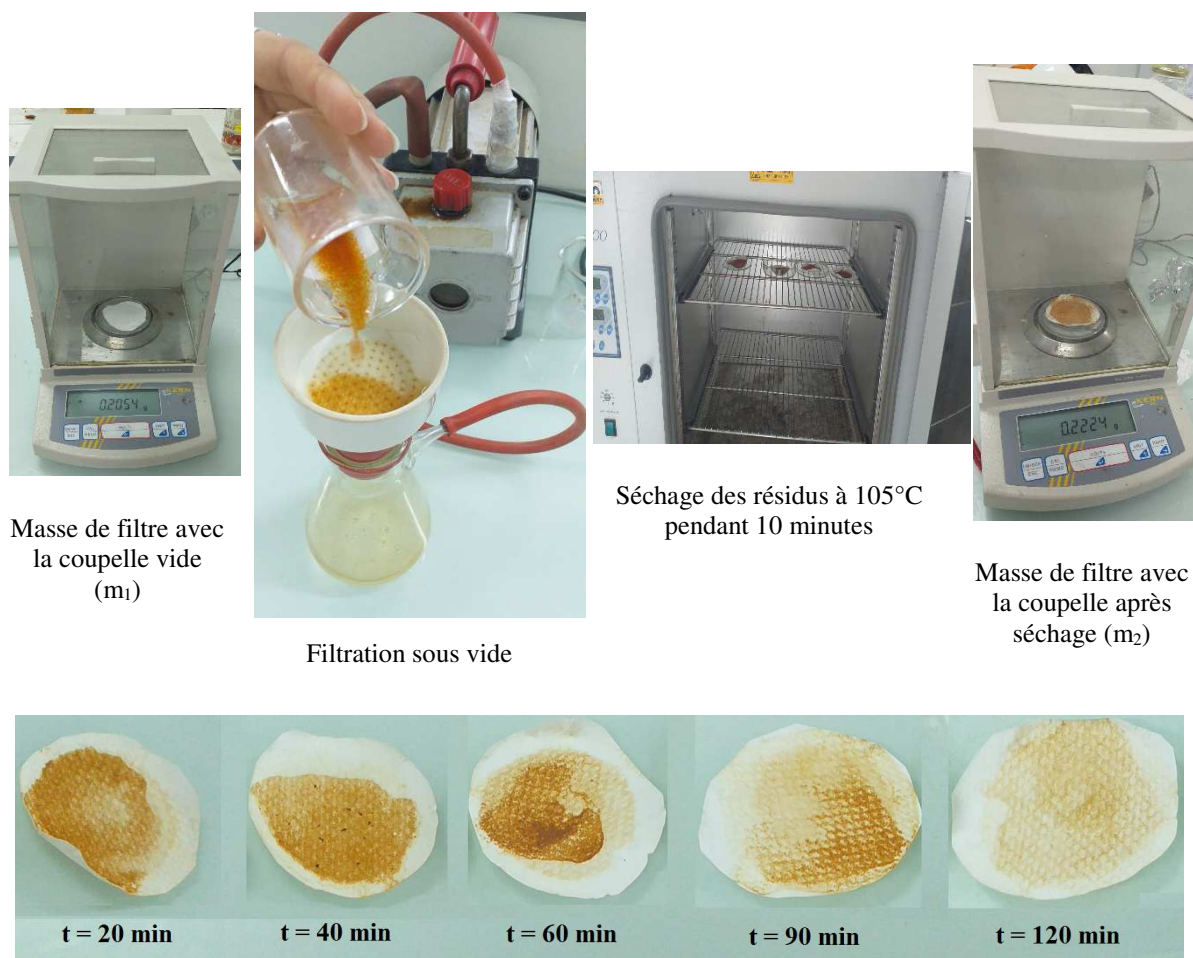
$Turb_i$  et  $Turb_f$  sont les turbidités de la solution avant et après traitement par EC-EF, en NTU.

### III.2.3.3 Mesure des matières en suspensions (MES)

La détermination de MES a été effectuée sur la fraction liquide de l'échantillon qui a subi une décantation de 24 heures. La détermination de MES a été effectuée en procédant à une filtration sous vide d'un échantillon (volume de 20 ml) au travers d'un filtre Whatman 934 AH qui est préalablement pesé avec la coupelle en verre vide ( $m_1$ ) (Figure III.11).

Une fois la filtration terminée, le résidu est séché à 105°C pendant 10 minutes. Après séchage, le filtre est refroidi et repesé par la suite ( $m_2$ ). En notant le volume de l'échantillon ( $V$  en l) qui a été filtré. La concentration de MES exprimée en  $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$  est obtenue par différence de poids entre la masse  $m_1$  et la masse  $m_2$  selon la formule suivante:

$$MES = \frac{(m_2 - m_1)}{V} \quad \text{Equation III.2}$$



Masse de filtre avec la coupelle vide ( $m_1$ )

Filtration sous vide

Séchage des résidus à 105°C pendant 10 minutes

Masse de filtre avec la coupelle après séchage ( $m_2$ )

Exemple de résultat : résultats de traitement par EC-EF (test 02)

**Figure III.11:** Mesure des matières en suspensions.

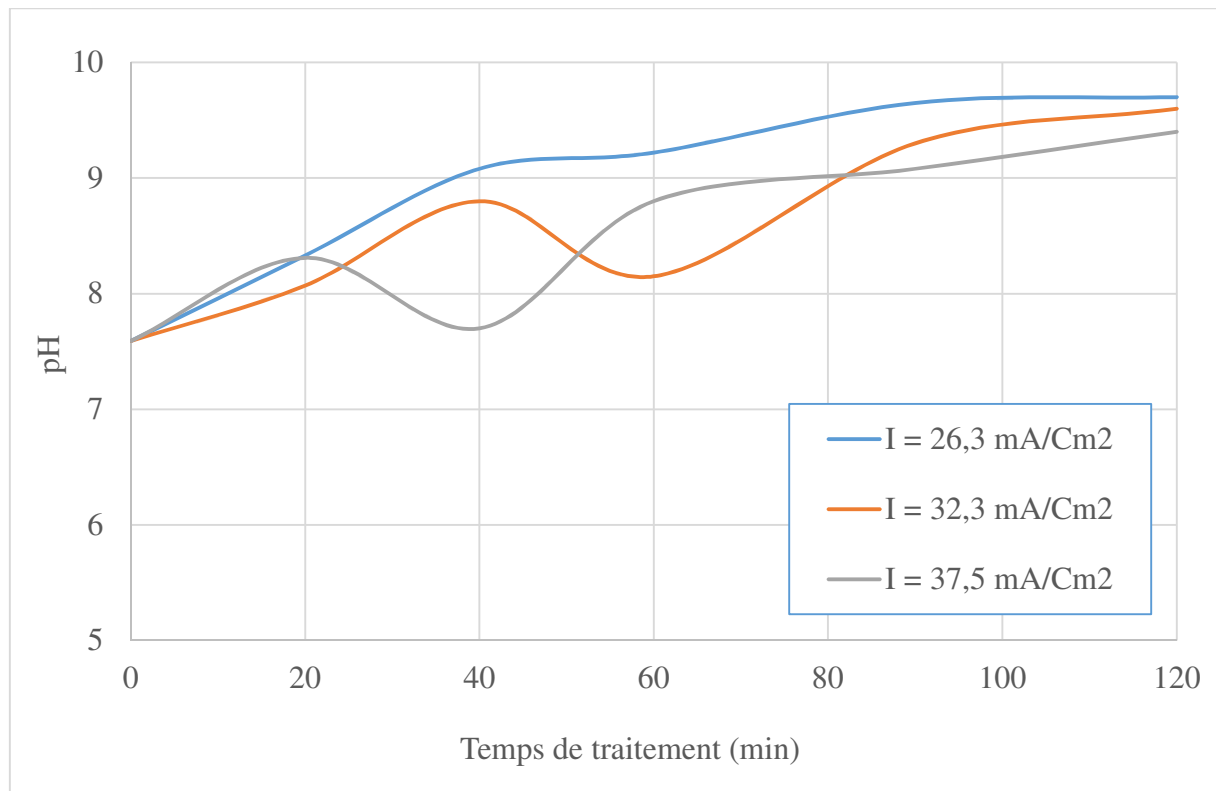
### III.3 Résultats et discussions

#### III.3.1 Évolution des paramètres électrochimiques

##### III.3.1.1 Evolution du pH au cours de l'EC-EF

L'évolution du pH de l'effluent pendant le traitement d'électroflottation-électroflottation est illustré à la Figure III.12. On constate que, le pH moyen de l'effluent initialement à 7,59 augmente à des valeurs supérieures à 9. Cela s'explique par la production d'hydroxydes par la réduction de l'eau à la cathode [77]. En augmentant la densité de courant, une légère diminution à tendance oscillatoire est obtenue à partir de 40 minutes jusqu'à la fin du traitement. Cet effet est intensifié avec la densité du courant. Cela suggère que pendant le traitement d'électrocoagulation-électroflottation d'autres substances ou réactions sont produites affectant l'équilibre ionique. Il est probable que le  $\text{CO}_2$  soluble ou formé par la réaction de

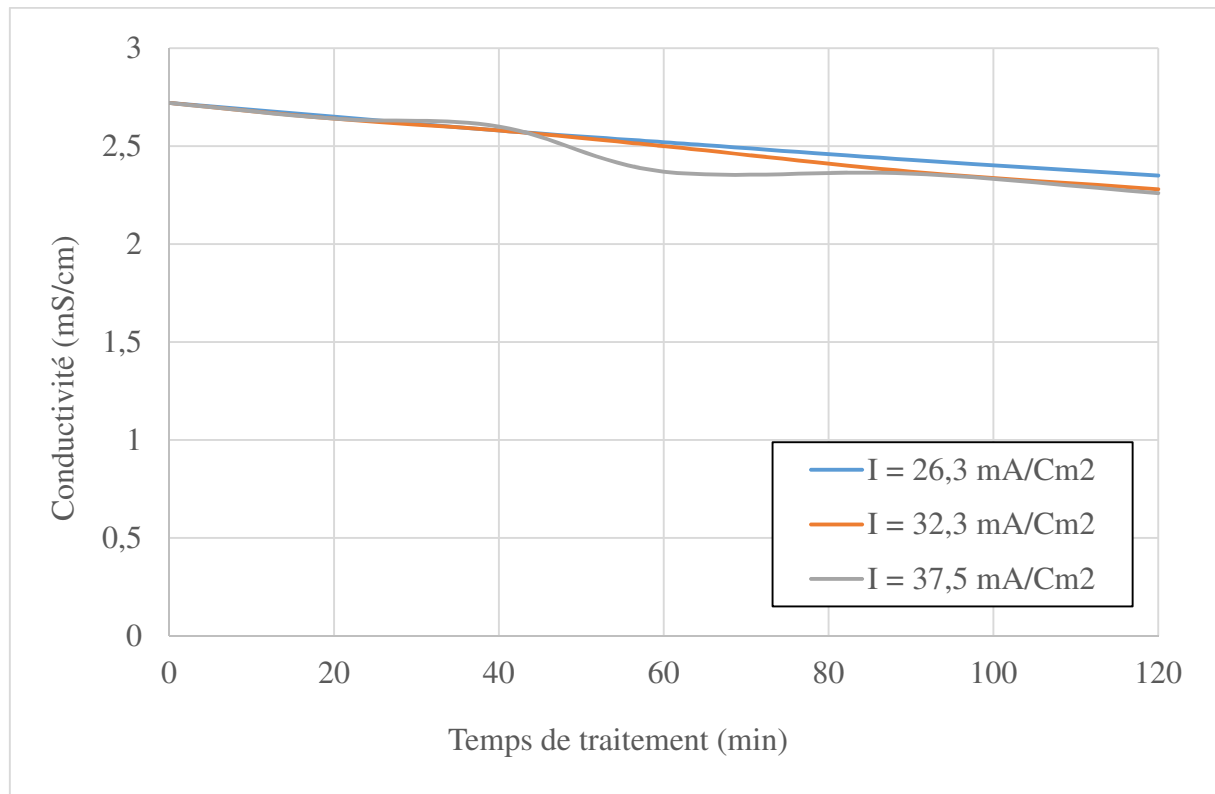
l'oxygène sur l'anode peut réagir avec les cations  $H^+$  en formant des acides qui contribuent à la baisse du pH.



**Figure III.12** : Evolution du pH au cours de traitement EC-EF, pour différentes valeurs de densité de courant en fonction du temps (pH=7,59, conductivité = 2,72 mS/cm<sup>2</sup>).

### III.3.1.2 Evolution de la conductivité de l'effluent

La figure III.13 présente l'évolution de la conductivité de l'effluent en fonction du temps de traitement EC-EF. Nous constatons que la variation de la conductivité de la solution n'est pas significative, elle reste toujours au voisinage de 2 mS/cm<sup>2</sup>. Ce comportement se manifeste quel que soit le niveau de courant utilisé.



**Figure III.13** : Evolution de la conductivité au cours de traitement EC-EF, pour différentes valeurs de densité de courant en fonction du temps (pH=7,59, conductivité = 2,72 mS/cm<sup>2</sup>).

### III.3.2 Influence des paramètres de fonctionnement sur l'efficacité de traitement

#### III.3.2.1 Influence de la densité de courant et du temps de traitement de l'EC-EF

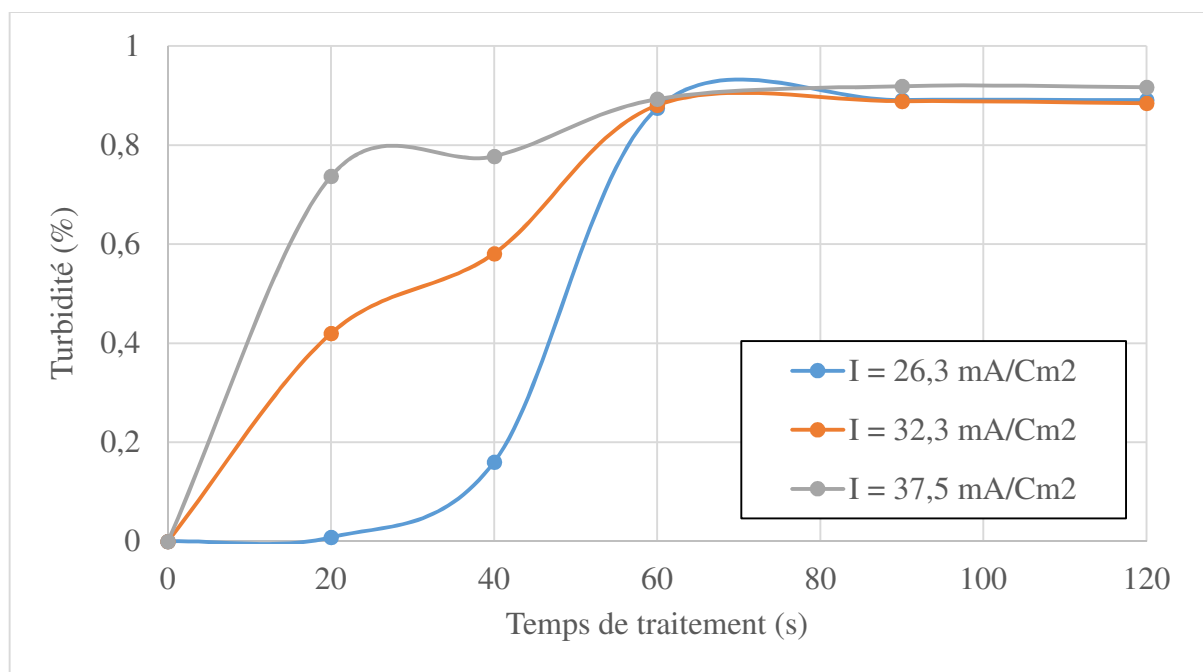
La densité du courant est un paramètre critique qui peut influencer l'efficacité du traitement d'EC-EF, car c'est le seul paramètre opératoire qui peut être directement contrôlé. Elle permet de déterminer la dose de coagulant produite aux électrodes, l'évolution de l'oxygène, la production de chaleur et ajuster le taux et la taille des bulles produites dans le réacteur, et donc elle régit la performance du procédé et les coûts d'exploitation.

En effet, si le courant est trop faible, une faible quantité d'hydroxydes sera produite, une faible quantité d'hydrogène sera dégagée à la cathode et le temps de résidence de l'effluent dans le réacteur devra être plus long afin d'obtenir une bonne qualité de l'eau traitée. Dans le cas contraire, un courant plus élevé provoquera une augmentation de la vitesse de réaction, mais dans ce cas, les électrodes seront attaquées plus rapidement, entraînant une consommation plus rapide des électrodes et une dépense énergétique plus importante.

Afin d'étudier l'influence de ce paramètre, l'abattement de la turbidité et les MES a été suivi pendant différents temps de traitements et ce à un pH de 7.59, conductivité = 2,72 mS/cm et pour différentes densités de courant (Figure III.14 et Figure III.15).

- **Abattement de la turbidité**

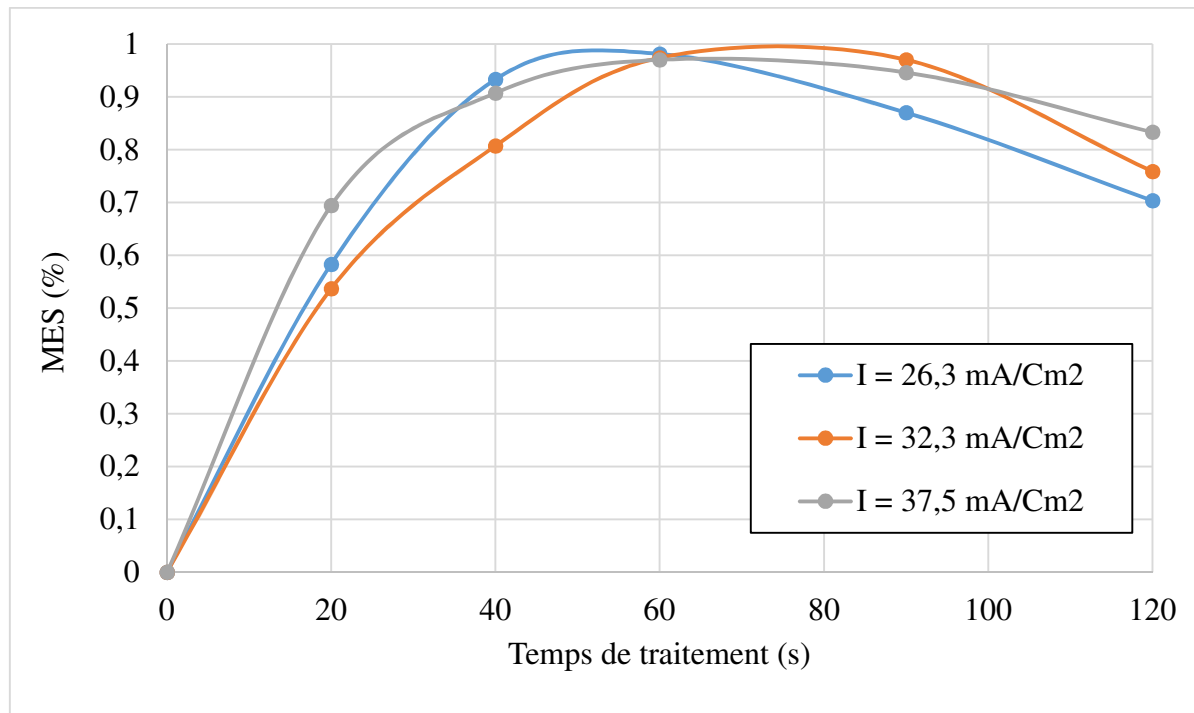
A l'examen de figure III.14, il apparaît que le taux d'élimination de turbidité augmentent avec l'augmentation de la densité de courant. Ainsi, le temps d'électrolyse est d'autant plus court que la densité de courant est élevée, ce qui est en accord avec la loi de Faraday qui montre que la quantité d'aluminium dissoute électrochimiquement de la cathode pour un temps de traitement donné est proportionnelle à l'intensité de courant imposé. Pour un temps de traitement supérieur à 60 minutes, l'efficacité d'abattement de la turbidité se stabilise en fonction du temps à une valeur d'environ 88% indépendamment de la densité de courant. C'est-à-dire que l'augmentation de la densité n'a plus d'effet sur l'efficacité du traitement. Ceci peut être probablement dû à la saturation en ions  $Fe^{2+}$  et  $Fe^{3+}$  libérés par l'électrode et la formation de nouveaux floes.



**Figure III.14** : Evolution de la turbidité au cours de traitement EC-EF, pour différentes valeurs de densité de courant en fonction du temps (pH=7,59, conductivité = 2,72 mS/cm<sup>2</sup>).

#### ▪ Abattement de MES

La figure III.15 montre que l'abattement de la matière en suspension augmente progressivement avec le temps puis baisse après 60 minutes de traitement. Cette diminution est probablement attribuée à l'accumulation de la boue produite à la surface de la cellule électrochimique résultant en une diminution de l'efficacité d'abattement de MES.

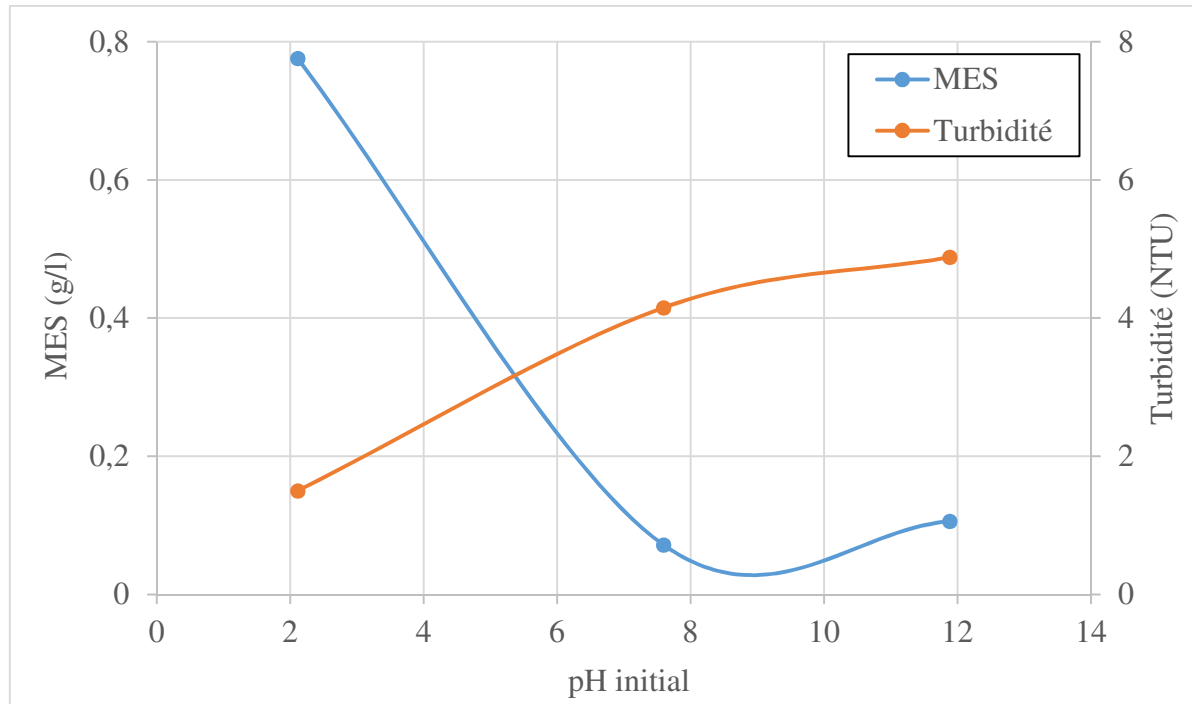


**Figure III.15** : Evolution du MES au cours de traitement EC-EF, pour différentes valeurs de densité de courant en fonction du temps (pH=7,59, conductivité = 2,72 mS/cm<sup>2</sup>).

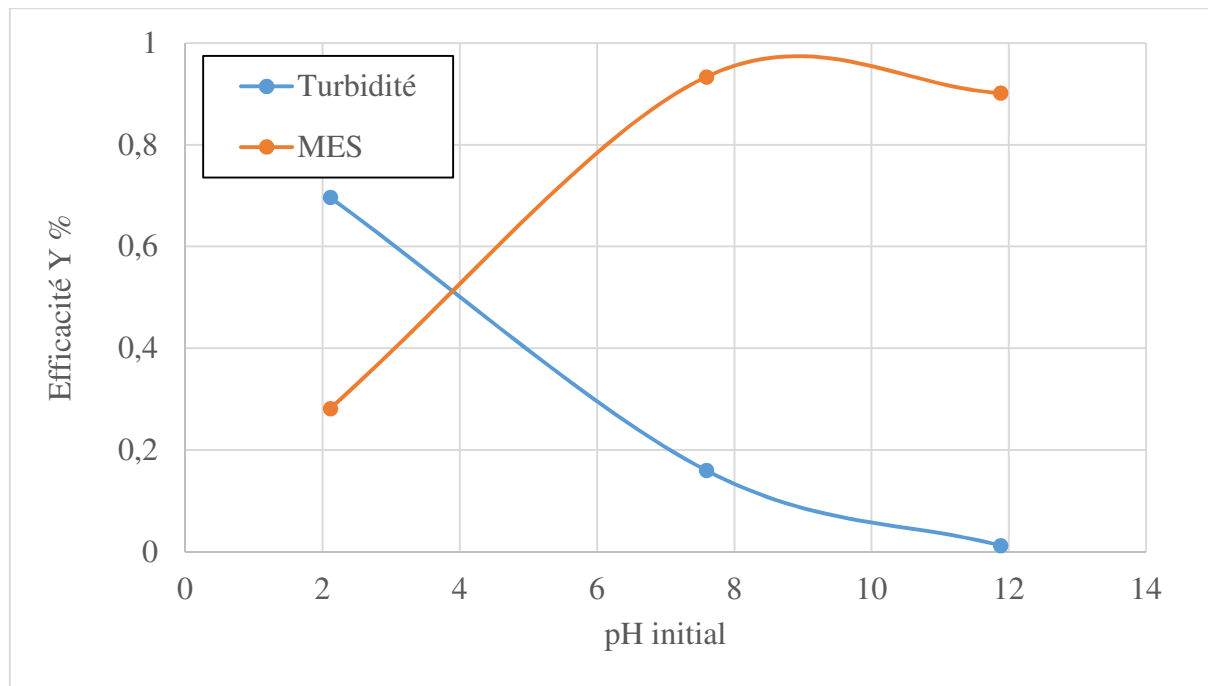
### III.3.2.2 Influence du pH initial

Le pH initial est connu comme l'un des principaux facteurs qui contrôlent la performance de l'EC et EF. Il détermine la spéciation des ions et solutés en solution, la solubilité des produits formés, la formation et la taille des bulles d'hydrogène ainsi que la distribution des ions métalliques lors d'application de potentiel ou de courant en EC-EF. Pour démontrer son effet sur le rendement du traitement, le pH de l'effluent est ajusté entre 2,11 et 11,88. Le temps de traitement électrochimique est fixé à 40 minutes avec une densité de courant  $I = 26,3 \text{ mA/cm}^2$  et une conductivité initiale 2.72 mS/cm.

Les figures III.16 et III.17, illustrent l'influence du pH initial sur l'efficacité d'abattement de la turbidité et les MES après 40 min du traitement (conductivité = 2,72 mS/cm, densité de courant  $I = 26,3 \text{ mA/cm}^2$ ). En effet, la valeur de pH initial optimal assurant une meilleure efficacité d'élimination de la turbidité et les MES a été constatée à pH proche de la neutralité (pH = 7.59). Ces résultats sont en accord avec de nombreuses études antérieures relatives au traitement par EC et EF en utilisant des électrodes [78]. Lorsque le pH initial tend vers des valeurs acide ou basique, les rendements d'enlèvement de la pollution diminuent, cela est attribué au caractère amphotère de l'hydroxyde de Fer qui précipite à un pH de 6-7 et dont sa solubilité augmente quand la solution devient soit plus acide ou plus alcaline [79]. Par conséquent, les floccs d'hydroxyde de Fer sont moins réactifs et la coagulation-flottation est moins efficace.



**Figure III.16 :** Influence du pH initial sur l'abattement de la turbidité et les MES après 40 min du traitement (conductivité = 2,72 mS/cm, densité de courant  $I = 26,3 \text{ mA/cm}^2$ ).



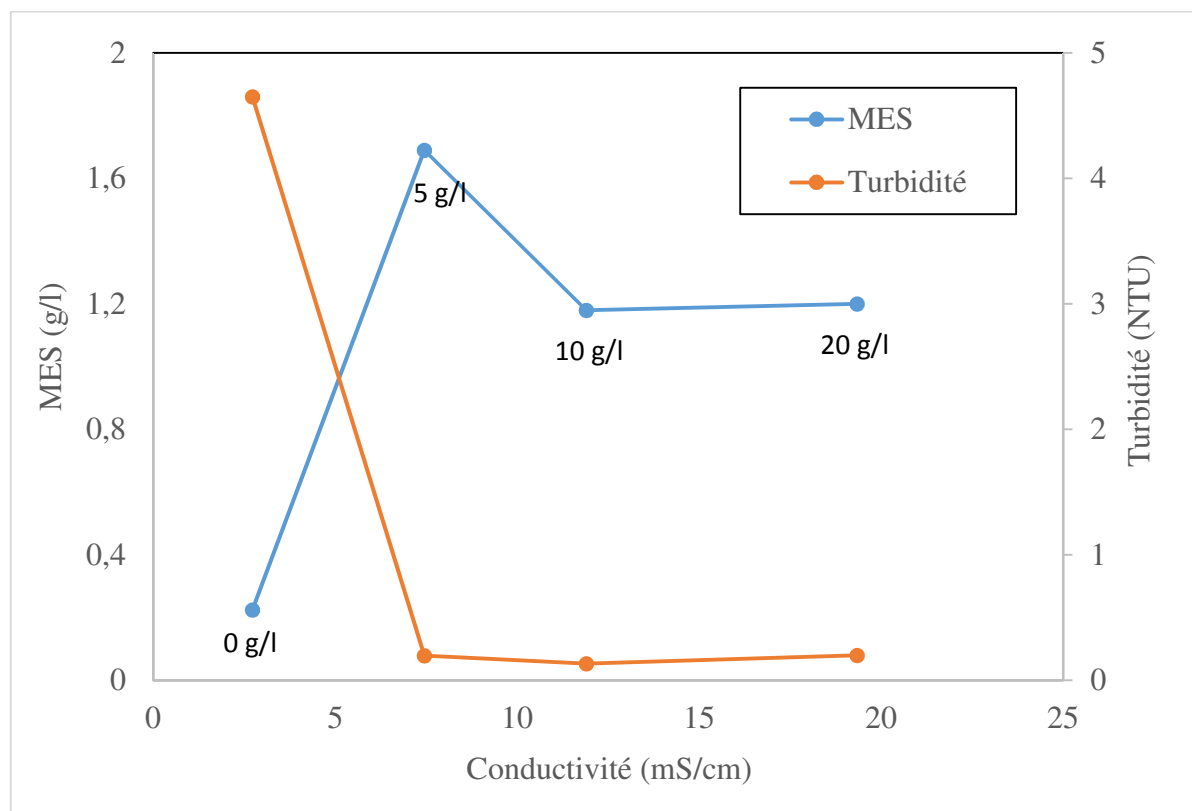
**Figure III.17 :** Influence du pH initial sur l'efficacité d'abattement de la turbidité et de MES après 40 min du traitement (conductivité = 2,72 mS/cm, densité de courant  $I = 26,3 \text{ mA/cm}^2$ ).

### III.3.2.3 Influence de la conductivité de l'effluent

Les inconvénients majeurs de l'électrocoagulation concernent principalement la conductivité souvent faible de l'eau polluée et la formation des dépôts sur les électrodes. En effet, la conductivité de l'effluent doit être suffisante pour permettre le passage du courant sans

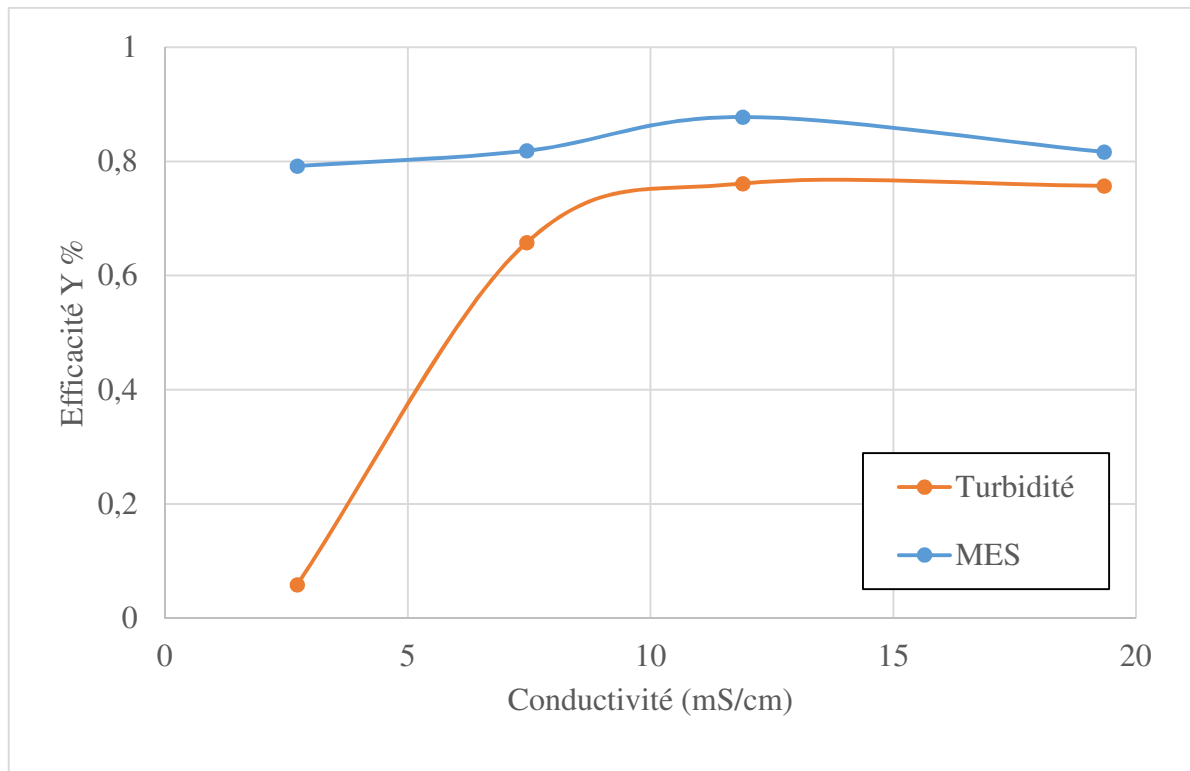
consommation excessive d'électricité. Lorsque la conductivité de l'eau polluée est trop faible, un rajout du chlorure de sodium est généralement nécessaire. La présence de certains ions tels que les chlorures réduire la tension  $U$  entre les électrodes à une densité de courant constante, en raison de la diminution de la résistance de l'eau polluée. La consommation énergétique, qui est proportionnelle à la tension appliquée entre électrodes, devrait donc diminuer.

Les figures III.18 et III.19 montre l'effet de la concentration de NaCl sur l'abattement de la turbidité et les MES après 30 minutes de traitement pour  $\text{pH}$  initial = 7,59 et densité de courant  $I = 26,3 \text{ mA/cm}^2$ .



**Figure III.18** : Influence de la conductivité sur l'abattement de la turbidité et les MES après 30 minutes de traitement EC-EF ( $\text{pH}$  initial = 7,59, densité de courant  $I = 26,3 \text{ mA/cm}^2$ ).

Les rendements d'élimination de la turbidité et les MES augmentent avec l'augmentation de la concentration d'électrolyte dans la gamme de concentration de 0 à 5 g/l. Lorsque la concentration de NaCl dépasse 5 g/l, l'efficacité d'élimination de MES la turbidité et les MES varie légèrement. L'effet de NaCl pourra s'expliquer par la vitesse de dissolution plus élevée des électrodes [80]. Les résultats expérimentaux montrent que les rendements d'éliminations maximales ont été observés pour la concentration de 10 g/l de NaCl.

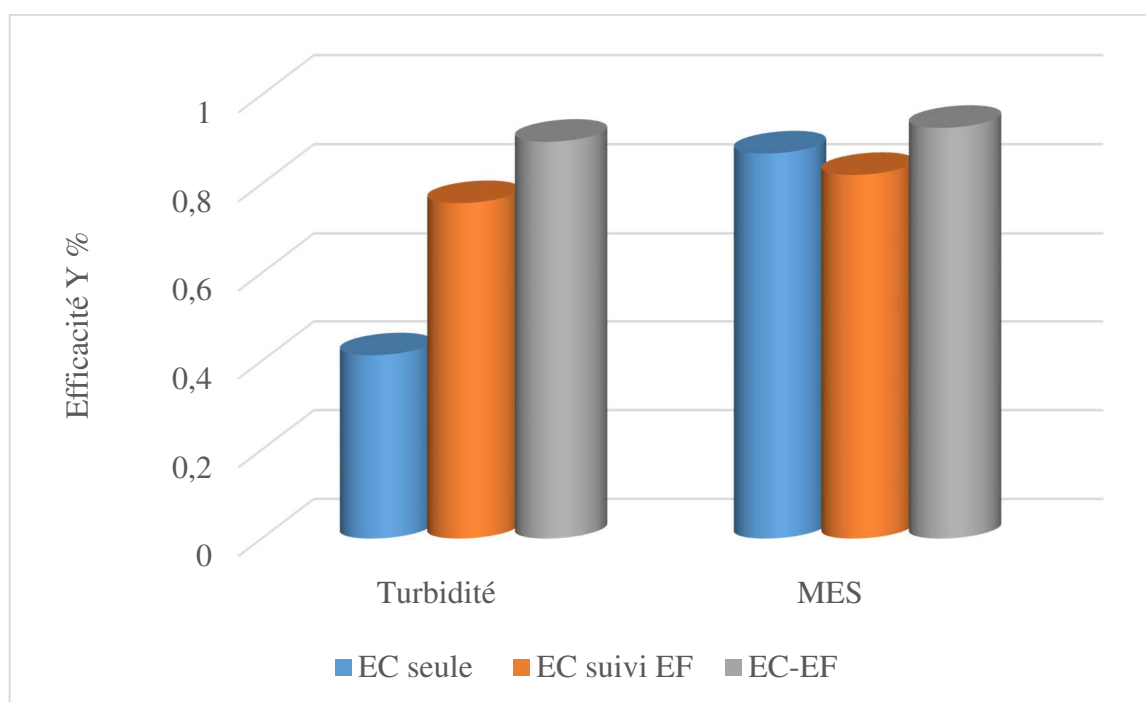


**Figure III.19** : Influence de la conductivité sur l'efficacité d'abattement de la turbidité et les MES après 30 minutes de traitement EC-EF (pH initial = 7,59, densité de courant  $I = 26,3 \text{ mA/cm}^2$ ).

#### III.3.2.4 Influence de mode de fonctionnement

La figure III.20 démontre les résultats de l'abattement de la turbidité et les MES en fonction du type de traitement appliqué. Trois types de traitements ont été respectivement appliqués : i) Traitement par EC seule; ii) Traitement par EC suivi de EF; iii) Traitement par EC/EF. Une densité de courant de  $26,3 \text{ mA/cm}$  a été respectivement appliquée pour les trois traitements pendant 60 min.

Suite au traitement électrolytique une efficacité d'abattement de la turbidité et de MES de 41% et 86% respectivement a été enregistrée pour EC seule, alors que des efficacités d'abattement de 75 % et 82% ont été respectivement enregistrées pour EC suivi de EF. La combinaison EC-EP est plus efficace pour la minéralisation de la matière organique. Le procédé EC-EF conduit à une minéralisation plus poussée de la turbidité (89 %) et de MES (92 % d'enlèvement du MES) comparativement aux procédés EC seule et EC suivi de EF. Cela est probablement dû à la forte production des radicaux libres, le taux élevé de production des bulles d'hydrogène et leur fine taille dans le cas de la combinaison des procédés EC-EF.



**Figure III.20** : Influence de la technique de traitement électrochimique sur l'abatement de la turbidité en fonction du temps (pH initial = 7,59, conductivité = 2,72 mS/cm et densité de courant  $I = 26,3 \text{ mA/cm}^2$ ).

### III.3.3 Masse dissoute de l'anode

La masse dissoute maximale théorique qui se produit pendant le processus d'EC à partir de l'anode sacrificielle pour un flux de courant électrique spécifique dans une cellule électrolytique a été calculée en utilisant la loi de Faraday (Equation II.1). Dans cette étude, on a basé sur la mesure directe au début et après l'expérience afin de déterminer la consommation de matériau des électrodes à l'aide d'une balance analytique, et la masse dissoute  $m$  sera la différence entre les deux valeurs (Figure III.21). La consommation des électrodes après les trois traitements appliqués est reportée dans le tableau III.4.

**Tableau III.4** : Masse dissoute de l'anode.

Masse avant l'expérience (g)	Masse théorique (g) après 60 minutes de traitement « loi de Faraday »	Masse après l'expérience (g)		
		Traitement par EC seule	Traitement par EC suivi d'EF	Traitement par EC-EF
29,619	$29,619 - 4,432 = 25,184$	24,015	24,315	24,939

En considérant un temps de traitement de 30 minutes et une intensité de courant de 3,5 A, la quantité théorique d'électrode consommée est de 4.432 g. Alors que les résultats expérimentales montrent que les pertes de masse à la cathode pendant les trois traitements sont constantes et de

l'ordre de 5,076 g. cette différence est principalement due aux valeurs élevée de conductivité et intensité de courant.



**Figure III.21** : Evolution de la forme de l'anode après l'expérience.

# **Conclusion générale**

## **Conclusions générales et perspectives**

Dans cette étude, un processus combiné d'électrocoagulation et d'électroflottation a été utilisé pour le traitement d'un effluent laitier. Dans un tel processus, l'électrocoagulation joue principalement le rôle de déstabiliser et d'agréger les particules fines, et l'électroflottation est responsable de la flottation des floes formés dans l'effluent de l'unité d'électrocoagulation. Différents paramètres de fonctionnement ont été étudiés tel que : la densité du courant (26,3 à 37,5 mA/cm<sup>2</sup>), le temps du traitement, le pH et de la conductivité initiale de l'effluent. L'efficacité de traitement a été déterminée en analysant la turbidité et les matières en suspension (MES).

Les résultats obtenus dans cette étude suggèrent que cette combinaison est un procédé fiable pour le traitement des effluents laitiers. On peut conclure que le traitement de l'effluent laitier par EC-EF est efficace sur la base des éléments suivants :

- Dans les mêmes conditions de fonctionnement, le procédé EC-EF conduit à une minéralisation plus poussée de la turbidité et d'enlèvement du MES (89 % et 92 %) comparativement aux procédés EC seule (41% et 86%) et EC suivi de EF (75 % et 82%).

- La valeur de pH initial proche de la neutralité (pH = 7.59) assurant une meilleure efficacité d'élimination de la turbidité et des MES.

- La conductivité initiale de l'effluent n'affectent pas de manière significative l'efficacité de l'élimination de la turbidité et des MES.

- La densité de courant et le temps de traitement sont les paramètres opérationnels les plus importants pour l'efficacité du traitement. L'élimination de la turbidité et des MES augmente avec la densité de courant et le temps de traitement jusqu'à 37,5 mA/cm<sup>2</sup> et 1 h, respectivement.

En somme, ce travail constitue une première étape dans l'élaboration et le développement de procédés hybrides combinant l'électrocoagulation l'électroflottation pour le traitement d'un effluent laitier.

À la fin de cette étude nous pensons que d'autres travaux peuvent être envisagés :

- Une étude complémentaire de consommation énergétique et de coût d'exploitation pour mettre en valeur cette méthode de traitement.

- Une étude cinétique afin d'élaborer des modèles mathématiques de ces processus dans le but d'automatiser ce procédé de traitement si l'on souhaite leur application en milieu industriel.

# **Bibliographie**

- [1] Edeline, F. (1992). L'épuration physico-chimique des eaux (2nd ed.). Cebedoc, Lavoisier TEC et DOC, Paris.
- [2] Moletta, R., & Torrijos, M. (1999). Traitement des effluents de la filière laitière (Techniques de l'Ingénieur, F1501).
- [3] Yahiaoui, K. (2015). Modélisation et optimisation multi-objectifs du traitement des eaux usées de la station d'épuration de la ville de Guelma par électrocoagulation (Master's thesis, Université 8 mai 1945, Guelma).
- [4] Ayral, C. (2009). Elimination de polluants aromatiques par oxydation catalytique sur charbon actif (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier Toulouse).
- [5] Mayet, J. (1994). La pratique de l'eau, Traitements aux points d'utilisation (2nd ed.). Le Moniteur.
- [6] Vaillant, J. R. (1974). Perfectionnement et nouveautés pour l'épuration des eaux résiduaires: eaux usées urbaines et eaux résiduaires industrielles. Eyrolles, Paris.
- [7] Tabet, M. (2014). Etude physico-chimique et microbiologique des eaux usées et évaluation du traitement d'épuration (Doctoral dissertation).
- [8] Snappe, J.-J., Lepoudere, A., & Sredzinski, N. (2010). Protéines Laitières (F4820).
- [9] Douag-Tirichine, N. (2010). Extraction et caractérisation de quelques plantes locales à pouvoit coagulant le lait (Magister's thesis, Ecole Nationale Polytechnique).
- [10] Espagne. (2002). Prévention de la pollution de l'industrie laitière, plan d'action pour la méditerranée, Centre d'activité régionale pour la production propre.
- [11] Ayeche, R., & Balaska, A. (2010). Caractérisation et traitement par coagulation-floculation d'un effluent de laiterie. *Journal de la Société Algérienne de Chimie*, 20(2), 83-93.
- [12] Yah, H., Madi, N., & Midoune, K. (2013). Contribution au traitement d'effluents laitiers par bioréacteur séquentiel. *Revue scientifique et technique*, 21(22).
- [13] Park, J. V. (2000). *Surimi and Surimi Seafood*. Marcel Dekker, Taylor and Francis, New York, NY.
- [14] ElBestawy, E., Hussein, H., Baghdadi, H., & ElSaka, M. F. (2005). Comparison between biological and chemical treatment of wastewater containing nitrogen and phosphorus. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 32(5), 195-203.
- [15] Zhang, S., Qu, Y., Liu, Y., Yang, F., Zhang, X., Furukawa, K., & Yamada, Y. (2005). Experimental study of domestic sewage treatment with a metal membrane bioreactor. *Desalination*, 177, 83-93.
- [16] Metcalf & Eddy Inc. (2003). *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse* (4th ed.). McGraw-Hill, New York, NY.
- [17] Ruiz, I., Álvarez, J. A., Diaz, M. A., Serrano, L., & Soto, M. (2008). Municipal wastewater treatment in an anaerobic digester-constructed wetland system. *Environmental Technology*, 29, 1249-1256.
- [18] Verstraete, W. (2004). *European Symposium on Environmental Biotechnology, ESEB*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- [19] Wang, A., Qu, J., Ru, J., Liu, H., & Ge, J. (2005). Mineralization of an azo dye acid Red 14 by electro-Fenton's reagent using an activated carbon fiber cathode. *Dyes and Pigments*, 65(3), 227-233.

- [20] Desjardins, R. (1990). *Le Traitement des Eaux* (1st ed.). École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC, Canada.
- [21] Crini, G., & Badot, P. M. (2007). *Traitement et Épuration des Eaux Industrielles Polluées: Procédés Membranaires, Bioadsorption et Oxydation Chimique*. Presses Universitaires de Franche-Comté, Besançon, France.
- [22] Blst'akova, A., Bodik, I., Dancova, L., & Jakubcova, Z. (2009). Domestic wastewater treatment with membrane filtration - two years' experience. *Desalination*, 240, 160-169.
- [23] Feng, C., Sugiura, N., Shimada, S., & Maekawa, T. (2003). Development of a high performance electrochemical wastewater treatment system. *Journal of Hazardous Materials*, 103(1-2), 65-78.
- [24] Cenkin, V. E., & Belevstev, A. N. (1985). Electrochemical treatment of industrial wastewater. *Effluent & Water Treatment Journal*, 25, 243-247.
- [25] Lemlikchi, W. (2012). *Élimination de la pollution des eaux industrielles par différents procédés d'oxydation et de co-précipitation* (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou).
- [26] Tir, M. (2009). *Utilisation des techniques électrochimiques dans le traitement des émulsions hydrocarbures/eau* (Doctoral dissertation, Université M'hamed Bougera Boumerdès).
- [27] Mollah, M. Y. A., Schennach, R., Parga, J. R., & Cocke, D. L. (2001). Electrocoagulation (EC)—science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 84(1), 29-41.
- [28] Holt, P. K. (2002). *Electrocoagulation: unraveling and synthesizing the mechanisms behind a water treatment process* (PhD dissertation, Université de Sydney, Australia).
- [29] Belhous, S. A. (2012). *Déphosphatation des eaux par procédés électrochimiques et chimiques* (Magister's thesis, Ecole Nationale Polytechnique).
- [30] Picard, T. (2000). *Contribution à l'étude des réactions aux électrodes en vue de l'application à l'électrocoagulation* (PhD dissertation, Université de Limoges, Limoges, France).
- [31] Demim, S. (2007). *Traitement de l'ultrafiltrat de margine par combinaison de l'électrocoagulation et de la boue activée* (Magister's thesis, ENP, Alger).
- [32] Bouhzila, F., Hariti, M., Lounici, H., & Mameri, N. (2011). Treatment of the OUED SMAR town landfill leachate by an electrochemical reactor. *Desalination*, 280, 347-353.
- [33] Tsai, C. T., Lin, S. T., Shue, Y. C., & Su, P. L. (1997). Electrolysis of soluble organic matter in leachate from landfills. *Water Research*, 31, 3073-3081.
- [34] Li, X., Song, J., Guo, J., Wang, Z., & Feng, Q. (2011). Landfill leachate treatment using electrocoagulation. *Procedia Environmental Sciences*, 10, 1159-1164.
- [35] Yu, M. J., Koo, J. S., Myung, G. N., Cho, Y. K., & Cho, Y. M. (2005). Evaluation of bipolar electrocoagulation applied to biofiltration for phosphorus removal. *Water Science & Technology*, 51(10), 231-239.
- [36] Belkacemi, M. (1993). *Contribution à l'étude des interactions dans le système déchets-sol-eau (cas de la décharge d'Oued-Smar)* (Magister's thesis, E.N.P).
- [37] Holt, P. K., Barton, G. W., & Mitchell, C. A. (2005). The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology. *Chemosphere*, 59(3), 355-367.

- [38] Asselin, M. (2007). Utilisation de l'EC dans le traitement des eaux usées industrielles chargées en matières organiques (Master's thesis, INRS-ETE, Université du Québec, Québec, QC, Canada).
- [39] Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 38, 11-41.
- [40] Chen, X., Chen, G., & Yue, P. L. (2000). Electrocoagulation and electroflotation of restaurant wastewater. *Journal of Environmental Engineering*, 126, 858-863.
- [41] Daneshvar, N., Oladegaragoze, A., & Djafarzadeh, N. (2006). Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation: An investigation of the effect of operational parameters. *Journal of Hazardous Materials*, 129(1-3), 116-122.
- [42] Sanchez-Calvo, L., Leclerc, J. P., Tanguy, G., Cames, M. C., Paternotte, G., Valentin, G., Rostan, A., & Lopicque, F. (2003). An electrocoagulation unit for the purification of soluble oil wastes of high COD. *Environmental Progress*, 22(1), 57-65.
- [43] Cames, M. C., Tanguy, G., Leclerc, J. P., Sanchez-Calvo, L., Valentin, G., Rostan, A., Muller, P., & Lopicque, P. (2001). Design rules of a pilot cell for treatment of concentrated liquid wastes by electrocoagulation-electroflotation. 6th World Congress of Chemical Engineering, Melbourne, Australia, pp. 23-27.
- [44] Adhoum, N., & Monser, L. (2004). Decolourization and removal of phenolic compounds from olive mill wastewater by electrocoagulation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 43, 1281-1287.
- [45] Vik, E. A., Carlson, D. A., Eikum, A. S., & Gjessing, E. T. (1984). Electrocoagulation of potable water. *Water Research*, 18, 1355-1360.
- [46] Qiu, M., & Kul'skii, L. A. (1988). Water Purification by Electrocoagulation. In: P. P. Strokach, V. A. Slipchenko, & E. I. Saigak (Eds.), Shanghai Jiaotong University Press (Chinese Translation from Russian of the book, Kiev, Budivel'nik, 1978).
- [47] Pazenko, T. Y., Khalturina, T. I., Kolova, A. F., & Rubailo, I. S. (1985). Electrocoagulation treatment of oil-containing wastewaters. *Journal of Applied Chemistry of the USSR*, 58(11-12), 2383-2387.
- [48] Abdel-Gawad, S. A., et al. (2012). Removal of some pesticides from the simulated wastewater by electrocoagulation method using iron electrodes. *International Journal of Electrochemical Science*, 7, 6654-6665.
- [49] Cloudhary, A., & Mathur, S. (2016). Performance evaluation of non-rotating and rotating anode reactor in electro coagulation process. International Conference on Advanced Material Technologies (ICAMT), Dadi Institute of Engineering and Technology (DIET), Visakhapatnam, Andhra Pradesh, India.
- [50] Bazrafshan, E., Mohammadi, L., Ansari-Moghaddam, A., & Mahvi, A. H. (2015). Heavy metals removal from aqueous environments by electrocoagulation process-a systematic review. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 13, 74.
- [51] Tezcan, U., Koparal, A. S., & Ogutveren, U. B. (2009). Electrocoagulation of vegetable oil refinery wastewater using aluminum electrodes. *Journal of Environmental Management*, 90, 428-433.
- [52] Jiang, J. Q., Graham, N., André, C., Kelsall, G. H., & Brandon, N. (2002). Laboratory study of electro-coagulation-flotation for water treatment. *Water Research*, 36, 4064-4078.

- [53] Kobyas, M., Can, O. T., & Bayramoglu, M. (2003). Treatment of textile wastewater by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 100(1-3), 163-178.
- [54] Golder, A. K., Hridaya, N., Samanta, A. N., & Ray, S. (2005). Electrocoagulation of methylene blue and eosin yellowish using mild steel electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 127(1-3), 134-140.
- [55] Chen, L., Lai, S. H., & Lin, H. (2003). Electrocoagulation of chemical mechanical polishing (CMP) wastewater from semiconductor fabrication. *Chemical Engineering Journal*, 95(1-3), 205-211.
- [56] Drouiche, N. (2010). Traitement des effluents issus du traitement de surface des plaquettes de silicium par réacteurs électrochimiques (Doctoral dissertation, Ecole Nationale Polytechnique).
- [57] Larue, O., Vorobiev, E., Vu, C., & Durand, B. (2003). Electrocoagulation and coagulation by iron of latex in aqueous suspensions. *Separation and Purification Technology*, 31(2), 177-192.
- [58] Burns, S. E., Yiacoumi, S., & Tsouris, C. (1997). Microbubble generation for environmental and industrial separations. *Separation and Purification Technology*, 11, 221-232.
- [59] Ho, C. C., & Chan, C. Y. (1986). The application of lead dioxide-coated titanium anode in the electroflotation of palm oil mill effluent. *Water Research*, 20, 1523-1527.
- [60] Hosny, A. Y. (1992). Separation of oil from oil-water emulsions using an electroflotation cell with insoluble electrodes. *Filtration and Separation Journal*, 29(5), 419-423.
- [61] Gardais, D. (1990). Les procédés électriques de traitement des rejets industriels. In: *Environnement et Électricité*, Electra, Doppee Diffusion, Avoa, France, 300-320.
- [62] Tourbin, M., Lachaize, S. P., & Guiraud, P. (2012). Nanoparticules polluant les milieux liquides: quels procédés pour les éliminer? *Techniques de l'ingénieur l'expertise technique et scientifique de référence*, réf 215.
- [63] Fouletier, M., & Mathieu, J. B. (1980). *Les Applications de l'électrochimie à l'hydroméallurgie*. Edition Pluralis.
- [64] Khosla, N. K., Venkatachalam, S., & Somasundaraq, P. (1991). Pulsed electrogeneration of bubbles for electroflotation. *Journal of Applied Electrochemistry*, 21, 986-990.
- [65] Brandon, N. P., & Kelsall, G. H. (1985). Growth kinetics of bubbles electrogenerated at microelectrodes. *Journal of Applied Electrochemistry*, 15, 475-484.
- [66] Ketkar, D. R., Mallikarjunan, R., & Venkatachalam, S. (1991). Electroflotation of quartz fines. *International Journal of Mineral Processing*, 31(1-2), 127-138.
- [67] Ahmed, N., & Jameson, G. J. (1985). The effect of bubble size on the rate of flotation of fine particles. *International Journal of Mineral Processing*, 14, 195-215.
- [68] Barbery, G. (1981). Flottation: machines et circuits, *Exploitation. Techniques de l'ingénieur*, A 5360, 1-16.
- [69] E.C BECK, A. O Giannini et E. R. Ramirez. (1974). Electrocoagulation clarifies food. *Wastewater, food, technol*, 28(2).

- [70] Tchamango, S., Nanseu-Njiki, C. P., Ngameni, E., Hadjiev, D., Darchen.A(2010). Treatment of Dairy Effluents by Electrocoagulation Using Aluminium Electrodes. *Sci. Total Environ* 408(4), 947–952.
- [71] Leal, M. C., Freire, D. M. G., Cammarota, M. C., Sant'Anna, G. L., Jr. (2006) Effect of Enzymatic Hydrolysis on Anaerobic Treatment of Dairy Wastewater. *Process Biochem.* 41 (5), 1173–1178.
- [72] Tchamango, SR, WandjiNgayo, K., BelibiBelibi, PD, Nkouam, F., Ngassoum, MB (2020). Treatment of a dairy effluent by classical electrocoagulation and indirect electrocoagulation with aluminum. *Separation Science and Technology*. 1-12.
- [73] A. Alinsafi, M. Khemis, M.N. Pons, J.P. Leclerc, A. Yaacoubi, A. Benhammou, A. Nejmeddine, (2005). Electro-coagulation of reactive textile dyes and textile wastewater, *Chem. Eng. Process*, 44, 461–470.
- [74] M. Kobya, O.T. Can, M. Bayramoglu (2003). Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes, *J. Hazard. Mater.* 100, 163–178.
- [75] M. Bayramoglu, M. Eyvaz, M. Kobya(2007). Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation: economical evaluation, *Chem. Eng. J.*, 128, 155–161.
- [76] W. Chu, S.M. Tsui, (2002). Modeling of photodecoloration of azo dye in a cocktail photolysis system. *Water Res.* 36, 3350–3358.
- [77] Hu, C.Y., Lo, S.L., Kuan, W.H., Lee, Y.D. (2008) .Treatment of high fluoride-content wastewater by continuous electrocoagulation-flotation system with bipolar aluminum electrodes. *Sci. Purif. Tech*
- [78] F. Ay, E.C. Catalkaya, F. Kargi(2009). A statistical experiment design approach for advanced oxidation of Direct Red azo-dye by photo-Fenton treatment, *Journal of Hazardous Materials*. 162, 230–236
- [80] K. Bensadok, S. Benammar, F. Lopicque, G. Nezzala(2008). Electrocoagulation of cutting oil emulsions using aluminium plate electrodes, *Journal of Hazardous Materials*. 152 (1-21), 423–430.
- [81] M. D. Troag, (1999). Mise au point du fonctionnement d'un réacteur pilote À anode en lit fluidisé pour les traitements des effluents industriels par oxydation électrochimique, *Maîtrise en études de l'environnement, Université de Moncton*.