

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A. M. OULHADJ - Bouira  
Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées  
Département de Génie des Procédés  
Laboratoire Génie des Procédés



# Mémoire

Présenté par

**HAMALI Samiha**  
**MESRANE Khawla**

Pour l'obtention du diplôme de

## MASTER

**Filière** : Sciences et Génie de L'environnement  
**Spécialité** : Génie de l'Environnement

**Etude bibliographique sur l'élimination des phosphates de lait par électrocoagulation**

A présenter le 14 /12 / 2020

Devant le jury composé de :

Mme CHACHOU.L	MCB	USTHB	Examinatrice
Mme MANSOURI.L	MAA	Bouira	Examinatrice
Mme EL HANAFI	MCB	Bouira	Encadrant

## **Résumé**

Les industries agroalimentaires génèrent énormes de volumes d'effluents, particulièrement l'industrie laitière est la plus préoccupante, ce qui peut entraîner plusieurs problèmes graves tels que la pollution des eaux de surface et souterraines. Dans le but de répondre aux besoins de ces industries en matière de traitement de leurs eaux usées, des procédés de dépollution par voie biologique, physico-chimique et électrochimique occupent une place prédominante dans le traitement des effluents laitière. Cette étude a pris pour objectif de déterminer l'efficacité du traitement des eaux résiduaires d'une laiterie industrielle en employant un procédé électrochimique l'électrocoagulation (EC) pour l'élimination de tels types de polluants. Différents paramètres peuvent affecter les performances du procédé de l'EC tel que le pH initial, la densité du courant, la conductivité, temps d'électrolyse.... D'après les études faites par plusieurs auteurs sur divers types d'effluents suggèrent que le traitement par électrocoagulation donne des bons résultats en matière d'abattement des paramètres de pollution, la synthèse bibliographique que nous avons réalisée prouve que le procédé d'électrocoagulation est applicable pour éliminer pratiquement 100% des phosphates provenant des rejets laitiers en utilisant des électrodes en aluminium ou en fer. De tels procédés se caractérisent par un fonctionnement facile, un équipement simple, un temps de fonctionnement court et bonne qualité de traitement.

## **Mots clés**

Effluents laitier, Phosphate, Pollution, Traitement des eaux, Electrocoagulation.

## **Abstract**

Agri-food industries generate huge volumes of effluents; particularly the dairy industry is the most worrying, which can lead to several serious problems such as surface and ground water pollution. In order to meet the wastewater treatment needs of these industries, biological, physico-chemical and electrochemical wastewater treatment processes are predominant in the treatment of dairy effluents. The objective of this study was to determine the efficiency of wastewater treatment in an industrial dairy plant using an electrochemical process called electrocoagulation (EC) for the elimination of such types of pollutants. Different parameters can affect the performance of the EC process such as initial pH, current density, conductivity, electrolysis time.... According to the studies made by several authors on various types of effluents suggest that electrocoagulation treatment gives good results in terms of pollution parameter abatement, the literature review we have carried out proves that the electrocoagulation process is applicable to remove practically 100% of the phosphates from dairy waste using aluminium or iron electrodes. Such processes are characterized by easy operation, simple equipment, short operating time and good treatment quality.

## **Keywords**

Dairy effluent; Phosphate; Pollution; Water treatment; Electrocoagulation.

# Remerciements

*Tout d'abord nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné la volonté, la santé et le courage pour accomplir ce travail.*

*Nous tenons particulièrement à remercier et exprimer notre parfaite gratitude à Madame EL HANAFI Nawal, Maitre de conférences à l'UAMOB d'avoir été la directrice de ce mémoire, pour son encadrement, son aide précieuse, tous ses efforts, pour les conseils qu'elle nous a apportés pendant notre travail par sa gentillesse, sa générosité et ses encouragements.*

*Nos profondes gratitudes s'adressent également à Madame MANSOURI.L, Maitre Assistant à l'UAMOB de nous avoir fait l'honneur d'examiner ce travail.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à Madame CHACHOU.L, Maitre de Conférences à l'USTHB qui a bien voulu accepter d'être l'examinatrice de ce travail.*

*Nos sincères remerciements vont également à tous les enseignants de notre faculté.*

*Nous ne pourrions terminer ces remerciements sans y associer les membres de nos familles, qui nous ont toujours apporté leur soutien et leur appui afin d'arriver au terme de ce travail.*

# DEDICACE

*Je dédie ce travail*

*A ma chère mère Malika*

*A mon père Djamel*

*A mes frères Daoud & Mazigh*

*A toute ma famille*

*A mes Amies chacun par son nom*

*A tous ceux qui me sont chers.*

***Samaha HAMALI***

# DEDICACE

*Que ce travail témoigne de mes respects :*

- **A mes chers parents** : *Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études. Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux. Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.*
- **A ma grande sœur Donia.**
- **A mes frères Amine, Bilal, Houssam.**
- **A tous mes amis spécialement le groupe de GE.**
- **A mes chers cousines et cousins.**
- **Aux personnes** *qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études supérieures.*
- **A ma binôme Samiha.** *Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.*

***Khawla MESRANE***

## TABLE DES MATIERS

<b>TABLE DES MATIERS</b> .....	<b>I</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b> .....	<b>III</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>IV</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>IV</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>1</b>
<b>I. CHAPITRE I : GENERALITE SUR LA POLLUTION PAR LES REJETS LAITIERS</b> .....	<b>3</b>
<b>I.1 INTRODUCTION</b> .....	<b>3</b>
<b>I.2 LA POLLUTION DE L'INDUSTRIE AGRO-ALIMENTAIRE</b> .....	<b>3</b>
<i>I.2.1 Rejets de la filière laitière</i> .....	<i>4</i>
<i>I.2.2 Origine de la pollution laiterie</i> .....	<i>4</i>
I.2.2.1 Fabrication .....	4
I.2.2.2 Eaux de refroidissement .....	5
<b>I.3 COMPOSITION ET CARACTERISTIQUES DES EFFLUENTS LAITIERS</b> .....	<b>5</b>
<i>I.3.1 La composition des effluents laitiers</i> .....	<i>5</i>
I.3.1.2 La phase aqueuse vraie .....	7
I.3.1.2 La suspension colloïdale micellaire .....	7
I.3.1.3 L'émulsion .....	7
<i>I.3.2 Les caractéristiques des effluents laitiers</i> .....	<i>8</i>
<b>I.4 PROBLEMATIQUES LIEES AUX EFFLUENTS DE LAITERIE</b> .....	<b>8</b>
<i>I.4.1 Matière organique</i> .....	<i>9</i>
<i>I.4.2 Phosphates</i> .....	<i>9</i>
<i>I.4.3 Matières solides</i> .....	<i>10</i>
<b>I.5 TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE LAITERIES</b> .....	<b>10</b>
<i>I.5.1 Prétraitements et traitements physico-chimiques</i> .....	<i>10</i>
<i>I.5.2 Traitements biologiques</i> .....	<i>12</i>
I.5.2.1 Les procédés biologiques aérobies .....	12
I.5.2.2 Les procédés biologiques anaérobies .....	12
<i>I.5.3 Les techniques membranaires</i> .....	<i>13</i>
<b>I.6 CONCLUSION</b> .....	<b>15</b>
<b>II. CHAPITRE II : LE PROCEDE D'ELECTROCOAGULATION</b> .....	<b>16</b>
<b>II.1 INTRODUCTION</b> .....	<b>16</b>
<b>II.2 HISTORIQUE DE PROCEDE</b> .....	<b>16</b>
<b>II.3 PRINCIPE DE L'ELECTROCOAGULATION</b> .....	<b>17</b>
<b>II.4 MECANISME DE FORMATION DES HYDROXYDES</b> .....	<b>18</b>
<b>II.5 PRINCIPE LOIS DE L'ELECTROLYSE</b> .....	<b>23</b>

<b>II.6 LES DIFFERENTS TYPES D'ELECTRODES ET DE CONNEXION ELECTRIQUES ...</b>	<b>23</b>
<b>II.7 LES FACTURES INFLUENÇANT DE L'EC .....</b>	<b>27</b>
<i>II.7.1 la conductivité.....</i>	<i>27</i>
<i>II.7.2 Le pH initial .....</i>	<i>28</i>
<i>II.7.3 Effet de quantité d'électricité.....</i>	<i>28</i>
<b>II.8 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE PROCEDE D'EC.....</b>	<b>29</b>
<b>II.9 ETUDE FAITES SUR L'EC .....</b>	<b>31</b>
<b>II.10 CONCLUSION .....</b>	<b>34</b>
<b>III. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'ELIMINATION DES PHOSPHATES PAR ELECTROCOAGULATION.....</b>	<b>35</b>
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>41</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>42</b>

## LISTE DES ABREVIATIONS

Dans ce manuscrit nous avons utilisé les abréviations suivantes :

<b>Al</b> : Aluminium	<b>n</b> : Nombre d'électrons mis en jeu dans la réaction considérée,
<b>BP</b> : Connexion Bipolaire	<b>NF</b> : Nanofiltration
<b>C<sub>0</sub></b> : Concentration initial (mg/L)	<b>OI</b> : Osmose inverse
<b>COT</b> : Carbone Organique Totale (mg/L)	<b>P</b> : Phosphore
<b>d</b> : Distance inter électrode (mm)	<b>pH</b> : Potentiel d'hydrogène
<b>DBO</b> : Demande Biochimique en Oxygène (mg <sub>O<sub>2</sub></sub> /L)	<b>pH<sub>i</sub></b> : pH initial
<b>DBO<sub>21</sub></b> : Demande Biochimique en Oxygène à 21 jours (mg <sub>O<sub>2</sub></sub> /L)	<b>P<sub>t</sub></b> : Phosphore totale (mg/L)
<b>DBO<sub>5</sub></b> : Demande Biochimique en Oxygène à 5 jours (mg <sub>O<sub>2</sub></sub> /L)	<b>S</b> : La Surface immergée des électrodes (cm <sup>2</sup> )
<b>DCO</b> : Demande Chimique en Oxygène (mg <sub>O<sub>2</sub></sub> /L)	<b>t</b> : Durée d'électrolyse (s),
<b>EB</b> : Les Eaux Blanches	<b>TBX</b> : Toluène, Benzène et Xylène
<b>EC</b> : Électrocoagulation	<b>TPH</b> : Hydrocarbures Totales de Pétrole
<b>F</b> : Constante de Faraday (C/mol)	<b>UF</b> : Ultrafiltration
<b>Fe</b> : Fer	
<b>GG</b> : Globules Gras	
<b>I</b> : Intensité imposée aux bornes des électrodes (Intensité de courant) (A)	
<b>i</b> : Densité de courant (A/cm <sup>2</sup> )	
<b>M</b> : Masse molaire de l'ion considéré (g/mol)	
<b>MES</b> : Matières En Suspension (mg/L)	
<b>MF</b> : Microfiltration	
<b>MP-P</b> : Connexion Monopolaire en Parallèle	
<b>MP-S</b> : Connexion Monopolaire en Série	
<b>m<sub>théorique</sub></b> : Masse théoriquement dissoute (g),	

## LISTE DES FIGURES

<i>Figure II. 1: Schéma du principe de l'électrocoagulation</i> -----	18
<i>Figure II. 2 : Diagramme de prédominance des différents hydroxydes d'aluminium et l'effet de pH</i> -----	21
<i>Figure II. 3 : Diagramme de prédominance des différents hydroxydes de fer trivalents</i> -----	22
<i>Figure II. 4 : Connexion en parallèle d'électrodes monopolaires</i> -----	24
<i>Figure II. 5 : Connexion en série d'électrodes monopolaires.</i> -----	25
<i>Figure II. 6 : Connexion des électrodes bipolaires</i> -----	26

## LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau I. 1 : Composition moyenne des caractéristiques des rejets laitiers</i> -----	7
<i>Tableau I. 2 : Normes de rejets laitiers</i> -----	8
<i>Tableau I. 3 : Différents procédés de traitement des effluents laitiers</i> -----	14
<i>Tableau II. 1 : Quelques exemples d'applications de l'EC</i> -----	31
<i>Tableau III. 1 : Conditions optimales pour différents auteurs</i> -----	39

# **Introduction générale**

## **INTRODUCTION GENERALE**

L'eau est un bien précieux qui subit diverses pollutions et dégradations : les écosystèmes et la santé des personnes sont directement impactés. Les pollutions présentes dans l'eau sont d'origines diverses : industrielle, domestique ou agricole [1].

L'industrie laitière est considérée comme l'une des principales industries agroalimentaires qui génèrent d'importants volumes d'effluents chargés en matière organique biodégradable [2]. Dans la plupart des cas, les eaux usées rejetées dans l'environnement sans aucun traitement, entraînent plusieurs problèmes graves tels que la pollution des eaux de surface et des eaux souterraines, une prolifération d'algues provoquant le processus d'eutrophisation, due à la présence de nitrates et de phosphates qui augmente le risque pour la santé humaine et le déséquilibre des écosystèmes [1, 3].

L'eutrophisation c'est le développement excessif d'algues qui agissent par plusieurs mécanismes sur l'équilibre biologique du milieu, en limitant le passage de la lumière et en consommant de grandes quantités d'oxygène. La dégradation des algues augmente la teneur en matière organique de l'eau, favorisant le développement de microorganismes produisant des toxiques, tels que les cyanobactéries, qui sont capables de détruire presque totalement l'écosystème du plan d'eau contaminé [4].

Pour éviter ces problèmes, plusieurs types de traitement de ces effluents ont été imposées pour réduire l'impact des rejets avant de leur rejetée dans le milieu récepteur, des traitements physiques ou chimiques cependant nécessaires pour contrôler les qualités physico-chimiques et microbiologiques de l'eau en fonction des usages prévus en usine, des procédés biologiques (système aérobie ou anaérobie) et des procédés membranaires [5].

Les recherches actuelles orientent vers des techniques plus efficaces pour le traitement de ces nouveaux polluants organiques faisant aussi appel aux procédés électrochimiques.

L'électrocoagulation (EC) est une technique de traitement de l'eau polluée qui a montré son efficacité pour le traitement de certains polluants solubles ou colloïdaux, tels que rencontrés dans des rejets liquides contenant des métaux lourds, des émulsions, des suspensions.

Dans ce contexte, notre travail s'est basé sur le traitement des phosphates des effluents laitiers par un procédé électrochimique (électrocoagulation) qui consiste à éliminer les phosphates en utilisant des électrodes de Fer ou d'Aluminium.

En se basant sur ces objectifs, nous avons, en effet, structuré l'ensemble de notre travail deux chapitres suivi d'une synthèse sur l'élimination des phosphates par le procédé d'électrocoagulation. Le premier donne un aperçu général sur la pollution générée par les industries laitières, leurs impacts sur l'environnement, la pollution générée par les phosphates et les divers procédés conventionnels de traitement de ces effluents. Le deuxième présente en détaille les données essentielles sur le procédé d'électrocoagulation, son principe, les paramètres influençant le procédé ainsi les divers travaux des différents polluants éliminer. Enfin, dans la conclusion, nous ferons un bilan général des acquis de ce travail.

**Chapitre I :**  
**Généralité sur la pollution**  
**par les rejets laitiers**

## **I. CHAPITRE I : GENERALITE SUR LA POLLUTION PAR LES REJETS LAITIERS**

### **I.1 Introduction**

Les industries agro-alimentaires génèrent énormes de volumes d'effluents, particulièrement l'industrie laitière est la plus préoccupante puisqu'elle génère 0,2 à 10 L d'eaux usées par litre de lait transformé [3, 6].

La production laitière est caractérisée par une consommation importante en eaux claires et par des rejets chargés en pollution organique. Dans la plupart des cas, ces effluents sont rejetées dans l'environnement sans aucun traitement, ce qui peut entraîner plusieurs problèmes graves tels que la pollution des eaux de surface et souterraines : augmentation de la demande chimique en oxygène (DCO), la demande biochimique en oxygène (DBO), l'eutrophisation due à la présence de phosphates et d'azote causant ainsi des risques pour la santé humaine et affectant la flore et la faune, donc un déséquilibre de l'écosystème [6 - 8].

Par conséquent, le traitement des eaux usées de l'industrie laitière devient très important non seulement pour l'environnement mais aussi dans le but de recycler l'eau pour l'utiliser dans les processus industriels [3].

### **I.2 La pollution de l'industrie agro-alimentaire**

Le secteur agro-alimentaire se caractérise par sa diversité de par sa taille, le type d'entreprises, la gamme étendue de matières premières, les produits et procédés utilisés ainsi que les nombreuses combinaisons qu'ils permettent. Le secteur est également sujet à des conditions économiques, sociales et environnementales locales diverses. Les impacts environnementaux les plus conséquents sont la consommation d'eau et le rejet d'eaux usées et la consommation d'énergie. Dans les effluents agro-alimentaires, la DCO et la DBO sont habituellement élevées et les niveaux peuvent être de 10 à 100 fois supérieures à ceux des eaux usées domestiques [7, 8].

Les caractéristiques communes à toutes les eaux résiduaires de l'industrie alimentaire; s'articulent autour d'une pollution essentiellement organique et biodégradable, une tendance générale à l'acidification et à la fermentation rapide.

Bien que la source de pollution soit toujours le lait, les caractéristiques des rejets sont très variables, à la fois dans leur composition et leur variabilité journalière ou

saisonnaire, le type de transformation réalisée, la taille de l'usine aussi que la technologie mise en place pour le nettoyage (volumes, produits utilisés) [7,9].

Ces eaux sont estimées correspondantes à 50 à 90 % du volume total. Les effluents laitiers contiennent aussi les pertes de matières premières. Ces pertes correspondent à 1 à 3 % du lait transformé [10].

### **I.2.1 Rejets de la filière laitière**

#### **Eaux de traite**

Le traitement laitier réalisé dans des salles de traite spécifiques génère principalement deux sortes de rejets.

↳ **Les eaux vertes** en premier lieu, sont issues des rejets de l'animal pendant la stabulation, du lavage du sol, des murs et de la salle de traite [11].

↳ **Les eaux blanches (EB)** elles proviennent du nettoyage des équipements de traite en contact direct avec le lait, Il peut s'agir soit du lavage des équipements relatifs à la collecte du lait (machine à traire, cuve de réfrigération du lait, stockage du lait impropre à la consommation), soit du lavage du matériel et des locaux mobilisés par l'activité fromagère. Des rejets accidentels peuvent survenir. L'essentiel de la charge polluante provient du volume résiduel du lait présent dans les canalisations des installations avant le nettoyage de ces dernières [11].

### **I.2.2 Origine de la pollution laiterie**

L'utilisation de l'eau dans l'industrie laitière: élément de fabrication, alimentation des chaudières, des échangeurs et de l'installation frigorifique, lavages des sols et des cuves, rinçage des appareils technologiques, eau de refroidissement, eaux sanitaires,... [12]. On peut trouver la pollution des eaux en deux catégories principales:

#### **I.2.2.1 Fabrication**

La nature des effluents issus des laiteries dépend en grande partie des procédés de fabrication. 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 [11].

- **Lactosérum** ou petit lait : est un coproduit de l'industrie fromagère et de la préparation de caséinates. l'acidification et la coagulation provoquent la formation d'une phase liquide au-dessus d'un caillé de lait avec une couleur jaune verdâtre. Le lactosérum représente 90 % du volume original de lait utilisé en fromagerie et en est le principal sous-produit. Compte tenu de sa concentration élevée en DCO, il représente la principale charge polluante émise [13].

#### **I.2.2.2 Eaux de refroidissement**

Le refroidissement n'entraîne pas de pollution autre que thermique. Il est cependant assez fréquent de trouver des eaux dont la température dépasse parfois le seuil de 30° C fixé par la législation [9].

Parmi les différents types de pollution chimique, on peut distinguer :

- **pollution biodégradable (matière organique)** : les effluents issus de l'industrie agro-alimentaire renferment des matières organiques non toxiques par elles-mêmes, mais dont la dégradation par voie bactérienne consomme l'oxygène dissous dans les cours d'eau entraînant la mort de nombreux organisme aquatiques dont les poissons par asphyxie [14].
- **Pollutions azotées et phosphorées** : l'azote et le phosphore sont des éléments nutritifs à l'origine des phénomènes d'eutrophisation (prolifération des algues) [14].

### **I.3 Composition et caractéristiques des effluents laitiers**

#### **I.3.1 La composition des effluents laitiers**

L'effluent est responsable de l'impact environnemental majeur de l'industrie laitière. Les quantités rejetées et les concentrations des effluents varient selon le produit, types de transformation réalisée, la taille d'usine et d'équipements, le degré de contrôle des

pertes et de réutilisation des résidus et des sous-produits [15]. La composition chimique du lait et ses caractéristiques varient sous l'effet d'un grand nombre de facteurs. La production laitière subit des variations annuelles saisonnières en quantité et en qualité. Certains facteurs ne peuvent être maîtrisés sont liés soit à l'animal (facteurs génétiques, la mise bas, l'âge et l'état physiologique de la vache), soit au milieu et à la conduite d'élevage (tels que la nature de la nourriture ingérée par les animaux qui dépend des saisons et le climat) [11, 16].

Les effluents de laiterie riche en matière organique facilement biodégradable contiennent essentiellement de l'eau et du lait ou des résidus de produits laitiers dilués y compris des protéines de la caséine, du lactose, sels minéraux, du phosphate, des nutriments, des graisses, des sulfates, des chlorures, en plus des agents d'assainissement et des détergents utilisés pour le lavage et le nettoyage peuvent également être à l'origine de taux élevés de phosphore et d'azote. Les eaux résiduaires de l'industrie laitière sont de couleur blanche, se caractérisent par une odeur intense, la turbidité est due à la concentration élevée en matières en suspension (MES), une forte teneur insoluble de DCO et de DBO<sub>5</sub> et un pH variable [7, 17].

Dans les effluents de laiteries, le contribuant principal à la pollution organique est le lait lui-même. Une composition approximative du lait est donnée ci-après [18] :

- ↳ 87.3 % Eau;
- ↳ 3.9 % Matière grasse du lait;
- ↳ 8.8 % Solides solubilisés;
  - ➔ Protein 3.25 % (3/4 caséine);
  - ➔ Lactose 4.6 %;
  - ➔ Les éléments minéraux 0.65 % - Ca, P, Mg, Na, Zn, Cl, Fe, Cu, ect.
  - ➔ Les acides 0.18 % - citrate, formate, lactate, oxalate;
  - ➔ Enzymes – peroxydase, catalase, phosphates, lipase;
  - ➔ Gaz – oxygène, azote. Vitamine – A, C, D, thiamine, riboflavine, autres

En plus de la composition, la structure physique du lait est importante. Le lait est un système très complexe, c'est un mélange hétérogène qui contient trois principales phases :

### **I.3.1.2 La phase aqueuse vraie**

La phase aqueuse vraie est un mélange de substances liquides ou solides solubilisées appelée soluté, dans un solvant liquide. Se caractérisent par leur poids moléculaire et leur taille faibles, pouvant donner naissance au lactosérum (lactose, sels, protéines solubles, composés azotés non protéiques, biocatalyseurs tels que vitamines hydrosolubles ou enzymes) [16, 18].

### **I.3.1.2 La suspension colloïdale micellaire**

C'est un mélange constitué d'une phase dispersée solide non solubilisée, qui peut donner naissance au caillé obtenu par la coagulation des caséines, une suspension colloïdale est constituée des micelles de caséine, de protéines globulaires et de particules de lipoprotéine [16].

### **I.3.1.3 L'émulsion**

Une émulsion est un mélange d'une phase dispersée liquide non solubilisée, qui représente une couche de globules gras (GG) rassemblés à la surface du lait par effet de gravité, sous forme de très fines gouttelettes, qui peut donner naissance à la crème. Dans une phase dispersante liquide, on distingue les émulsions de matière grasse dans l'eau (le lait) et des émulsions d'eau dans la matière grasse (le beurre). La stabilité de l'émulsion est due à la présence d'une enveloppe lipido-protéique chargée négativement [16]. Les analyses physico-chimiques des effluents laitiers ont porté sur les paramètres présenter dans le tableau suivant :

*Tableau I. 1 : Composition moyenne des caractéristiques des rejets laitiers [10].*

<b>DBO</b>	mg/L d'effluents	360 à 3200
<b>DCO</b>	mg d'O <sub>2</sub> /L d'effluents	950 à 5000
<b>Azote Kjeldahl*</b>	mg/L d'effluents	40 à 90
<b>Graisses</b>	g/L d'effluents	110 à 800
<b>DCO/DBO<sub>5</sub></b>	-	Proche de 2
<b>MES</b>	mg/L d'effluents	90 à 1040
<b>P<sub>total</sub></b>	mg/L d'effluents	4 à 20
<b>pH</b>	-	5 à 11

\*Azote Kjeldahl : azote organique + azote ammoniacal

### **I.3.2 Les caractéristiques des effluents laitiers**

Les caractéristiques physicochimiques révèlent que l'effluent de laiterie présente deux caractéristiques principales. La première est sa richesse en matière organique (riche en azote et phosphore) facilement biodégradable. Les variations plus ou moins élevées de débit, de température, de pH et de charge polluante représentent la deuxième caractéristique riche en (DCO et DBO<sub>5</sub>).

Tout effluent traité, doit respecter les normes de rejets pour pouvoir l'être dans un milieu récepteur, les valeurs limites sont données dans le tableau I.2 Toutes ces caractéristiques induisent le fait que les effluents de laiteries et fromageries doivent subir un traitement spécifique afin de réduire considérablement la charge organique, avant d'être rejetés.

*Tableau I. 2 : Normes de rejets laitiers [25].*

<b>Paramètres</b>	<b>Valeurs</b>
pH	6 - 9
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	<25
DCO (mg/L)	<125
Huiles et graisses (mg/L)	<10
Azote totale (mg/L)	<10
Phosphore totale (mg/L)	0.4 - 5
Température	<30 °C

### **I.4 Problématiques liées aux effluents de laiterie**

Les effluents laitiers contiennent une diversité des polluants organiques, inorganiques et bactériens. Les paramètres tels que le pH, les MES, la DCO, DBO,... indiquent comment la décharge d'effluent chargés dans le milieu naturel pouvant entraîner des modifications de la répartition des espèces végétales et animales et l'eutrophisation des cours d'eau [19].

### **I.4.1 Matière organique**

La principale pollution étant de la matière organique, présentée dans les eaux usées avec des teneurs élevées évaluées selon les paramètres tels que la DCO, la DBO et le COT. La DCO est considérée comme un bon indicateur du degré de pollution dans l'effluent [20].

↳ **La demande chimique en oxygène (DCO)** est une mesure de la quantité de l'oxygène utilisé dans l'oxydation chimique. Elle s'exprime en mg/L d'oxygène. Elle permet de mesurer l'ensemble des matières organiques et inorganiques retrouvées dans les eaux usées sous forme colloïdale ou sous forme de MES. [20, 21].

↳ **La demande biochimique en oxygène (DBO)** s'exprime en mg/L d'oxygène est une mesure de l'activité biologique qui existe dans les eaux polluées. La DBO représente la quantité d'oxygène consommée par des microorganismes lors de l'oxydation biochimique des matières organiques biodégradables. Ce paramètre permet de situer la teneur en matières organiques biodégradables. Si l'incubation dure 5 jours on l'appelle DBO<sub>5</sub> et si elle dure 21 jours, DBO<sub>21</sub>.

Généralement, les valeurs de DCO sont plus élevées que celles de la DBO. Le rapport DCO/DBO permet de définir le traitement à appliquer pour un effluent donné [9, 11, 19].

### **I.4.2 Phosphates**

Le phosphore est un nutriment important pour la croissance des organismes, il existe dans les eaux à l'état dissous ou en suspension, Le phosphore total dissous est la somme du phosphore organique et du phosphore minérale qui lui-même inclut les polyphosphates et les orthophosphates.

Le phosphore (P) est un élément chimique non métallique, se combine à d'autres éléments pour former un grand nombre de minéraux. On distingue trois principales formes de phosphore à savoir : le phosphore noir, le phosphore rouge et le phosphore blanc. Quelle que soit sa forme, l'atome de P est toujours associé à des atomes d'oxygène pour former le groupement phosphate PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>.

La concentration excessive de phosphate dans l'eau est responsable de plusieurs problèmes environnementaux et industriels, tels que l'eutrophisation. Ce phénomène

engendrant une prolifération d'algues, la diminution de l'oxygène dissous, perturbe la qualité de l'eau et réduit la biodiversité dans les écosystèmes aquatique [22 - 24].

### **I.4.3 Matières solides**

Les MES présents dans les eaux usées augmentent la turbidité de l'eau et peuvent se déposer dans les cours d'eau et contribuent, par conséquent, à la production d'odeur indésirable et à la formation de dépôt de boues [21].

## **I.5 Traitement des effluents de laiteries**

La laiterie utilise une quantité considérable d'eau pour le lavage de ses récipients et pour le nettoyage des locaux. Les effluents de eaux usées de l'industrie laitière peuvent être chargés de matière organique carboné présente sous forme soluble (lactose, acides aminés, peptides) doivent être traités ou prétraités avant que les eaux ne soient rejetées en milieu naturel. Les méthodes de traitement des eaux usées peuvent être classées en trois catégories principales, à savoir les processus physiques, chimiques et biologiques.

### **I.5.1 Prétraitements et traitements physico-chimiques**

Les traitements primaires sont des procédés physico-chimiques permettant par addition de flocculant ou de coagulants la précipitation de matières non organique, afin de former des floccs plus stables et plus denses, facile à récupérer par décantation ou filtration. Ainsi, ces procédés ont été également examinés avec succès pour traiter ce genre d'effluent [25].

La coagulation chimique permet une élimination importante des MES, des matières colloïdales, de la DBO, des composéé organique réfractaire, des nutriments (surtout le phosphore), des métaux lourds et des sels inorganiques. Se processus basée 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 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 [21, 27].

- ↪ Tanik et al, ont réalisées une étude avec le traitement chimique des eaux usées provenant d'une usine de produits laitiers en employant trois coagulants : chlorure ferrique ( $\text{FeCl}_3$ ), alun (sulfate d'aluminium) et sulfate ferreux ( $\text{FeSO}_4$ ), leurs résultats montrent que les rendements d'élimination de la DCO, sont avérés insuffisants pour répondre aux normes de rejet, ce qui indique que le traitement chimique ne donne pas des bons résultats. Donc la coagulation chimique peut être utilisée comme un prétraitement [28].
- ↪ Une étude comparative a été faite par Hamdani et al, les chercheurs ont examinés l'efficacité de trois coagulants pour le traitement des rejets provenant d'une industrie laitière à savoir le chlorure ferrique, sulfate d'aluminium et la chaux. Les meilleurs résultats de traitement par coagulation-décantation sont enregistrés avec l'utilisation de la chaux des performances d'abattement de l'ordre de 94 et 89 % ont été obtenues respectivement pour l'élimination de MES et le phosphore total [12].
- un taux d'abattement de l'ordre de 40, 94, 89, et 30 % est obtenu respectivement pour la DCO, les MES, le phosphore et l'azote avec l'utilisation de la chaux.
  - un taux d'abattement de l'ordre de 89, 33.3, 28 et 39 % est obtenu respectivement pour les MES, le phosphore, l'azote et la DCO avec l'utilisation de sulfate d'aluminium ;
  - un taux d'abattement de l'ordre de 91, 27 et 35 % est obtenu respectivement pour l'élimination des MES, (phosphore et l'azote) et la DCO avec l'utilisation de chlorure ferrique.
- ↪ Sengil et al, ont étudié l'élimination de la matière grasse et la DCO des eaux résiduaires de laiterie par électrocoagulation, un taux d'élimination de 98% est obtenu pour la réduction de la DCO et 99 % pour les huiles et graisses [29].
- ↪ Tchamango et al, ont étudié par électrocoagulation le traitement d'effluents laitiers ; l'élimination maximale de la DCO était de 61 % avec l'utilisation des électrodes en aluminium [6].

## **I.5.2 Traitements biologiques**

Compte tenu de leur excellente biodégradabilité, les procédés de dépollution par voie biologique occupent une place prédominante dans le traitement des eaux usées issues de l'industrie laitière. Les procédés biologiques sont des techniques d'épuration reposant sur l'utilisation de microorganismes capables de dégrader la matière organique.

Ces procédés biologiques se produisent selon deux modes: traitements en aérobie (ils sont effectués en présence de l'oxygène) et traitement en anaérobie (dans ce cas les microorganismes dégradent la matière organique en absence de l'oxygène) [30, 31].

### **I.5.2.1 Les procédés biologiques aérobies**

Consistent en une élimination des matières organiques biodégradables dans des conditions aérobies. Utilise des micro-organismes contenus dans des réacteurs biologiques dans lesquels en présence d'oxygène (air ou oxygène pur).

Les traitements biologiques sont également scindés en deux catégories soit les procédés sur pellicule fixe (biofiltres (biomasse fixée), lits bactériens, biodisques, etc.) soit les procédés en boues (lagunage, boues activées (biomasse en suspension), etc.)

Ces procédés efficaces pour réduire la DCO et la DBO, les procédés aérobies sont les plus répandus sur les sites de transformation laitière [18, 19].

### **I.5.2.2 Les procédés biologiques anaérobies**

Permettant le développement de microorganismes qui stabilisent (minéralisent) les substances biodégradables en les transformant en biogaz (méthane et gaz carbonique) en absence totale d'oxygène [27].

Plusieurs chercheurs ont utilisé la biotechnologie pour la purification des effluents laitiers, et parmi les systèmes de traitement biologique, on rencontre :

Les systèmes aérobies telle que :

- ↳ Aitcheikh et al, utilisé de coquilles d'huîtres comme support d'origine naturelle dans les réacteurs biologiques à biomasse fixe en présence de champignons pour le traitement des effluents de laiteries, les résultats obtenus montrent que des rendements d'abattement de la matière organique en terme

de DCO d'environ 95 %, plus que 80 % d'azote et environ 75 % de phosphore pendant 24 heures de traitement [30].

↳ Loperena et al, réalisé en milieu aérobie le traitement des eaux résiduaires laitières, un rendement d'élimination de la DCO est proche de 95 % [10, 32].

Et systèmes anaérobies telle que :

↳ Eloutassi, et al, leur étude basée sur la production de biométhane utilisant un bioréacteur anaérobie à deux phases. Les résultats montrent une forte diminution de la DCO avec un pourcentage supérieur à 80 % [33].

↳ Cependant, Arnaud, propose un traitement biologique pour les effluents de laiterie de montagne par digestion anaérobie avec production de biogaz, le rendement minimal obtenu pour l'élimination de la DCO est de l'ordre de 80 % [10, 34].

### **I.5.3 Les techniques membranaires**

Plusieurs traitements basés sur le principe de la filtration sont possibles pour abattre les matières en suspension et les matières organiques.

La technologie de filtration membranaire les plus courantes sont : la microfiltration (MF), l'ultrafiltration (UF), la nanofiltration (NF), l'osmose inverse (OI), ces quatre procédés sont en générale classés en fonction de la taille des espèces à séparer [14].

Les procédés de séparation à membranes utilisant un gradient de pression hydrostatique comme force de transfert, En faisant passer la solution contenant les contaminants à travers des pores physiques de la membrane de différentes tailles, ce qui se fait sous haute pression. Ces procédés peuvent être utilisés pour clarifier ou purifier en éliminant les particules indésirables d'un fluide (suspension, couleur, bactéries) concentrer, fractionner ou séparer plusieurs constituants [14, 18].

De nombreux chercheurs ont utilisé la technologie membranaires pour le traitement des effluents de laiterie tels que la microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration NF et l'osmose inverse OR ou des opérations à deux étages telles que RO + RO [35] ou bien UF + OR [36].

Le tableau I.3 regroupe les différents procédés ayant été utilisés pour le traitement des effluents laitiers

**Tableau I. 3 : Différents procédés de traitement des effluents laitiers.**

<b>Auteurs</b>	<b>Procédé utilisée</b>	<b>Rendement d'abattement</b>
Andreottola et al (2002) [30, 37]	MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) Réacteur à lit mobile d'un biofilm	DCO > 80 % Azote > 96,2 %
Hebabaze et al (2014) [38]	Réacteur biologique séquentiel (RBS)	98 % de la DCO, 99 % de la DBO <sub>5</sub> , 74 % des MES 68 % pour l'azote total.
Eloutassi et al (2014) [33]	Bioréacteur anaérobie	DCO > 80 %
Menoret (2001) [39]	Cultures fixées sur gravier ou pouzzolane	DCO > 95 %
Ayeche et Balaska (2010) [40]	Coagulation-floculation a l'aide de chaux	Abattement de 92 % des MES et 83 % de phosphate totale
Şengil et al. (2006) [29]	Electrocoagulation	L'efficacité d'élimination de la DCO est de 98% et 99 % pour les huiles et les graisses
Tchamango et al (2010) [6]	Electrocoagulation a l'aide d'une électrode en aluminium	DCO réduit jusqu'à 61 %, l'élimination du phosphore, la teneur en azote et la turbidité étaient respectivement de 89 %, 81 % et 100 %.
Balanec et al (2002) [41]	Nanofiltration	diminution de la DCO 98.9 % à 99.8 %
Turan (2004) [42]	Osmose inverse	Elimination de la DCO a 99.7 %

Balanec et al (2005) [35]	Cascade NF + RO Cascade RO+RO	Rétention des carbones organiques totaux (COT) pouvant aller jusqu'à 99,9 % pour l'opération NF + RO et de 99,95 % pour l'opération RO+RO.
Luo et al (2012) [43]	Cascade UF + NF	Elimination de la DCO à 99 %
Petricic et al (2015) [44]	UF + RO	Elimination entre 91,3 % et 99,8 % des contaminants de l'effluent tels que les éléments métalliques, les composés organiques et inorganiques, MES, DCO et DBO ont été complètement éliminés.

## **I.6 Conclusion**

Les eaux résiduaires des industries laitières sont parmi les rejets agroalimentaires les plus riches en matière organique biodégradables. Les caractéristiques physicochimiques des effluents laitiers sont les suivants :

- ⇒ Une forte teneur insoluble de DCO et de DBO<sub>5</sub> ;
- ⇒ La turbidité due à la concentration élevée en MES ;
- ⇒ taux élevé de phosphore et d'azote issu principalement des produits de nettoyage et de désinfection ;
- ⇒ Variations importantes du pH ;
- ⇒ Variation de température (les eaux de refroidissement).

Pour réduire les effets des effluents laitiers au maximum, des traitements nécessaires doit être appliquées est indispensable pour préserver le milieu naturel. Le traitement de ce type d'effluent est basé sur un traitement biologique du fait de la biodégradabilité de l'effluent. Par ailleurs, plusieurs chercheurs proposent l'utilisation de l'électrocoagulation pour le traitement des effluents de laiterie, ce que nous allons aborder dans le chapitre suivant.

**Chapitre II :**  
**Le procédé**  
**d'électrocoagulation**

## **II. CHAPITRE II : LE PROCÉDE D'ELECTROCOAGULATION**

### **II.1 Introduction**

Chaque année, une grande quantité d'eaux usées provenant de diverses industries est rejetée dans l'environnement, et diverses méthodes sont utilisées pour traiter les eaux usées afin de réduire la quantité des polluants [45].

Les méthodes conventionnelles, généralement utilisées pour l'élimination des effluents industriels, sont principalement les traitements biologiques et physicochimiques ainsi que leurs diverses combinaisons. Néanmoins, les traitements biologiques sont les plus utilisés. Il s'est récemment avéré que le développement de l'électricité comme nouvelle source d'énergie, l'aspect non polluant et l'automatisation qu'elle apporte ont permis un développement importants des techniques électrochimiques dans le domaine de traitement des eaux [46].

L'électrocoagulation (EC) est une technologie qui se trouve à l'intersection de, trois autres technologies fondamentales : l'électrochimie, la coagulation et la flottation [47]. En effet, l'électrocoagulation est un procédé électrochimique complexe qui met à profit un éventail de phénomènes physiques et chimiques pour entraîner l'abattement des polluants disséminés dans l'effluent. Ce procédé s'opère à l'aide d'électrodes (anodes et cathodes), lesquelles sont plongées dans le milieu aqueux [48].

Plusieurs études récentes sont axées sur l'amélioration de l'utilisation de procédé d'électrocoagulation comme alternative au traitement des effluents laitiers. EC est un procédé électrolytique qui consiste à produire des coagulants en dissolvant électriquement soit de l'aluminium, soit des électrodes de fer (l'électro-dissolution d'anodes sacrificielles). Cette technique émergente effectue une déstabilisation des polluants en suspension, dissous ou émulsifiés en utilisant un courant électrique. Elle permet d'éliminer divers types de polluants, y compris les contaminants organiques et inorganiques, pour divers types d'eaux usées [45, 49].

### **II.2 Historique de procédé**

L'électrocoagulation (EC) est une technique de traitement développée avant le 20<sup>ème</sup> siècle. Le premier document rapportant l'utilisation de l'électrocoagulation (EC) pour le traitement des effluents est un brevet américain déposé en 1880 par Webster qui utilisait des électrodes en fer [48, 50].

Un pilote a été construit à Londres en 1889 pour traiter de l'eau de mer par électrolyse. Une demande de licence a été déposée par A.E. Dietrich en 1906 pour le traitement des eaux usées de manufactures [50].

En 1909, J.T. Harries reçut une licence des USA pour le traitement des eaux usées par des électrodes de fer et d'aluminium.

En 1940, Matteson et al décrivait un « coagulateur électronique » qui consistait à faire dissoudre une anode en aluminium pour ensuite former avec les hydroxydes produits à la cathode, des hydroxydes d'aluminium qui flocculent et coagulent en entraînant les matières en suspensions et purifient l'eau. Un procédé similaire a été développé en Grande Bretagne pour traiter les eaux de rivière par des électrodes de fer [50].

L'EC a été utilisée pendant toutes ces années sans véritablement connaître un succès et sans qu'elle ne soit acceptée par les populations et les industriels. Cependant, ces dernières années, on constate un regain d'intérêt, et son utilisation s'est accrue et bon nombre d'industriels font appel à elle pour le traitement de leur effluent. La technologie a été optimisée pour minimiser la consommation énergétique et pour augmenter l'efficacité du traitement. Son efficacité a été démontrée sur divers polluants. Il est efficace dans le traitement des métaux lourds tels que Pb, Cd, Cr et As ; les métaux tels que Mn, Cu, Zn, Ni, Al, Fe, Mg, Mo, Ca et Pt ; également des anions tels que  $\text{CN}^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , F et Cl ; les non métaux tels que le phosphore et des composés organiques, Hydrocarbures Totales de Pétrole (TPH), Toluène, Benzène et Xylène (TBX), DBO, DCO, MES, Minéraux, colorants organiques, huiles et graisses tous des effluents industriels variés [50, 51].

### **II.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 –flocculation des polluants que l'on souhaite éliminer. L'électrolyse peut également coaguler les composés solubles oxydables ou réductibles contenus dans l'effluent [52].

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). La figure (II.1) présente le principe du procédé.

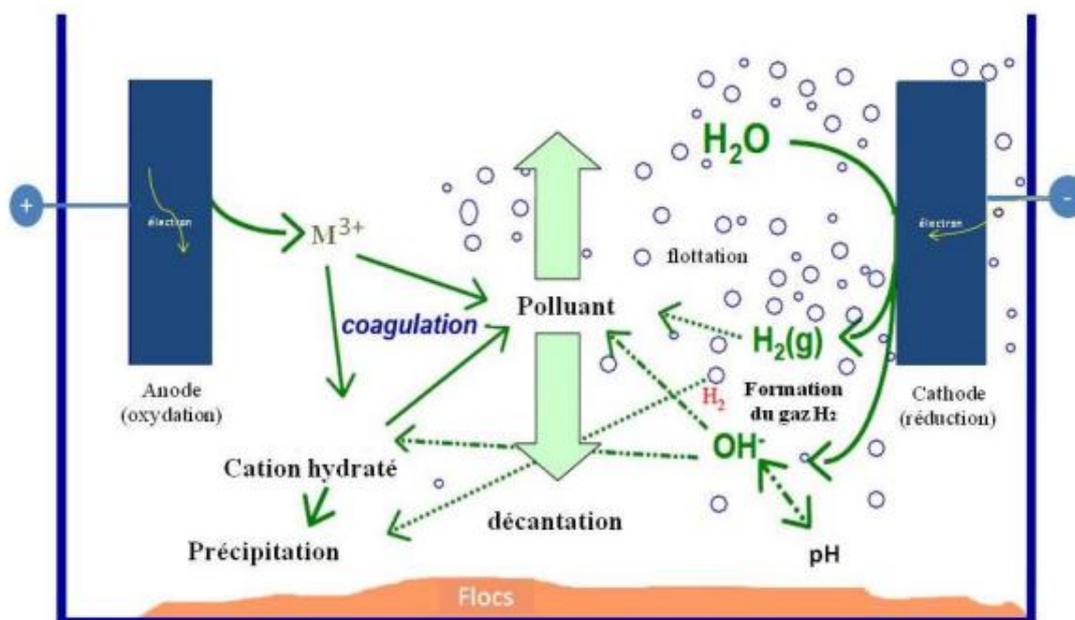


Figure II. 1: Schéma du principe de l'électrocoagulation [51].

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 de traitement. Les deux métaux communément utilisés sont le fer et l'aluminium [52].

#### II.4 Mécanisme de formation des hydroxydes

Un réacteur simple d'électrocoagulation est composé d'une anode et une cathode comme il est représenté dans la figure II.1. 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 [48]. La dissolution anodique des électrodes de fer ou d'aluminium favorise la production des espèces cationiques telles que :  $\text{Al}^{3+}$  et  $\text{Fe}^{2+}$  qui forment des hydroxydes de fer ou d'aluminium [19].

L'électrocoagulation est un processus complexe qui se déroule en plusieurs étapes, telles que les réactions électrolytiques à la surface des électrodes, la formation de coagulants en phase aqueuse, l'adsorption de polluants solubles ou colloïdaux sur les coagulants qui sont éliminés par sédimentation ou flottation. Les matériaux d'électrode les plus utilisés dans l'EC sont l'aluminium et le fer [53].

Généralement le processus de l'EC comporte trois étapes successives [54] :

- (i) Formation de coagulants par oxydation électrolytique de l'électrode.
- (ii) Déstabilisation des contaminants, suspension de particules et rupture des émulsions.
- (iii) Agrégation des phases déstabilisées pour former des floes.

Les principales réactions mises en jeu pour des électrodes en métal soumises à un courant continu sont les suivantes [55] :

➤ **A l'anode : l'oxydation de métal**

La principale réaction qui se produit à l'anode métallique est la dissolution: Le métal va passer de l'état solide à l'état ionique selon la réaction (Eq II-1)



M : Matériel de l'anode (le Fer / l'Aluminium)

n : Nombre d'électrons transportés pendant le phénomène de dissolution anodique par mole de métal [56].

***L'oxydation de l'eau [48] :***



↳ **Cas des électrodes en Al :**

La dissolution de l'aluminium se fait à travers la réaction suivante [31,50] :



↳ **Cas des électrodes en Fe :**

La dissolution du fer se fait à travers la réaction suivante [57] :

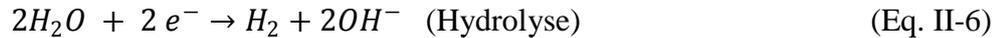


➤ **A la cathode:**

L'eau est réduite suivant la réaction :



La réduction de l'eau se fait à travers la réaction suivante [19] :

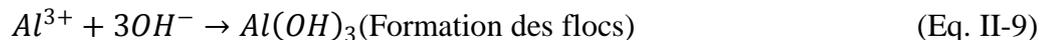


Ces réactions dépendent du pH de milieu (neutre ou basique), l'hydrogène est produit selon la réaction (II-6), alors qu'en milieu acide l'équation (Eq. II-7) décrit mieux l'évolution de l'hydrogène à la cathode [58].

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 :



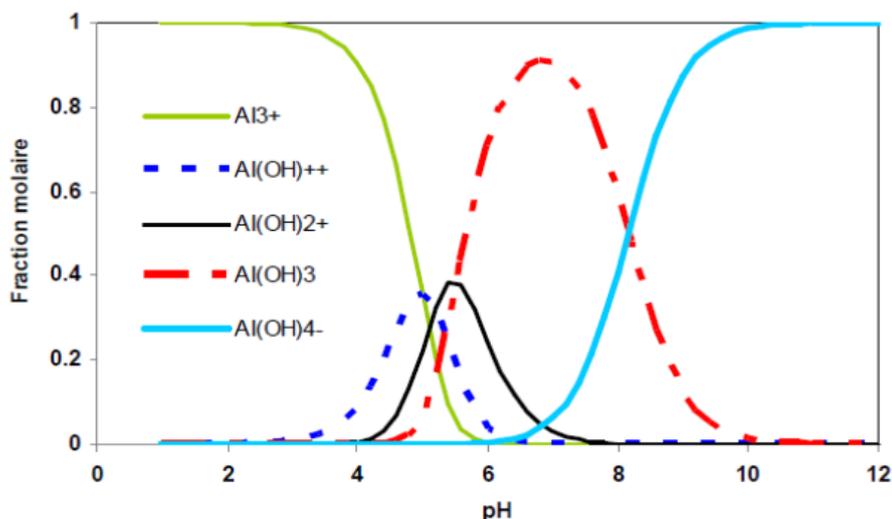
Réaction au sein de la solution [19]



Les cations métalliques forment des complexes avec les ions hydroxydes. L'espèce majoritaire dépend du pH. Dans le cas de l'aluminium, on trouve une multitude de complexes anioniques et cationiques [51, 52]. On peut distinguer:

- ↪ Les mono complexes tel que  $Al(OH)^{2+}$ ,  $Al(OH)_2^+$ ,  $Al(OH)_4^-$ .
- ↪ Les poly complexes tel que  $Al_2(OH)_2^{4+}$ ,  $Al_2(OH)_5^+$ ,  $Al_6(OH)_{15}^{3+}$ ,  $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$ .
- ↪ Les espèces amorphes et très peu solubles telles que  $Al(OH)_3$ ,  $Al_2O_3$ .

Sur la base de ces complexes ; on peut établir la prédominance des espèces d'aluminium en fonction du pH,



**Figure II. 2 :** Diagramme de prédominance des différents hydroxydes d'aluminium et l'effet de pH [51].

D'après la **Figure II.2**, on peut remarquer que:

- ✚ A pH < 3, l'aluminium est principalement à la forme trivalente  $\text{Al}^{3+}$ , cette forme de monomère devient négligeable en milieu moins acide (pH > 6).
- ✚ La forme ionique  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$  apparaît vers des pH de l'ordre de 3 pour atteindre un maximum de concentration (20 % de l'aluminium présent) vers un pH = 5.
- ✚ Dans la zone de pH comprise entre 5 et 8, l'espèce la plus répandue en solution est l'hydroxyde d'aluminium ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) avec un maximum de 95 % vers pH = 6,5. La solubilité de l'aluminium trivalent est quasiment nulle dans une gamme de pH entre 5 et 8, cependant sa réaction avec les  $\text{OH}^-$  en solution, permet la formation de composés solubles tels que les cations  $[\text{Al}(\text{OH})_2]^+$  et  $[\text{Al}(\text{OH})]^{2+}$ .
- ✚ L'ion  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  commence à se former vers un pH = 6 et atteint son maximum de 90 % de l'aluminium présent dans la solution vers un pH de 9,5, le reste de l'aluminium étant sous la forme d'hydroxyde d'aluminium  $\text{Al}(\text{OH})_3$  et de  $\text{Al}(\text{OH})_5^{2-}$ . En milieu alcalin (pH > 11), on trouve deux complexes anioniques  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  et  $\text{Al}(\text{OH})_5^{2-}$  qui deviennent majoritaires à pH > 12 [55].

Dans le cas du fer, on a les complexes tels que  $\text{FeOH}^{2+}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ ,  $\text{FeO}(\text{OH})$ ,  $\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{4+}$ ,  $\text{Fe}_2(\text{OH})_4^{2+}$  [51].

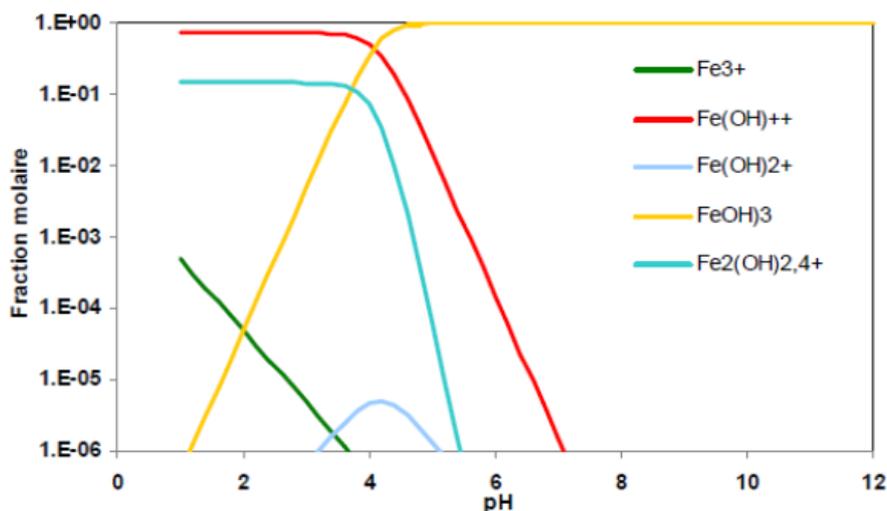


Figure II. 3 : Diagramme de prédominance des différents hydroxydes de fer trivalents [51].

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 [55].

Les complexes s'adsorbent sur les particules et annulent ainsi les charges colloïdales ce qui conduit à déstabiliser l'émulsion et à la formation de précipités, puis de floccs facilement éliminables. Au voisinage de la cathode, la réduction de l'eau provoque la formation de gaz hydrogène. Ce dégagement de gaz se présente sous formes de bulles, dont le diamètre est estimé à environ 10 à 100  $\mu\text{m}$ , et qui contribuent à l'agitation du milieu. Dans certains cas, lorsque l'installation est conçue dans le but de réaliser une floculation après électrocoagulation, ces bulles adhèrent aux solides formés en solution (adsorbant-polluant) et favorisent leur flottation [51].

Plusieurs travaux portant sur les procédés d'EC ont montré que la séparation des matières s'agglomérés en solution à l'issue de l'adsorption des polluants, peut se réaliser de deux façons [31] :

- ↳ Par décantation [52],
- ↳ Par flottation [52].

## **II.5 Principe lois de l'électrolyse**

Une des principales lois explicitant les réactions d'électrocoagulation est la seconde loi de Faraday (Eq. II-11). 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 [59].

$$m_{\text{théorique}} = \frac{M}{n} * \frac{I.t}{F} \quad (\text{Eq. II-11})$$

Avec :

$m_{\text{théorique}}$  : Masse théoriquement dissoute (g),

M : Masse molaire de l'ion considéré ( $\text{g.mol}^{-1}$ ),

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

I : Intensité imposée aux bornes des électrodes (A),

t : durée d'électrolyse (s),

F : constante de Faraday =  $96485,3 \text{ C.mol}^{-1}$

La loi de Faraday s'applique à toutes les réactions électrochimiques mais la quantité dissoute dépend également du nombre d'électrodes et du mode de connexion [59].

## **II.6 Les différents types d'électrodes et de connexion électriques**

Les d'électrodes les plus couramment utilisés dans le traitement des eaux par électrocoagulation ce sont les électrodes de fer et d'aluminium [27]. Plusieurs technologies d'électrocoagulation existent. Les cellules électrochimiques peuvent être montées en série ou en parallèle seules ou associées à d'autres types de procédés tels que les méthodes biologiques, les filtres presses, des décanteurs ou d'autres méthodes physiques de traitement. Au laboratoire ou en industrie, on trouve diverses géométries de plaques telles que les plaques planes, cylindriques, des lits fixes de billes sphériques, et des électrodes rotatives. Les électrodes planes offrent un montage et un nettoyage faciles des plaques surtout lorsque la dimension du réacteur atteint une certaine taille.

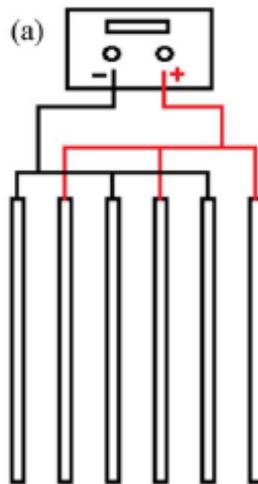
On distingue trois modes de connexion électrique : le mode monopolaire en série, le mode bipolaire en série et le mode monopolaire en parallèle. La différence entre les trois modes se trouve dans la connexion entre les électrodes qui entraîne une

différence des expressions des tensions et des intensités de courant dans les cellules [50].

➤ *Electrodes monopolaires*

- *La connexion monopolaire en parallèle*

La figure (II.4) montre un dispositif simple de cellule d'EC avec une paire d'anodes et une paire de cathodes disposées en parallèle.



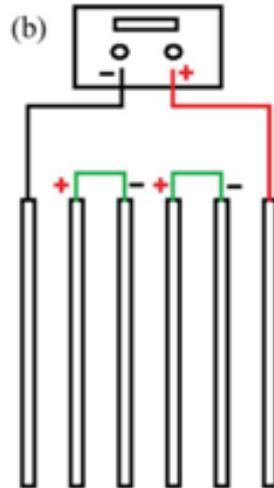
*Figure II. 4 : Connexion en parallèle d'électrodes monopolaires [60].*

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» [31]. L'anode sacrificielle réduit le potentiel de dissolution de l'anode et minimise la passivation de la cathode ; les électrodes sacrificielles peuvent être constituées des mêmes matériaux que l'anode ou de matières différentes [61].

Le mode de connexion monopolaire parallèle, on a  $n$  électrodes qui donnent  $n-1$  résistances montées en parallèles. Dans le cas où le générateur fournit une tension  $U$  et une intensité  $I$ , les cellules sont soumises à la même tension  $U$ . L'intensité qui passe à travers chaque résistance vaut  $I / (n-1)$  [50].

**- La connexion monopolaire en série**

Comme le montre la figure (II.5), 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.



**Figure II. 5 : Connexion en série d'électrodes monopolaires [60].**

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 [62].

La connexion monopolaire en série montre que l'utilisation de  $n$  électrodes présente  $n/2$  résistances (chacune définie par l'ensemble anode, électrolyte et cathode) en série. Si le générateur fournit une tension  $U$  et une intensité  $I$ , chaque résistance est traversée par un courant  $I$  et soumise à une tension  $U/2n$  [50].

➤ **Electrodes bipolaires série :**

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.6)

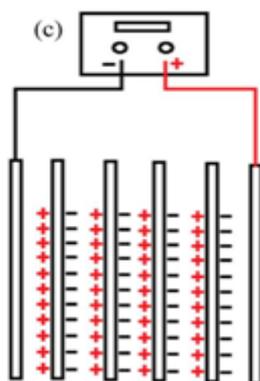


Figure II. 6 : Connexion des électrodes bipolaires [60].

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 [63].

La connexion bipolaire série présente des caractéristiques qui se rapprochent de la précédente connexion. Le même courant  $I$  passe à travers les résistances qui sont soumises à la tension  $U/(n-1)$ . On remarque toutefois une différence dans le nombre de résistances. Pour  $n$  électrodes, il y a  $(n-1)$  résistances [50].

Plusieurs modes de connexion ont été réalisées :

↳ Une étude comparative de configuration d'électrodes d'Aluminium et Fer sur la performance économique du traitement des eaux usées textiles par le procédé d'électrocoagulation (EC) a été réalisée par Bayramoglu et al. Les résultats ont montré que le mode monopolaire en parallèle (MP-P) était le plus rentable pour les électrodes Fe et Al. Ces électrodes ont montré des résultats similaires en termes d'efficacité d'élimination de la DCO et de la turbidité, mais l'électrode Fe était préférée en raison de son faible coût [53].

Une densité de courant élevée conduit à une consommation élevée du métal des électrodes et de l'énergie par l'effet de joule ; ce qui engendre un coût élevé du procédé. Cela, veut dire que la connexion monopolaire en parallèle (MP-P) est plus efficace par rapport à la connexion monopolaire en série (MP-S) et à la connexion bipolaire (BP) en terme de la consommation d'énergie.

- ↳ Une autre étude réalisée par Tiaiba et al, sur l'influence des modes de connexion des électrodes appliqués au traitement des rejets textiles en utilisant des électrodes en aluminium. Les résultats ont montré que la connexion parallèle monopolaire (MP-P) est la plus efficace sur tous les plans, y compris celui de la consommation d'énergie [64].

## **II.7 Les facteurs influençant de l'EC**

Plusieurs paramètres peuvent affecter l'efficacité du procédé d'EC telle que : le type d'électrode, la densité de courant, la quantité de charge, pH initiale de l'effluent, de la conductivité, de température, de matériau, de position des électrodes, de mode de connexion des électrodes, de concentration initiale et de nature de l'effluent à traiter [19, 62].

Dans cette partie, seuls les paramètres suivants seront abordés : la conductivité, quantité de charge (Intensité du courant), pH initial de l'effluent.

### **II.7.1 la conductivité**

La conductivité de l'électrolyte a aussi un impact sur le procédé d'EC; si elle est trop faible, la résistance de l'eau au passage de courant est forte, la consommation énergétique est très importante ; et sa température peut alors fortement augmenter. Pour ces différentes raisons, par analogie avec les exploitations d'installation d'électrocoagulation d'effluents industriels, l'ajout de chlorure de sodium est utilisé pour accroître la conductivité de la solution. L'ajout d'ions chlorure permet aussi d'éviter la passivation des électrodes. Le problème de conductivité constitue un inconvénient majeur au fonctionnement d'un procédé d'électrocoagulation [63].

- ↳ Tchamango et al, ont étudiées l'influence de la conductivité, ils montrent que ce paramètre diminue lors de l'électrocoagulation, mais croît quand on augmente la quantité de sulfate d'aluminium dans l'effluent. La diminution de la conductivité peut s'expliquer d'une part par l'élimination de certaines espèces conductrices contenues dans l'effluent par l'hydroxyde d'aluminium, et d'autre part par la diminution de l'acidité de l'effluent (augmentation du pH) suite à la production d'ions hydroxyle à la cathode qui neutralisent les

protons. En revanche, dans le cas de la coagulation chimique, l'hydrolyse des ions  $Al^{3+}$  produit des protons, qui augmentent la conductivité de l'effluent. Les ions sulfate générés lors de la dissolution du sulfate d'aluminium et qui n'interviennent pas dans le processus de coagulation contribuent également à accroître ce paramètre [65].

### **II.7.2 Le pH initial**

Le pH initial est également un paramètre clé à considérer lors du traitement par EC. Le pH de la solution détermine la spécification des ions métalliques. Le pH initial de l'effluent a un effet sur la conductivité de la solution, la dissolution des électrodes, le potentiel zêta, et les espèces de fer et d'aluminium formées. De plus, il peut avoir un impact sur les bulles d'hydrogène formés à la cathode. Ainsi le pH de la solution affecte le rendement global et l'efficacité de l'électrocoagulation [19, 66].

- ↪ Vepsäläinen et al a étudié l'influence de pH sur les performances du procédés d'électrocoagulation. Durant cette étude, ils remarquent que différentes espèces d'aluminium et de fer peuvent être formées en fonction du pH du milieu. Les espèces coagulantes les plus efficaces se forment dans les pH acides, neutres et légèrement alcalins [67].
- ↪ D'autre part, Guohua Chen, prouve que dans un milieu initialement basique, les ions  $H^+$  peuvent entraîner une diminution du pH de l'eau. Il a recommandé d'appliquer le procédé d'EC à des pH proches de la neutralité car l'élimination des polluants est plus efficace dans ces conditions [68].
- ↪ Cependant, Chen et al, indique que pour obtenir un bon rendement épuratoire, il est préférable de travailler à un pH qui permet la formation optimal d'hydroxydes métalliques d'aluminium solide. C'est-à-dire à des pH variant entre 5,8 et 7,4. Dans le cas des hydroxydes de fer, il est souhaitable de travailler à des pH supérieur à 5,5 [69].

### **II.7.3 Effet de quantité d'électricité**

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. L'intensité de courant appliquée dans un système d'EC détermine la quantité des ions  $Al^{3+}$  ou de  $Fe^{2+}$  libérée des électrodes.

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. L'efficacité du courant pour la dissolution d'une électrode d'aluminium par exemple a été calculée en utilisant la loi de Faraday [21].

- ↳ Plusieurs travaux tels que Adamovic et al, İrdemez et al .ont indiqué que l'augmentation de la densité du courant entraîne une augmentation du taux d'élimination de la turbidité et des polluants présents dans les effluents industriel [70, 71].
- ↳ Par ailleurs, d'autres auteurs tels que Picard et al, Sasson et al, montrent que la densité de courant est directement proportionnelle à la cinétique des réactions électrochimiques survenant à la surface de l'électrode. Les expériences réalisées avec une cathode en aluminium ont montré la formation d'hydrogène et expliquent que la dissolution des électrodes peut indiquer deux phénomènes dans les cellules électrochimiques, le premier est dû à une réaction électrochimique (réduction de l'eau), et le second résulte d'une réaction chimique expliquant la dissolution observée à la cathode et la principale réaction qui a lieu à des pH acides ou neutres [72, 73].
- ↳ Selon Merzouk et al, la densité du courant devrait être un effet important sur l'EC en particulier sur la cinétique de l'élimination de la turbidité : plus le courant est élevé, plus le traitement est court, la dissolution anodique de l'aluminium augmente, ce qui entraîne une plus grande quantité de précipité pour l'élimination des polluants [74].

### **II.8 Avantages et inconvénients de procédé d'EC**

De nombreux auteurs ont comparé le procédé d'EC aux procédés physico-chimiques classique réalisé par l'addition de coagulants chimiques tels que le sulfate d'aluminium et le chlorure ferrique, l'EC a ses avantages et ses inconvénients [52, 59, 75] :

↳ **Les avantages :**

- Equipement simple et facile à utiliser,
- Amélioration de la biodégradabilité des effluents,
- Les solutions traitées donnent une eau agréable au goût, claire, incolore et inodore,
- Pas d'addition de salinité ou de pollution secondaire car pas d'ajouts de produits chimiques,
- Action des ions formés plus rapide que l'action du coagulant classique,
- Les bulles de gaz générées lors de l'électrolyse entraînent la flottation des polluants, et par conséquent leur séparation est facilitée,
- Décantation plus rapide des floccs formés avec le fer et flottation facile avec l'aluminium
- Volume des boues obtenues plus faibles ont principalement composées d'oxydes/hydroxydes métalliques, ce qui les rend facilement,
- Les floccs formés sont beaucoup plus grands que ceux produits par la coagulation chimique, contiennent moins d'eau liée et sont résistants aux acides et plus stables,
- Destruction de la flore bactérienne par le champ magnétique d'où un effet bactéricide,
- L'EC permet de réduire le temps de traitement : ce procédé permet un grand gain en compacité des installations et une possibilité d'automatisation.

↳ **Les inconvénients :**

- les anodes sacrificielles, qui sont oxydées, doivent être remplacées périodiquement.
- l'électricité n'est pas toujours facilement disponible et elle est chère dans certaines régions
- la passivation diminue l'efficacité de l'EC
- la conductivité souvent faible de l'eau polluée et la formation des dépôts sur les électrodes (La nécessité d'une eau à haute conductivité)

## II.9 Etude faites sur l'EC

Un grand nombre des travaux fondamentaux ou plus appliqués pour le traitement de nombreux effluents liquides par le procédé d'électrocoagulation ont été entrepris. Le tableau II-1 regroupe quelques exemples significatifs.

*Tableau II. 1 : Quelques exemples d'applications de l'EC.*

<b>Auteurs</b>	<b>Type d'électrodes et mode de connexion</b>	<b>Condition optimale</b>	<b>Effluents traitée</b>	<b>Efficacité</b>
Kumar et al. (2004) [76]	Trois types d'électrodes : le Fer, l'Aluminium et Titanium	l'utilisation des électrodes de fer, pH de 6 à 8.  La densité de courant varie entre 0,65 à 1,53 mA/cm <sup>2</sup>	L'eau chargée de (As)	Taux élimination de l'arsenic est de 99 %
Bektaş et al (2004) [77]	Al	C <sub>0</sub> = 100 mg /L, pH= 6.2,  i = 10 mA/cm <sup>2</sup> et  t = 15 min	Solution aqueuse	Taux d'élimination des phosphates est de 90 %
Dimoglo et al. (2004) [78]	Electrodes d'Aluminium et de Fer	Une tension de 12 V  pH= 7.6  i= 15 mA /cm <sup>2</sup>  t= 10 min	Les eaux usées de l'industrie pétrochimique	L'élimination de la turbidité est de 88 %  L'élimination maximale de la DCO 80 %  L'élimination des hydrocarbures 80 %
Lai et Lin (2004) [79]	Electrodes Al / Fe	t= 30 min  pH = 7.3  potentiel de cellule est 30 V	Eaux usées de polissage mécanique et chimique (PMC) d'une usine de semi-conducteurs	Taux d'élimination de la turbidité est de 96,5 %  la DCO est de 88,7 % et le cuivre 99 %

Ugurlu (2008) [80]	Plaques de fer et d'aluminium	pH = 7.6 potentiel de cellule est 12 V $i = 4,8 \text{ mA/cm}^2$ $I = 77,13 \text{ mA}$ $t = 2 \text{ min}$	Effluents d'une usine de papier	L'élimination de 98 % du phénol, 70 % de la DBO et 75 % de la DCO avec l'utilisation des électrodes en Al et 93 %, 80 % et 55 % pour le phénol, DBO et DCO Respectivement avec utilisation des électrodes en Fe
Nigri et al (2020) [81]	Configuration monopolaire ou biopolaire avec l'utilisation des électrodes en Al	$S = 200 \text{ cm}^2$ $I = 3,0 \text{ A}$ $i = 7,5 \text{ mA/cm}^2$	Effluents liquides provenant de l'industrie pétrolière	Élimination de 52 % de la matière organique, 88 % du calcium et 72 % du strontium.
Mollah et al. (2010) [82]	Électrodes sacrificielles de l'aluminium	densité de courant = $160 \text{ A/m}^2$ $C_{\text{NaCl}} = 4 \text{ g/L}$ $\text{pH}_i = 6.5$ débit = $350 \text{ mL/min}$	Solution de colorant orange II	Une efficacité d'élimination maximale est de 94,5 %
Parama Kalyani et al (2009) [83]	Électrodes en acier et en aluminium	pH= 5 $i = 10 \text{ mA/cm}^2$ $t = 15 \text{ min}$	Les eaux usées issues des rejets papeterie	Taux d'abattement de la couleur est de 92 % et 84 % pour l'électrode d'acier et d'aluminium respectivement et des taux d'abattement de la DCO de 95 % et 89 % pour les mêmes électrodes
Shafaei et al (2010) [84]	Électrodes d'aluminium	pH= 7, $t = 30 \text{ min}$ , $i = 6.25 \text{ mA/cm}^2$ et une concentration initiale de $\text{Mn}^{2+}$ de $100 \text{ mg/L}$ .	L'élimination de manganèse à partir des solutions synthétiques	Concentration du polluant diminue d'environ 99 % par rapport à la concentration initiale

Koby et al (2010) [85]	Électrodes d'aluminium et de fer	pH 5, $i = 60 \text{ A/m}^2$ $t = 25 \text{ min}$ pour l'Al pH= 3, $i = 60 \text{ A/m}^2$ $t = 15 \text{ min}$ pour le Fe	Les eaux de rinçage riche en phosphate et en Zinc d'une usine de véhicules	Taux d'abatte-ments de 99.8 % et 96.7 % de phosphates et du Zinc respectivement pour les électrodes en Al  Abatte-ments de 97.7 % et 97.8 % des phosphates et du Zinc respectivement pour le Fe
Malakootian et al (2010) [86]	Utilisation des électrodes en fer, mode monopolaires en connexion parallèle	pH = 10, une tension de 12V $t = 60 \text{ min}$	Eau potable de la ville d'Anar	98.2 % d'élimination de calcium et 97.4 % de la dureté totale
Bener et al (2019) [87]	Al et Fe, monopolaire	L'électrode en Al, $i = 25 \text{ mA/cm}^2$ , pH= 5	Les eaux usées textiles réelles traitées in situ	Rendements d'élimination du COT de 42,5 %, DCO de 18,6 %, la turbidité de 83,5 %, 64,7 % de MES et de 90,3 à 94,9 % de la couleur.
Papadopoulo s et al (2019) [88]	Al et Fe mode parallèle monopolaire	Al, $i = 41.67 \text{ mA/cm}^2$ , $t = 15 \text{ min}$	Eaux usées des encres d'imprimerie réelles	75 % d'élimination de la DCO, ~99 % d'élimination des couleurs
Drogui et al. (2007) [89]	Fe et Al  Configuration Biopolaire  configuration monopolaires (MP) et (BP)  Al et acier	$I = 2,0 \text{ A}$ $i = 5,0 * 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ pour (MP)  et $i = 19 * 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ pour (BP) $t = 90 \text{ min}$ $S = 110 \text{ cm}^2$	Effluent d'agro-industries	L'efficacité de traitement en régime monopolaire est de 85 à 86 % d'abattement de la DCO.

Koby et al (2003) [90]	Fe et Al, Connexion monopolaire	i= 150 A/m <sup>2</sup> cas d'Al i = [80-100 A/m <sup>2</sup> ] cas de Fe t= 10 min pH <6, efficacité d'élimination par Al	Effluent textiles	98 % d'abattement de la turbidité, 77 % de la DCO.
Daneshvar et al (2003) [91]	Fe	C <sub>0</sub> = 50 ppm t= 15 min d=2 cm, s= 0.0106 cm <sup>2</sup> pH= 8 i= 34.6 A/m <sup>2</sup>	Couleur orange (II) en solution aqueuse	Plus de 84 % d'élimination de DCO, plus de 98 % d'élimination de couleur

## II.10 Conclusion

Suite à cette étude bibliographique, il s'avère que l'EC est un procédé très intéressant et efficace pour le traitement de divers types d'eaux usées, en raison de plusieurs avantages, contribuant à l'élimination de plusieurs composés d'origines différents, de turbidité, de conductivité ainsi que d'autre paramètre (MES, DCO, DBO et la dureté).

Le choix d'une technique de traitement des effluents est régi par différents paramètres tels que : le type de polluants, leur concentration, leur toxicité et le volume à traiter. EC se caractérise par un fonctionnement facile, un équipement simple et un temps de fonctionnement court.

Cependant, l'élimination de la pollution par l'EC résulte de la combinaison de mécanismes complexes (colloïdal, déstabilisation, adsorption) qui met à profit un éventail de phénomènes physiques et chimiques pour entraîner l'abattement des polluants dans l'effluent.

**Synthèse bibliographique sur  
l'élimination des phosphates  
par électrocoagulation**

### **III. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'ÉLIMINATION DES PHOSPHATES PAR ÉLECTROCOAGULATION**

La protection de l'environnement aquatique vis-à-vis de l'eutrophisation est aujourd'hui une préoccupation majeure; ce phénomène est lié au déversement d'eaux usées chargés en nutriments (phosphates et nitrates) dans le milieu naturel, entraînant une croissance excessive des algues, une faible teneur en oxygène conduit à la mortalité des poissons, voire, déséquilibre de l'écosystème.

Cependant, la présence de phosphore en solution aqueuse rend nécessaire un prétraitement par l'électrolyse dans lequel diminue leur toxicité et augmente leur biodégradabilité. Le traitement des effluents liquide est donc important non seulement pour la préservation de l'environnement, mais aussi pour le recyclage de l'eau utilisée dans les processus industriels.

Plusieurs études ont été réalisées, dans le but d'éliminer les phosphates présents dans les eaux usées provenant des différents secteurs, par le procédé d'électrocoagulation, ainsi que le choix des électrodes utilisé et les facteurs influençant le traitement.

Ce traitement est-il efficace pour l'élimination des phosphates ?

D'après la littérature, plusieurs paramètres peuvent affecter l'efficacité du procédé d'électrocoagulation. Cette partie que nous avons entreprise a consisté en synthèse de l'effet d'un certain nombre de paramètres sur l'efficacité du traitement des phosphates, d'un rejet laitier. Parmi les paramètres retenus pour cette synthèse, nous citons, entre autres, la densité du courant, le pH initial, la nature du matériau constituant l'électrode, la distance inter-électrode, la nature et la concentration de l'électrolyte et la concentration initiale de l'échantillon.

De toute évidence pour le procédé EC, du point de vue électrochimique, la sélection du matériau constituant les électrodes est particulièrement importante. Différentes configurations d'électrodes peuvent être utilisées pour l'application de techniques de traitement électrochimiques ; néanmoins les plus usuellement utilisées sont les formes planes pour leur commodité d'utilisation et de remplacement.

Quand en mode opératoire est identique pour tous les articles que nous avons pris pour réaliser cette synthèse. La configuration de réacteur électrochimique est en mode monopolaire, les électrodes utilisées sont en Aluminium ou en Fer. La seule différence réside à la surface des électrodes et à la distance inter-électrodes qui diffèrent d'un auteur à un autre.

L'étude réalisée par Koukkanen et al, Lacasa et al, est basée sur l'élimination des phosphates par le procédé d'électrocoagulation, utilisant des électrodes en Al et Fe, Les dimensions des plaques d'électrode rectangulaire utilisées dans les expériences réalisées par koukkanen étaient de 10 mm × 50 mm × 50 mm et la distance inter électrode est fixée à 7 mm. Par contre, Les électrodes utilisées par lacasa étaient de forme carrée, la surface d'électrode est de 100 cm<sup>2</sup>, la distance inter électrode est fixée à 9 mm. Ce dernier a étudié une large gamme de densité de courant allant de 0.1 à 5.0 mA.cm<sup>-2</sup> pour le traitement des échantillons d'une eau synthétique composée de phosphate de sodium (27 mg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P dm<sup>-3</sup>) sous forme de Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O et de sulfate de sodium (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>=500 mg dm<sup>-3</sup>) comme électrolyte support afin d'augmenter la conductivité de la solution [92, 93].

Cependant, Tchamango et al, vise à examiner l'efficacité du traitement des effluents laitière à l'aide d'électrode en Al, utilisée une paire d'électrodes en aluminium de 10 cm×4 cm×0,5 cm, immergées à une profondeur de 5 cm [6].

Le pH initial est connu comme l'un des principaux facteurs qui contrôle les performances du procédé d'électrocoagulation.

Lors de traitement par EC, Tchamango et Kokannen, indiquent, l'étude de l'effet de pH sur l'efficacité de traitement par EC, nécessite l'ajustement de pH entre 5 et 6,5 (pH neutre), cette plage de pH donne de bons résultats puisque la forme métallique produite est maximale ; ceci est confirmée par plusieurs études. Pour des pH acides ou basiques, l'effet du pH est moins important sur l'élimination des paramètres de pollution. La baisse de l'abattement des paramètres en milieu acide ou basique est en accord avec le caractère amphotère de l'hydroxyde d'aluminium Al(OH)<sub>3</sub> et l'hydroxyde de fer Fe(OH)<sub>3</sub> qui précipite à pH neutre et dont la solubilité augmente quand le milieu devient plus acide ou plus basique [6, 92].

Quant à la conductivité les auteurs privilégient de travailler avec une faible conductivité, qui permettra de recycler les eaux industriels ; et récupérer des boues de meilleures qualités contenant une quantité importante de phosphore, résistante aux acide, beaucoup plus grand et plus stable, facile à décanter et a filtré et enfin produirait une eau claire et incolore et concéderai EC comme une technologie verte puisqu'aucune pollution secondaire n'est produite. Les auteurs rajoutent que le traitement par EC est plus avancé, plus écologique, plus efficace et plus avantageux par rapport aux méthodes conventionnelles qui sont souvent coûteuses avec efficacité limite.

De plus, Tchamango et al réalise une étude comparative entre l'électrocoagulation et la coagulation chimique pour le traitement d'une solution synthétique de lait, l'EC du phosphate est réalisée avec des solutions de  $10^{-2}$  M (980 mg/L) et de  $2,10^{-2}$  M (1960 mg/L) de  $H_3PO_4$ . Le temps d'électrolyse était de 40 à 80 min et  $10^{-2}$  M chlorure de sodium (NaCl) comme électrolyte, les résultats d'élimination du phosphore indique que l'élimination par la coagulation chimique utilisant le sulfate d'aluminium comme coagulant avec un pH= 6,5 est légèrement plus élevé par rapport à l'électrocoagulation, un taux d'abattement de phosphates est observé à 89 %, 94 % par électrocoagulation, coagulation chimique respectivement [6].

Irdemez et al, ont utilisé la méthode Taguchi pour déterminer les conditions optimales d'élimination du phosphate provenant des eaux usées telle que l'effet de la concentration initiale de phosphate, du pH initial, la concentration de l'électrolyte support et de la densité de courant sur l'efficacité de l'électrocoagulation en utilisant des électrodes en aluminium. Ce dernier a utilisé une unité d'électrocoagulation qui se compose de six paires d'électrodes en aluminium sous forme de plaque avec une surface totale d'environ  $1500\text{ cm}^2$  et l'espace entre chaque électrode est de 5 mm. L'étude porte plus particulièrement l'influence des effets de ces paramètres sur la performance du système en fonction de l'efficacité de l'élimination afin de choisir les conditions optimales. Dans ce contexte l'efficacité d'élimination des phosphates atteint un rendement de 100 % pour les conditions optimales de concentration=50 mg/L, pH= 6, la concentration de l'électrolyte support (NaCl)= 4,5 mM et la densité de courant=1 mA/cm<sup>2</sup> [94].

De plus, le processus d'électrocoagulation utilise moins de réactifs: la masse de l'anode en aluminium dissoute pendant le traitement est inférieure à la quantité de sel d'aluminium utilisé dans la coagulation chimique. Ces deux observations montrent clairement que l'électrocoagulation est une technique plus performante par rapport à la coagulation chimique.

Pour le procédé EC, la densité du courant est jugée comme un paramètre essentiel, spécifiquement pour l'abattement des paramètres de pollution. En revanche, Lacasa a étudié l'influence de la densité de courant sur l'élimination des phosphates, les résultats montrent que l'efficacité de traitement dans le cas des électrodes en Fer augmente et s'améliorent lorsque la densité de courant est plus faible, contrairement aux électrodes en aluminium, la densité de courant a eu une influence plus faible sur les résultats obtenus comparativement aux électrodes en fer [93].

Par contre, Kokkanen a testé plusieurs valeurs de densité de courant allant de 25 à 100 A/m<sup>2</sup>, pour une durée d'électrolyse de 30 minutes avec l'utilisation d'une anode en aluminium sur un volume d'eau contenant 30 mg/L de phosphate et 1 g/L de NaCl, ces expériences ont été réalisées avec un débit de recirculation de l'eau maintenu à sa valeur maximale environ 6,1 à 6,4 L/min. La surface immergée de l'anode métallique est de 0,62 m<sup>2</sup> [92].

Les résultats montrent que toutes les densités de courant étaient suffisantes pour éliminer presque totale de phosphates des eaux usées d'une industrie laitière. La densité de courant optimal est observée pour une valeur de 100 A/m<sup>2</sup> et une durée d'électrolyse de 15 minutes. Donc, les conditions optimales trouvées par Kokkanane pour éliminer 96 % des phosphates utilisant des électrodes Al/Fe sont : 100 A/m<sup>2</sup>, pH= 5 et un temps d'électrolyse de 15 min [92].

D'une manière générale, il a été établi que lorsque la densité de courant augmente, le temps de traitement diminue en raison de la forte dissolution des électrodes.

Le tableau suivant récapitule les conditions optimales pour différents auteurs.

**Tableau III. 1 : Conditions optimales pour différents auteurs**

<b>Auteurs</b>	<b>Type d'effluent traité</b>	<b>Mode de connexion</b>	<b>Type d'électrode utilisé</b>	<b>Conditions optimales</b>	<b>résultats</b>
Kuokkanen et al (2015) [92]	Eaux usées industrielles (minières et laitière)	Mode monopolaire	Al/Fe	$C_0 = 30 \text{ mg/L}$ $S = 0,62 \text{ m}^2$ , $\text{pH}_i = 5$ , $i = 100 \text{ A/m}^2$ , $t = 15 \text{ min}$ , $d = 7 \text{ mm}$ et $1,0 \text{ g/L}$ de NaCl.	Efficacité d'élimination des phosphates est de 96 %.
Lacasa et al (2011) [93]	Eaux usées synthétiques contenant des rejets laitiers	Mode monopolaire	Fe et Al	$i = 1 \text{ mA/cm}^2$ , $S = 100 \text{ cm}^2$ , $d = 9 \text{ mm}$ .	Elimination complète des phosphates
Tchamango et al (2010) [6]	Effluents laitiers synthétique	Mode monopolaire	Al	Faible conductivité, $\text{pH}$ neutre, $t = 30 \text{ min}$ , $i = 0,43 \text{ A/dm}^2$ , $I = 0,2 \text{ A}$ .	Efficacité d'élimination de phosphore est de 89 %.
İrdemez et al (2006) [94]	Eaux usées	Mode monopolaire	Al	$C_0 = 50 \text{ mg/L}$ , $\text{pH} = 6$ , $d = 5 \text{ mm}$ $S = 1500 \text{ cm}^2$ $i = 1 \text{ mA/cm}^2$ et $4, 5 \text{ mM}$ de NaCl	Efficacité d'élimination du phosphate à 100 %

Avec:

$pH_i$  = pH initial,

$C_0$  = Concentration initial,

$i$  : Densité de courant,

$t$  : Temps de traitement,

$d$  : La distance inter électrode,

$S$  : La surface immergée des électrodes,

$I$  : Intensité de courant.

### **Conclusion**

La synthèse bibliographique sur des travaux ultérieurs montre que l'électrocoagulation est un procédé relativement approprié pour l'élimination des phosphates provenant des industries laitières ou les eaux usées ceci avec l'utilisation des électrodes d'aluminium ou de fer. L'EC est avéré une technologie réalisable pour produit une eau claire et incolore.

Les facteurs les plus importants qui influencent l'efficacité de l'électrocoagulation sont : les matériaux constituant l'électrode, le pH initial de l'eau à traitée, type et concentration des polluants, le type et la concentration de l'électrolyte support, la densité de courant et le temps d'électrolyse.

# **Conclusion générale**

## CONCLUSION GÉNÉRALE

À la lumière de ces résultats bibliographiques, nous pouvons conclure que les effluents de laiteries constituent une contrainte environnementale qui se manifeste par un rejet chargé de matière organique et minérale et sur tous phosphatés. L'électrocoagulation utilisant des électrodes en aluminium ou en fer est un procédé qui s'applique parfaitement aux rejets caractérisés par une grande stabilité et une importance charge.

L'étude entreprise sur le traitement par électrocoagulation nous a conduits aux conclusions suivantes :

- ↳ Quant au pH il a été établi par plusieurs auteurs que quand celui-ci est voisin de la neutralité (5,5 à 7,5) permet la formation optimale d'hydroxydes métalliques d'aluminium solide et les efficacités de traitement sont optimales. Dans le cas des hydroxydes de fer, il est souhaitable de travailler à des pH supérieurs à 5,5.
- ↳ L'ajout d'un électrolyte support est préférable pour augmenter la conductivité de la solution et par conséquent l'efficacité du procédé électrocoagulation augmente aussi. Les électrolytes communément utilisés sont le sulfate de sodium et chlorure de sodium.
- ↳ Quant à la densité de courant (intensité de courant), plusieurs travaux, indiquent que l'augmentation de la densité du courant entraîne une augmentation du taux d'élimination des paramètres de pollution (phosphate, DCO, Turbidité,...etc), et diminution de temps d'électrolyse.

La synthèse bibliographique montre que l'électrocoagulation est un procédé relativement approprié pour l'élimination des phosphates provenant des industries laitières ou les eaux usées ceci avec l'utilisation des électrodes d'aluminium ou de fer. L'EC est avéré une technique réalisable pour produire une eau claire et incolore.

# **Références bibliographiques**

**RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] Ahmed, K. Traitement des eaux usées urbaines et leurs réutilisations en Agriculture: Etat de l'art. 2017, pp 07-08.
- [2] Kothari, R., Pathak, V. V., Kumar, V., & Singh, D. P. Experimental study for growth potential of unicellular alga *Chlorella pyrenoidosa* on dairy waste water: an integrated approach for treatment and biofuel production. *Bioresource technology*, 2012, vol. 116, p. 466-470.
- [3] J. Akansha, P.V. Nidheesh, A. Gopinath, K.V. Anupama, M. S. Kumar, Treatment of dairy industry wastewater by combined aerated electrocoagulation and phytoremediation process, *Chemosphere*, 253, (2020), 126652, (India).
- [4] Daumer, Marie-Line. Analyse des transformations du phosphore lors du stockage et du traitement biologique et physico-chimique des lisiers de porc en vue d'un recyclage. 2007. Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.
- [5] Ali, S. M., Sabae, S. Z., Fayez, M., Monib, M., & Hegazi, N. A. The influence of agro-industrial effluents on River Nile pollution. *Journal of Advanced Research*, 2011, vol. 2, no 1, p. 85-95.
- [6] S. Tchamango, C. P. Nanseu-Njiki, E. Ngameni, D. Hadjiev, A. Darchen, Treatment of dairy effluents by electrocoagulation using aluminium electrodes, *Science of the Total Environment*, (2010), vol. 408, no 4, pp. 947-952 (France).
- [7] Sinha, S., Srivastava, A., Mehrotra, T., & Singh, R. A review on the dairy industry waste water characteristics, its impact on environment and treatment possibilities. In *Emerging Issues in Ecology and Environmental Science : Case Studies from India*. Springer, Cham, (2019). pp. 73-84.
- [8] El Ghammat A, Tamsamani Riffi K, Hassani Zerrouk M, Etude de la performance d'une station a bioreacteur sequentiel pour le traitement des effluents laitiers, *Larhyss Journal* P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782, n°37, Mars 2019, pp. 7-21 (Maroc).

- [9] J.L. Burgaud. Les eaux résiduaires dans l'industrie laitière. Le Lait, INRA Editions, 1969, vol 49, no 487, pp.417-433.
- [10] Djelal, H., Rigail, M., & Boyer, L. Les effluents industriels et leur traitement. Management Avenir, 2008, no 6, pp. 275-288.
- [11] Moletta, R., & Torrijos, M. Impact environnemental de la filière laitière. Techniques de l'ingénieur. Agroalimentaire, 1999, vol 2, no F1500, F1500-1.
- [12] Hamdani, A., Moufti, A., Mountadar, M., & Assobhei, O. Évolution de la qualité physico-chimique et bactériologique d'un effluent laitier sur un cycle annuel, 2005 (Maroc).
- [13] Benaissa, M. Valorisation du lactosérum pour les bactéries lactiques, 2018, Thèse de doctorat. Université d'Oran1-Ahmed Ben Bella.
- [14] G.Crini, P.M .Badot, traitement et épuration des eaux industrielles polluées, procédés membrane, bioadsorption et oxydation chimique, Presses Univ. Franche-Comté, 2007, pp 23-24.
- [15] Bernard, C. Revalorisation par l'alimentation animale de la biomasse issue du traitement des eaux usées de l'industrie agro-alimentaire, 1980, mémoire, 1980, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique.
- [16] Pougheon, S. Contribution à l'étude des variations de la composition du lait et leurs conséquences en technologies laitières, 2001, Thèse de doctorat, Paris.
- [17] Ahmad, T., Aadil, R. M., Ahmed, H., ur Rahman, U., Soares, B. C., Souza, S. L., ... & Freitas, M. Q. Treatment and utilization of dairy industrial waste: A review. Trends in Food Science & Technology, 2019, vol 88, 361-372.
- [18] El Hanafi, N. Etude paramétrique et optimisation du traitement d'émulsions de lait par le procédé d'électrocoagulation, 2010, mémoire de magister, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediène.
- [19] Sanni, I. B. O. Combinaison des procédés d'électrocoagulation et d'électro-oxydation pour le traitement des eaux usées résiduaires issues des opérations de nettoyage de cuves industrielles. 2018, mémoire, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique.

- [20] Moreno-Casillas, H. A., Cocke, D. L., Gomes, J. A., Morkovsky, P., Parga, J. R., & Peterson, E. Electrocoagulation mechanism for COD removal, *Separation and Purification Technology*, 2007, vol 56, no 2, pp 204–211
- [21] Daghrir, R. Développement d'un procédé hybride d'oxydation électrolytique et d'électrocoagulation pour le traitement des eaux usées non connectées à des infrastructures communautaires, 2010, mémoire, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique.
- [22] Hashim, K. S., Al Khaddar, R., Jasim, N., Shaw, A., Phipps, D., Kot, P., ... & Alawsh, R. Electrocoagulation as a green technology for phosphate removal from river water. *Separation and Purification Technology*, 2019, vol 210, pp 135-144.
- [23] Ouakouak, A. Elimination du cuivre, des nitrates et des phosphates des eaux par adsorption sur différents matériaux, 2017, Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra.
- [24] Deronzier, G., & Choubert, J. M. Traitement du phosphore dans les petites stations d'épuration à boues activées. Document technique FNDAE, 2004, vol. 29.
- [25] Commission Européenne, Août 2006, BREF « Industries agro-alimentaires et laitières.  
[https://aida.ineris.fr/sites/default/files/directive\\_ied/fdm\\_bref\\_0806\\_VF\\_0.pdf](https://aida.ineris.fr/sites/default/files/directive_ied/fdm_bref_0806_VF_0.pdf) visité le 15/08/2020 à 22:34
- [26] Branger, A. Alimentation et processus technologiques. Educagri Editions, 2007, pp. 186-195.
- [27] Asselin. M, Utilisation de l'électrocoagulation dans le traitement des eaux usées industrielles chargées en matière organique, université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, 2007.
- [28] A. Tanik, E.A. Genceli, A. Ekdal, Chemical treatability of dairy wastewater, *Environment Management and Health*, 2002, vol 13, no 2, pp 163-174.,
- [29] Şengil, İ. A, et al. Treatment of dairy wastewaters by electrocoagulation using mild steel electrodes. *Journal of hazardous materials*, 2006, vol. 137, no 2, pp 1197-1205.

[30] Aitcheikh, A., Boutaleb, N., Bahlaouan, B., Bennani, M., Lazar, S., & El Antri, S. Utilisation d'un lit fixe d'origine naturelle pour le traitement biologique d'effluents laitiers. *Déchets sciences et techniques*, 2018, vol 78

[31] Lemlikchi, W. Elimination de la pollution des eaux industrielles par différents procédés d'oxydation et de co-precipitation, 2012, Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri

[32] L. Loperena, M. D. Ferrari, V. Saravia, D. Murro, C. Lima, L. Ferrando, A. Fernandez et C. Lareo. Performance of a commercial inoculum for the aerobic biodegradation of a high fat dairy wastewater , *Bioresource Technology*, 2007, vol. 98, no 5, p. 1045-1051.

[33] Eloutassi, N., Louasté, B., Boudine, L., Chaouch, M., & Mersenne, S. E. Production de biogaz à partir d'un effluent laitier dans un bioréacteur à deux phases. *Scientifical*, 2014, vol 1292.

[34] T. Arnaud. Traitement des effluents de laiterie de montagne par digestion anaérobie : retour d'expérience de la coopérative laitière d'Entremont le vieux (73), *L'eau, l'industrie et les nuisances*, numéro thématique les traitements anaérobies, 2008, pp 32-34.

[35] Balannec, B, Vourch, M, Chaufer, B, et al. Nanofiltration and reverse osmosis of model process waters from the dairy industry to produce water for reuse. *Desalination*, 2005, vol. 172, no 3, p 245-256

[36] Petrinic, I., Korenak, J., Povodnik, D., & Hélix-Nielsen, C. A feasibility study of ultrafiltration/reverse osmosis (UF/RO)-based wastewater treatment and reuse in the metal finishing industry, *Journal of cleaner production*, 2015, vol 101, p 292-300.

[37] Andreottola, G., Foladori, P., Ragazzi, M., & Villa, R.. Dairy wastewater treatment in a moving bed biofilm reactor. *Water science and technology*, 2002, vol. 45, no 12, p. 321-328.

[38] Hebabaze, S., Brand, C., Moutaib, Z., Riechelmann, C., Raffy, S., Kraume, M., & Chlaida, M. Etude des performances d'un réacteur biologique séquentiel" SBR" pour le traitement des effluents d'une entreprise agroalimentaire marocaine [Performance of a Sequencing Batch Reactor for the Treatment of Food Industry

Wastewater in Morocco]. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 2014, vol. 9, no 2, p. 744.

[39] Menoret, C. Traitement d'effluents concentrés par cultures fixées sur gravier ou pouzzolane, 2001, Thèse de doctorat, Doctorat Mécanique génie mécanique génie civil, Université Montpellier II Sciences et techniques du Languedoc.

[40] Ayeche, R et Balaska, A. Caractérisation et traitement par coagulation-floculation d'un effluent de laiterie. *Journal of Algerian Chemical Society*, 2010, vol. 20, no 2, p. 83-93.

[41] Balannec, B, Gésan-Guiziu, G, Chaufer, B, et al. Treatment of dairy process waters by membrane operations for water reuse and milk constituents concentration; *Desalination*, 2002, vol. 147, no 1-3, p 89-94.

[42] Turan, M. Influence of filtration conditions on the performance of nanofiltration and reverse osmosis membranes in dairy wastewater treatment, *Desalination*, 2004, vol. 170, no 1, p 83-90.

[43] Luo, J., Cao, W., Ding, L., Zhu, Z., Wan, Y., & Jaffrin, M. Y. Treatment of dairy effluent by shear-enhanced membrane filtration: the role of foulants. *Separation and Purification Technology*, 2012, vol. 96, p194-203.

[44] Petrinic, I., Korenak, J., Povodnik, D., & Hélix-Nielsen, C. A feasibility study of ultrafiltration/reverse osmosis (UF/RO)-based wastewater treatment and reuse in the metal finishing industry. *Journal of cleaner production*, 2015, vol. 101, p 292-300.

[45] Darban, A. K., Shahedi, A., Taghipour, F., & Jamshidi-Zanjani, A. A review on industrial wastewater treatment via electrocoagulation processes. *Current Opinion in Electrochemistry*, 2020.

[46] Belayachi, A, Elimination d'un colorant anionique par adsorption, électrocoagulation, fenton, thèse de doctorat, 2016/2017, université Abdelhamid Ibn Badis, Mostghanem

[47] Holt, P. K., Barton, G. W., & Mitchell, C. A. The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *Chemosphere*, 2005, vol. 59, no 3, p. 355-367.

[48] Slimane, B. Traitement D'une Eau De Surface Par Electrocoagulation, 2010, mémoire de magister, Université 8 mai 1945 de Guelma.

[49] García-Yuste, S. Sustainable and Environmentally Friendly Dairy Farms, Springer Briefs in Applied Sciences and Technology, ISSN 2191-5318, pp74-75.

<https://doi.org/10.1007/978-3-030-46060-0>

[50] Zongo, I. Étude expérimentale et théorique du procédé d'électrocoagulation: application au traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie, Thèse de doctorat, 2009, Institut National Polytechnique de Lorraine.

[51] Zodi, S. Étude de l'épuration d'effluents de composition complexe par électrocoagulation et des couplages intervenants entre le traitement électrochimique et l'étape de séparation: application à l'industrie textile et papetière, 2012, Thèse de doctorat. Université de Lorraine.

[52] Bennajah, M. Traitement des rejets industriels liquide par électrocoagulation/électroflottation en réacteur airlift, 2007, Thèse de doctorat.

[53] Bayramoglu, M., Kobya, M., Can, O. T., & Sozbir, M. Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. Separation and Purification Technology, 2004, vol. 37, no 2, p. 117-125.

[54] Al Aji, B., Yavuz, Y., & Koparal, A. S.. Electrocoagulation of heavy metals containing model wastewater using monopolar iron electrodes. Separation and Purification Technology, 2012, vol. 86, p. 248-254.

[55] Ammouche, A et Slimani, Y. Déphosphatation des eaux usées par le procédé d'électrocoagulation, 2017, mémoire de master, université de Bouira.

[56] Ghernaout, D., Alghamdi, A., & Ghernaout, B. Electrocoagulation process: A mechanistic review at the dawn of its modeling. Journal of Environmental Science and Allied Research, 2019, vol. 2, p. 51-67.

[57] Odongo, I. E., & McFarland, M. J.. Electrocoagulation treatment of metal finishing wastewater. Water Environment Research, 2014, vol. 86, no 7, p. 579-583.

- [58] Aidaoui, D & Kouadri, A. Degradaation D'un Colorant Le Gentiane Violet Par La Technique De L'électrocoagulation. 2018, Mémoire Master. Université Akli Mouhend-Oulhadj De Bouira.
- [59] Pallier, V. Elimination de l'arsenic par coagulation floculation et électrocoagulation d'eaux faiblement minéralisées. 2008. Thèse de doctorat. thèse Pour obtenir le grade de Docteur de l'université de Limoges.
- [60] Garcia-Segura, S., Eiband, M. M. S., de Melo, J. V., & Martínez-Huitle, C. A. (2017). Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2017, vol. 801, p. 267-299.
- [61] Mollah, M. Y., Morkovsky, P., Gomes, J. A., Kesmez, M., Parga, J., & Cocke, D. L. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of hazardous materials*, 2004, vol. 114, no 1-3, p. 199-210.
- [62] Meriem, A. Utilisation de l'électrocoagulation pour l'élimination de colorants des eaux usées de l'industrie textile. 2017, Mémoire Master, Université Mohamed Boudiaf-M'sila.
- [63] Boussadia, F. Z., & Amali, H. Traitement des eaux usées de l'entreprise Algal+ par méthode électrochimique (électrocoagulation), 2018, Mémoire Master, Université Mohamed BOUDIAF de M'Sila.
- [64] Tiaiba, M., Merzouk, B., & Mazour, M. Etude de l'applicabilité du procédé d'électrocoagulation pour le traitement de rejets textiles. *Algerian Journal of Environmental Science and Technology*, 2020.
- [65] Tchamango, S. R., Kamdoum, O., Donfack, D., & Babale, D. Traitement électrolytique d'un effluent d'une tannerie artisanale: étude comparative de l'efficacité de l'électrocoagulation avec les électrodes d'aluminium et de la coagulation chimique avec du sulfate d'aluminium. *Afrique SCIENCE*, 2019, vol. 15, no 2, p. 57-69.
- [66] Radhia, O et Oum el kheir, M. Traitement des eaux usées urbaines de la ville de Ain defla par électrocoagulation, Mémoire Master, 2016, Université Djilali Bounaama.

- [67] Vepsäläinen, M., & Sillanpää, M. (2020). Electrocoagulation in the treatment of industrial waters and wastewaters. In *Advanced Water Treatment*, Elsevier, p. 1-78.
- [68] Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and purification Technology*, 38(1), 11-41.
- [69] Chen L.L., Sheng H.L. Electrocoagulation of chemical polishing (CMP) wastewater from semiconductor fabrication. *Chemical Engineering Journal*, 2003, 205-211.
- [70] Adamovic, S., Prica, M., Dalmacija, B., Rapajic, S., Novakovic, D., Pavlovic, Z., & Maletic, S. (2016). Feasibility of electrocoagulation/flotation treatment of waste offset printing developer based on the response surface analysis. *Arabian Journal of Chemistry*, vol 9, no 1, pp 152-162.
- [71] İrdemez, Ş., Demircioğlu, N., Yıldız, Y. Ş., & Bingül, Z. (2006). The effects of current density and phosphate concentration on phosphate removal from wastewater by electrocoagulation using aluminum and iron plate electrodes. *Separation and Purification Technology*, vol 52, no 2, p 218-223.
- [72] Picard, T., Cathalifaud-Feuillade, G., Mazet, M., & Vandensteendam, C. (2000). Cathodic dissolution in the electrocoagulation process using aluminium electrodes. *Journal of Environmental Monitoring*, vol 2, no1, pp 77-80.
- [73] Sasson, M. B., Calmano, W., & Adin, A. (2009). Iron-oxidation processes in an electroflocculation (electrocoagulation) cell. *Journal of Hazardous Materials*, vol 171, no (1-3), pp 704-709.
- [74] Merzouk, B., Gourich, B., Sekki, A., Madani, K., & Chibane, M. (2009). Removal turbidity and separation of heavy metals using electrocoagulation–electroflotation technique: A case study. *Journal of hazardous materials*, vol 164, no 1, pp 215-222.
- [75] Fayad, N. The application of electrocoagulation process for wastewater treatment and for the separation and purification of biological media, 2017, Thèse de doctorat.
- [76] Kumar, P. R., Chaudhari, S., Khilar, K. C., & Mahajan, S. P. (2004). Removal of arsenic from water by electrocoagulation. *Chemosphere*, vol 55, no9, pp 1245-1252.

- [77] Bektaş, N., Akbulut, H., Inan, H., &Dimoglo, A. (2004). Removal of phosphate from aqueous solutions by electro-coagulation. *Journal of Hazardous Materials*, vol 106, no (2-3),
- [78] Dimoglo, A., Akbulut, H. Y., Cihan, F., &Karpuzcu, M. (2004). Petrochemical wastewater treatment by means of clean electrochemical technologies. *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol 6, no 4, pp 288-295.
- [79] Lai, C. L., & Lin, S. H. (2004). Treatment of chemical mechanical polishing wastewater by electrocoagulation: system performances and sludge settling characteristics. *Chemosphere*, vol 54, no 3, pp 235-242.
- [80] Uğurlu, M., Gürses, A., Doğar, Ç., &Yalçın, M. (2008). The removal of lignin and phenol from paper mill effluents by electrocoagulation. *Journal of environmental management*, vol 87, no 30, pp 420-428.
- [81] Nigri, E. M., Santos, A. L., & Rocha, S. D. (2020). Removal of organic compounds, calcium and strontium from petroleum industry effluent by simultaneous electrocoagulation and adsorption. *Journal of Water Process Engineering*, 37, 101442.
- [82] Mollah, M. Y. A., Gomes, J. A., Das, K. K., &Cocke, D. L. (2010). Electrochemical treatment of Orange II dye solution—Use of aluminum sacrificial electrodes and floc characterization. *Journal of hazardous materials*, vol 174, no (1-3), pp 851-858.
- [83] Kalyani, K. P., Balasubramanian, N., &Srinivasakannan, C. (2009). Decolorization and COD reduction of paper industrial effluent using electro-coagulation. *Chemical Engineering Journal*, vol 151, no (1-3), pp 97-104.
- [84] Shafaei, A., Rezayee, M., Arami, M., &Nikazar, M. (2010). Removal of Mn<sup>2+</sup> ions from synthetic wastewater by electrocoagulation process. *Desalination*, vol 260, no (1-3), pp 23-28.
- [85] Kobya, M., Demirbas, E., Dedeli, A., &Sensoy, M. T. (2010). Treatment of rinse water from zinc phosphate coating by batch and continuous electrocoagulation processes. *Journal of Hazardous Materials*, vol 173, no (1-3), pp 326-334.

- [86] Malakootian, M., Mansoorian, H. J., & Moosazadeh, M. (2010). Performance evaluation of electrocoagulation process using iron-rod electrodes for removing hardness from drinking water. *Desalination*, vol 255, no (1-3), pp 67-71.
- [87] Bener, S., Bulca, Ö., Palas, B., Tekin, G., Atalay, S., & Ersöz, G. (2019). Electrocoagulation process for the treatment of real textile wastewater: Effect of operative conditions on the organic carbon removal and kinetic study. *Process Safety and Environmental Protection*, vol 129, pp 47-54.
- [88] Papadopoulos, K. P., Argyriou, R., Economou, C. N., Charalampous, N., Dailianis, S., Tatoulis, T. I., ... & Vayenas, D. V. (2019). Treatment of printing ink wastewater using electrocoagulation. *Journal of environmental management*, vol 237, pp 442-448.
- [89] Drogui, P., Asselin, M., Brar, S. K., Benmoussa, H., & Blais, J. F. (2008). Electrochemical removal of pollutants from agro-industry wastewaters. *Separation and Purification Technology*, vol ,no 3, pp 301-310.
- [90] Kobya, M., Can, O. T., & Bayramoglu, M. (2003). Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *Journal of hazardous materials*, vol 100, no (1-3), pp 163-178.
- [91] Daneshvar, N., Ashassi-Sorkhabi, H., & Tizpar, A. (2003). Decolorization of orange II by electrocoagulation method. *Separation and purification Technology*, vol 31, no 2), pp 153-162.
- [92] Kuokkanen, V., Kuokkanen, T., Rämö, J., Lassi, U., & Roininen, J. (2015). Removal of phosphate from wastewaters for further utilization using electrocoagulation with hybrid electrodes—Techno-economic studies. *Journal of Water Process Engineering*, vol 8, p e50-e57.
- [93] Lacasa, E., Canizares, P., Saez, C., Fernández, F. J., & Rodrigo, M. A. (2011). Electrochemical phosphates removal using iron and aluminium electrodes. *Chemical Engineering Journal*, vol 172, no 1, p 137-143.
- [94] İrdemez, Ş., Yildiz, Y. Ş., & Tosunoğlu, V. (2006). Optimization of phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with aluminum plate electrodes. *Separation and purification Technology*, vol 52, no 2, p 394-401.