

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



**École Nationale Polytechnique**  
**Département du Génie de l'Environnement**

**MEMOIRE DE MASTER EN GENIE DE L'ENVIRONNEMENT**

**Rédigé par :**  
**BOUAKRIF Zahir**

**THÈME**

**Traitement d'un rejet laitier par électrocoagulation**

**Soutenu le : 22/06/2015 devant le jury suivant :**

<b>Président :</b>	<b>M. N. MAMERI</b>	<b>Professeur à l'ENP</b>
<b>Promoteurs :</b>	<b>M. M.DROUCHE</b>	<b>Professeur à l'ENP</b>
	<b>M. F.BOUAMRA</b>	<b>Doctorant à l'ENP</b>
<b>Examinatrice:</b>	<b>Mme. N. ABDI</b>	<b>Professeur à l'ENP</b>

**Promotion Juin 2015**

# Remerciements

*Je commence par remercier DIEU d'avoir eu la bonté de m'entourer de personnes formidables qui ont, chacune à leur façon, et ce, à différentes étapes de mon cheminement, contribué, d'une manière ou d'une autre, à la réalisation de ce mémoire.*

*En second lieu, je tiens à remercier mes promoteurs M<sup>me</sup> Fariza BOUAMRA et Mr Madani DROUCHE pour leur présence et leur aide inestimable durant toute la période du travail. Ainsi que Mr Hakim LOUNICI pour ses précieux conseils qui m'ont permis de mener à bien ce projet.*

*Des remerciements s'imposent aussi pour M<sup>lle</sup> Leila BENSADALLAH qui m'a guidé, et aussi pour sa disponibilité et sa gentillesse tout au long de ce travail.*

*Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury Mr Nabil MAMERI et M<sup>me</sup> Nadia ABDI pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail Et de l'enrichir par leurs propositions. Enfin, je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

# **Dédicaces**

**A mes parents**

**A mes frères et ma sœur**

**A mes amis**

**Et à tous ceux qui me sont chers**

**Merci**

## المخلص

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم فعالية تقنية التخثر الكهربائي لمعالجة النفايات السائلة المحاكاة للملينة التي تتميز بمحتوى عضوي عالي. عامل التخثر  $Al^{3+}$  المتحصل عليه بالإضافة المباشرة ، مكننا من الحصول على معدلات القضاء على DCO 100% ، و القضاء التام على الفوسفات.

**الكلمات المفتاحية:** النفايات السائلة للملينة، التخثر الكيميائي، صفيحة الألومنيوم.

## Résumé

Le but de cette étude est d'évaluer l'efficacité du procédé d'électrocoagulation pour le traitement d'un effluent simulé de laiterie qui se caractérise par une forte teneur en matière organique. L'agent coagulant  $Al^{3+}$  obtenue par dissolution anodique a permis de réduire la DCO de 100 % , et d'éliminer totalement les phosphates.

**Mots clés :** effluent laitier, coagulation-flocculation, électrodes en aluminium.

## Abstract

The purpose of this study is to evaluate the efficiency of the electrocoagulation process for the treatment of a simulated dairy wastewater that have a high concentration in organic matters. Coagulating agent  $Al^{3+}$  obtained by anodic dissolution reduced the COD by 100 % , and totally eliminated the phosphorus.

**Keywords :** dairy wastewater, coagulation-flocculation, aluminium electrodes

## Table des matières

Introduction.....	- 1 -
Chapitre I : Synthèse Bibliographique .....	- 3 -
1. L'industrie Laitière .....	- 3 -
1.1. Définition du Lait .....	- 3 -
1.2. Composition du lait .....	- 3 -
1.3. L'industrie Laitière en Algérie .....	- 4 -
1.4. Origine des rejets Laitiers .....	- 5 -
1.5. Paramètres caractérisant les effluents laitiers .....	- 6 -
1.6. Caractéristiques des rejets Laitiers .....	- 6 -
1.6.1. Caractéristiques des effluents produits par l'industrie laitière.....	- 7 -
1.6.2. Caractéristiques des effluents produits par les fermes d'élevage .....	- 7 -
1.7. Impact des effluents laitiers .....	- 8 -
1.8. Normes et réglementation des effluents laitiers .....	- 8 -
1.8.1. Rejets urbains.....	- 8 -
1.8.2. Rejets en milieu rural .....	- 9 -
1.9. Techniques de traitement des effluents laitiers.....	- 9 -
1.9.1. Techniques biologiques .....	- 9 -
1.9.2. Techniques physico-chimiques .....	- 9 -
2. L'Electrocoagulation.....	- 10 -
2.1. Applications de l'électrocoagulation .....	- 10 -
2.2. Mécanisme réactionnels de l'électrocoagulation.....	- 12 -
2.3. Modes de branchement des électrodes .....	- 13 -
2.3.1. Electrocoagulation à courant continu.....	- 14 -
2.3.2. Electrocoagulation à courant alternatif .....	- 14 -
2.4. Théorie de l'électrocoagulation .....	- 15 -
2.5. Avantages et inconvénients de l'électrocoagulation .....	- 16 -

Chapitre II : Matériels et Méthodes .....	- 18 -
1. Méthodes d'analyse .....	- 18 -
1.1. Spectroscopie d'absorption UV .....	- 18 -
1.2. pH .....	- 18 -
1.3. DCO.....	- 19 -
1.4. Phosphates .....	- 19 -
2. Dispositif expérimental.....	- 20 -
3. Procédure expérimentale.....	- 20 -
Chapitre III : Résultats et Discussions .....	- 22 -
1. Influence du courant.....	- 22 -
2. Suivi du pH.....	- 23 -
3. Suivi du potentiel .....	- 24 -
Conclusion .....	- 26 -
Références bibliographiques.....	- 27 -
Annexes .....	- 29 -
Annexe 1 : Dosage de la DCO .....	- 29 -
Annexe 2 : Dosage des protéines :.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Annexe 3 : Dosage des phosphates (ISO N° 6878) .....	- 30 -

## **Liste des tableaux**

**Tableau 1** : La composition moyenne du lait de vache

**Tableau 2** : Comparaison des flux des effluents pour les trois types de production laitière

**Tableau 3** : Valeurs limites des rejets en milieu urbain

**Tableau 4** : Application à pleine échelle de l'électrocoagulation pour le traitement des rejets

**Tableau 5** : Caractéristiques du rejet laitier

## Liste des figures

**Figure 1** : Schéma de principe de l'électrocoagulation

**Figure 2** : Configuration des branchements. (a) monopolaire simple, (b) monopolaire en série, (c) monopolaire en parallèle, (d) bipolaire.

**Figure 3** : Dispositif expérimental de l'électrocoagulation

**Figure 4** : Variation des MES en fonction du temps pour deux valeurs du courant

**Figure 5** : Abattement de la DCO en fonction du temps pour deux valeurs du courant

**Figure 6** : Abattement des phosphates en fonction du temps pour deux valeurs du courant

**Figure 7** : Variation du pH au cours du temps pour deux valeurs de courant

**Figure 8** : Evolution du potentiel du milieu au cours du temps

**Figure 9** : Courbe d'étalonnage de la DCO

**Figure 10** : Courbe d'étalonnage des phosphates

## Liste des abréviations

% : pourcent

°C : degrés Celsius

µm : micromètre

D.O : absorbance ou densité optique

DBO : Demande Biologique en Oxygène

DBO<sub>5</sub> : Demande Biologique en Oxygène au bout de 5 jours

DCO : Demande Chimique en Oxygène

ERIAD : les Entreprises Régionales des Industries Alimentaires et Dérivées.

F : constante de Faraday

g : gramme

g.L<sup>-1</sup> : gramme par litre

h: heure

I : Intensité imposée aux bornes des électrodes

I : intensité de la lumière à la sortie de la cellule du spectroscope

I<sub>0</sub> : intensité de la lumière à l'entrée de la cellule du spectroscope

M : masse molaire de l'ion considéré

m: masse théoriquement dissoute

m<sup>3</sup>.j<sup>-1</sup> : mètre cube par jour

M<sub>B</sub> : masse molaire de l'espèce formée

m<sub>B</sub>: masse de l'espèce formée

MES : Matières En Suspension

mg d'O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup> : milligramme d'oxygène par litre

MVS : Matières Volatiles en Suspension

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

nm : nanomètre

NO<sub>2</sub><sup>-</sup> : nitrite

NO<sub>3</sub><sup>-</sup> : nitrate

OAIC : l'Office Algérien Interprofessionnel des Céréales

ONAB : l'Office National des Aliments du Bétail.

ONIL : l'Office National Interprofessionnel du Lait

pH : potentiel Hydrogène

t : temps

UV : Ultra Violet

$\varepsilon$  : coefficient d'extinction spécifique du soluté

$\lambda$  : longueur d'onde

$\Phi$  : rendement faradique

# **INTRODUCTION**

### **Introduction**

Les industries agroalimentaires, de par la nature de leurs productions, sont grandes consommatrices d'eau de très bonne qualité. A l'autre bout de la chaîne, leurs rejets représentent 20 % des eaux résiduaires de l'industrie nationale. La totale implication de l'agroalimentaire dans la chaîne de l'eau conduit donc à ce que la préservation de la ressource constitue une de ses priorités. 10 % des investissements des industries agroalimentaires sont réalisés pour la protection de l'environnement. Parmi les principaux investisseurs, on retrouve les sucreries, les industries du grain, le secteur de la viande et, enfin, les laiteries et les conserveries (**C.MATHIEU-ANDRE, 2010**).

Dans la filière laitière, le principal problème se situe au niveau de l'eau. Elle doit être dépolluée avant rejet dans le milieu naturel car elle a une forte teneur en DBO et DCO, en solides dissous ou en suspension qui contiennent principalement des huiles et des graisses, et des nutriments tel que les phosphates et les nitrates ; induits par les différents processus de fabrication mis en jeu et les processus de nettoyage, c'est pour cela qu'il faut d'abord réaliser un bilan pollution pour étudier les sources de pollution, caractériser le rejet et essayer de minimiser cette pollution. Ce traitement génère des boues dont il faut aussi tenir compte (**R.MOLETTA, 1999**).

La première étape du traitement des eaux usées porte sur la séparation des formes de pollution facilement récupérables (particules par exemple). Le but est de minimiser la quantité de pollution à traiter dans la suite de la filière de dépollution. Ainsi, les effluents de l'industrie laitière peuvent subir différents prétraitements : dégrillage ou tamisage, dégraissage, dessablage dans le but d'éliminer la pollution particulaire.

Par la suite, les effluents laitiers qui contiennent une pollution essentiellement organique et sous forme soluble peuvent subir un épandage sur des terres agricoles ou un traitement biologique. Dans le premier cas, la pollution est éliminée par les micro-organismes du sol et les végétaux. Dans le second cas, on confie à des populations microbiennes présentes dans des réacteurs biologiques le soin d'éliminer la pollution.

On peut aussi traiter les effluents laitiers par des procédés électrochimiques tels que l'électrocoagulation. En effet le développement de l'électricité comme nouvelle source

## *Introduction*

d'énergie l'aspect non polluant et les facilités d'automatisation qu'elle apporte ont permis, ces dernières années, un développement important des technique électrochimiques dans le domaine du traitement des eaux . L'électrocoagulation est une technique électrolytique dérivée de la coagulation chimique classique. Elle permet d'éliminer la pollution dissoute et les particules colloïdales grâce à la production *in situ* de floes d'hydroxydes obtenus par dissolution anodique d'électrodes solubles d'aluminium ou de fer (**Shen et al. 2000**). L'électrocoagulation requiert moins de réactifs et permet de réduire le volume de boues générées comparativement a la coagulation chimique conventionnelle (**Mollah et al. 2001**), plusieurs études font état de l'utilisation du procédé d'électrocoagulation pour l'élimination des composés organique issus des eaux usées d'industrie laitière.

L'objectif de notre étude est d'évaluer l'efficacité de la coagulation-floculation, sur un effluent laitier synthétique.

Le présent travail s'articule principalement sur les points suivant :

- Un premier chapitre consacré à l'étude bibliographique dans laquelle nous présentons l'état de l'art du procédé utilisé.
- Le deuxième chapitre englobe la description du matériel et des méthodes analytiques utilisées ainsi que le protocole expérimental suivi.
- Enfin le dernier chapitre présente les résultats obtenus

**CHAPITRE I :**  
**SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

## Chapitre I : Synthèse Bibliographique

### 1. L'industrie Laitière

#### 1.1. Définition du Lait

Selon le codex (norme 206-1999), le lait est la sécrétion mammaire normale d'animaux de traite obtenue à partir d'une ou plusieurs traites, sans rien y ajouter ou en soustraire, destiné à la consommation comme lait liquide ou à un traitement ultérieur [1].

Selon le Congrès international de la répression des fraudes en 1909, le lait est le produit intégral de la traite totale et ininterrompue d'une femelle laitière bien portante, bien nourrie et non surmenée [1].

Il doit être recueilli proprement et ne pas contenir de colostrum. Le décret du 25 mars 1924 indique la définition « lait » que sans indication de l'espèce animale de provenance, est réservée au lait de vache. Tout lait provenant d'une femelle laitière autre que la vache devra être clairement caractérisé [1].

#### 1.2. Composition du lait

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

- **La phase aqueuse:** phase dispersante continue contenant des molécules (exemple : lactose) ou des ions (exemple : calcium) à l'état dissout. Cette phase est stable [1].
- **Une suspension colloïdale de caséines:** associées à des minéraux ( $(\text{PO}_4)_2\text{Ca}_3$ ), ce sont les micelles phosphocalciques ou micelles de caséines. Ces agrégats macro-moléculaires de forme et de masses variées sont chargés négativement dans le lait frais. Il en résulte une répulsion électrostatique des micelles, ce qui assure la stabilité en évitant l'agglomération. Il faut noter que les micelles de caséines peuvent être déstabilisées sous l'action de facteurs extérieurs qui neutralisent les charges négatives ou désagrègent leur intégrité. Il en résulte alors l'agglutination des micelles de caséines puis la séparation du liquide aqueux dispersant. C'est la coagulation du lait [1].

- **Une émulsion lipidique:** les globules gras sont constitués d'une goutte lipidique entourée d'une membrane lipoprotéique assurant l'intégrité et l'individualité du globule. Ces globules gras sont en émulsion grâce à la charge négative de l'enveloppe assurant la répulsion électrostatique [1].
- **Les micro-organismes du lait:** ce sont essentiellement des bactéries sous forme végétative ou sporulée, en suspension stable. C'est leur développement éventuel qui est générateur d'instabilité le plus souvent par acidification (cas des bactéries lactiques) [1].

La composition moyenne des principaux constituants du lait de vache est indiquée dans le tableau 1[2].

**Tableau 1 :** La composition moyenne du lait de vache

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

### 1.3.L'industrie Laitière en Algérie

L'**amont** de la filière lait se compose des producteurs et importateurs d'aliments du bétail, à savoir [3]:

- l'Office Algérien Interprofessionnel des Céréales (OAIC).
- les Entreprises Régionales des Industries Alimentaires et Dérivées (ERIAD).
- l'Office National des Aliments du Bétail (ONAB).

L'**aval** de la filière est représenté par [3]:

- les éleveurs bovins laitiers.
- les transformateurs : le Groupe Giplait, le privé.
- les importateurs : l'importation des matières premières était confiée à une filiale spécialisée dénommée la Milk Tarde. A présent, cette mission est confiée à l'Office National Interprofessionnel du Lait ONIL.

#### **1.4.Origine des rejets Laitiers**

La composition des effluents laitiers dépend de la nature du produit formé et donc des procédés mis en œuvre dans la laiterie. Les produits retrouvés dans les effluents proviennent principalement de la matière première (lactose, protéines, lipides, sels minéraux...) et des composés ajoutés pour le lavage (soude, acide phosphorique et nitrique...). Le comportement de l'homme est aussi un facteur à prendre en compte par rapport à la rigueur avec laquelle les sous produits sont utilisés [4].

On distingue alors les sources suivantes:

- Les ateliers de pasteurisation du lait ne déversent que des eaux de lavage, correspondant à un lait très dilué.
- L'industrie des produits frais (yaourts et fromages frais) rejettent des eaux qui peuvent être assez concentrées.
- Les fromageries et caséineries produisent du sérum riche en lactose et pauvre en protéines, les beurreries du babeurre riche en lactose et en protéine mais pauvre en matière grasse. Le babeurre et le sérum correspondent à une pollution considérable [5].

Mais il ne faut pas oublier les fermes et les salles de traites qui produisent aussi de la pollution sous les deux formes suivantes :

- Les eaux vertes : proviennent des rejets de l'animal pendant le séjour du bétail dans l'étable et du lavage du sol.
- Les eaux blanches : qui sont issues des lavages et de l'hygiénisation du matériel utilisé dans la traite. Elles sont en général peu chargées mais nécessitent quand même un traitement [4].
- Les eaux brunes : ce sont les déjections des animaux qui ont été diluées par les pluies dans les endroits non couverts [6].
- Le lactosérum : c'est un sous produit de la transformation du lait en fromage et constitue la plus grande majorité de la pollution [6].

### 1.5. Paramètres caractérisant les effluents laitiers

De par la nature des effluents de leurs compositions il est impossible de quantifier tout les éléments présents. C'est pour cela que l'on utilise des grandeurs qui caractérisent le niveau de pollution de manière globale et qui sont [4]:

- Demande biologique en oxygène (DBO) : C'est la quantité d'oxygène consommée dans l'obscurité à 20°C pendant un temps donné par des microorganismes pour oxyder la matière organique. La plupart des temps, l'incubation dure 5 jours et on écrit DBO<sub>5</sub>. Elle est exprimée en gramme d'oxygène par litre d'effluent.
- Demande chimique en oxygène (DCO) : C'est la quantité d'oxydant chimique nécessaire pour oxyder la matière organique et est exprimée de la même manière que la DBO.
- Matière en suspension (MES) et matières volatiles en suspension (MVS) : Les MES correspondent à la quantité de matière particulaire exprimée en gramme de matière sèche par litre d'effluent par litre d'effluent après filtration tandis que les MVS sont les résidus de la calcination des MES à 600°C pendant 2h. La différence entre ces deux valeurs donne la quantité de matière organique en suspension.
- Azote : Il est présent sous forme organique, ammoniacale ou oxydée sous forme de nitrite NO<sub>2</sub><sup>-</sup> et nitrate NO<sub>3</sub><sup>-</sup> exprimé en milligramme d'azote élémentaire par litre d'effluent.
- Phosphore : sous forme de phosphate organique ou minéral, il est donné en milligramme de phosphore élémentaire par litre d'effluent.
- pH : C'est la concentration en ion H<sup>+</sup> et elle exprime l'acidité du milieu qui est importante car les microorganismes utilisés ne fonctionnent que pour un certain intervalle de pH.

### 1.6. Caractéristiques des rejets Laitiers

Bien que la source des pollutions soit toujours le lait, les caractéristiques des effluents sont très variables [6].

Nous distinguons les rejets produits par l'industrie laitière et (transformation du lait) et ceux issus de la production du lait (fermes d'élevage) [5]:

### 1.6.1. Caractéristiques des effluents produits par l'industrie laitière

Dans l'industrie laitière, la grande majorité des effluents sont composés d'eaux de rinçage et des pertes en produits laitiers. Ces rejets sont très variables en relation avec les caractéristiques du lait, la transformation réalisée et la technologie de nettoyage utilisée [6].

La comparaison entre trois produits différents est donnée dans le tableau 2 [5].

**Tableau 2** : Comparaison des flux des effluents pour les trois types de production laitière

Paramètre	Fromage	Lait frais	Lait en poudre
pH	5.22	6.92	5.80
Concentration en DCO (mg d'O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )	5 340	4 656	1 908
Eau utilisée (m <sup>3</sup> .j <sup>-1</sup> )	495	682	390
Lait traité (m <sup>3</sup> .j <sup>-1</sup> )	168	223	86
Rapport des volumes $\frac{\text{eau utilisée}}{\text{lait traité}}$	2.94	3.06	4.54

### 1.6.2. Caractéristiques des effluents produits par les fermes d'élevage

Ces effluents sont constitués d'un mélange d'eaux usées provenant des différentes activités du site citées précédemment.

Etant donné que les différentes fermes sont éloignées les unes des autres, il n'est pas envisageable de regrouper tout les effluents dans une station d'épuration, et il est préférable de mélanger les eaux vertes aux eaux brunes qui seront ensuite utilisées en épandage.

Les eaux blanches continent essentiellement de la matière organique avec une DCO variant entre 0.5 et 6 g d'O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup> et des MES de l'ordre de 1.9 g.L<sup>-1</sup> mais ces valeurs varient d'un élevage à un autre mais le rapport DCO/DBO<sub>5</sub> est dans un intervalle allant de 1.2 à 2.4 avec une valeur moyenne de 2.3 ce qui montre que les eaux blanches sont biodégradable.

Le lactosérum quand à lui est traité conjointement aux eaux blanches malgré sa forte charge en DBO et en DCO [6].

La variabilité des caractéristiques des effluents peut être attribuée à la méthodologie mise en œuvre lors du nettoyage en place, à la technologie des machines à traite et les produits de lessivage en l'occurrence l'acide phosphorique qui en très grandes concentrations peut être très dangereux. Ces produits de nettoyage peuvent aussi être corrosifs.

On peut aussi trouver des oligo-éléments comme l'aluminium, le cadmium et des pesticides qui vont avoir une influence sur ces rejets [6].

### **1.7. Impact des effluents laitiers**

Les effluents laitiers ont une charge organique extrêmement élevée. C'est cette matière qui, concentrée dans les eaux ou les sols, provoque une pollution par asphyxie du milieu récepteur: pollution des petits cours d'eau, colmatage des sols autour des points de rejets, génération d'odeurs indésirables dues à la fermentation, graves perturbations des cycles biologiques et du milieu naturel lorsqu'elles sont en trop grande quantité (l'eutrophisation) [4].

Un litre de lait transformé induit 60 g de DCO dont 50 g issus du lactosérum ce qui implique que les eaux de lavage d'une fromagerie de la salle de traite constituent une pollution 15 fois plus grande que les eaux usées ménagères [4].

### **1.8. Normes et réglementation des effluents laitiers**

On rencontre deux situations lors du rejet des effluents en industrie laitière [6]:

- La production d'eaux résiduelles qui vont rejoindre le réseau de traitement des eaux usées en station d'épuration
- Les rejets d'eaux blanches en milieu rural où des solutions spécifiques doivent être envisagées.

La réglementation est différente pour ces deux cas :

#### **1.8.1. Rejets urbains**

Les normes algériennes applicables aux rejets industriels ont été imposées par le décret exécutif n° 93-160 du 10/07/1993, et sont données par les seuils de valeurs représentés dans le tableau 3 [6].

**Tableau 3** : Valeurs limites des rejets en milieu urbain

Paramètre	Concentration maximale (mg.L <sup>-1</sup> )
MES	30
DBO <sub>5</sub>	40
DCO	120
Azote globale	40
Phosphore total	2

Ces normes indiquent aussi que les effluents ne doivent pas contenir de composés susceptibles d'occasionner des mauvaises odeurs que le pH est compris entre 5.5 et 8.5 et que la température est inférieure à 30 °C [6].

### **1.8.2. Rejets en milieu rural**

La réglementation interdit le rejet direct dans le milieu naturel en particulier à cause de la pollution par les nitrates, mais il n'y a pas de normes fixes pour ce genre de milieu car chaque région a sa spécificité [7].

### **1.9. Techniques de traitement des effluents laitiers**

Les eaux usées de l'industrie laitière sont essentiellement composées de matière organique carbonée présente sous forme soluble (concentrations élevées en lactose, acides aminés, petits peptides...). Le traitement de ce type d'effluents est donc axé en priorité sur l'élimination du carbone [7].

#### **1.9.1. Techniques 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 [7].

#### **1.9.2. Techniques physico-chimiques**

Les procédés physico-chimiques en traitement complet des eaux usées laitières ne permettent qu'une épuration très médiocre car ils n'assurent essentiellement que l'élimination des matières en suspension et très peu celle des composés solubles. En conséquence, ils sont généralement utilisés comme prétraitement des effluents en tête d'un dispositif d'épandage ou d'une station d'épuration biologique.

En fonction du procédé de dépollution retenu, les prétraitements peuvent inclure : un dégrillage, un dessablage, un dégraissage et un bassin tampon avec régulation du pH. La mise en place d'une décantation primaire n'est pas recommandée compte tenu de la faible concentration en MES des effluents laitiers et du risque de départ en fermentation [7].

## **2. L'Electrocoagulation**

Tel que son nom l'indique, l'électrocoagulation est la fusion des sciences de l'électrochimie et de la coagulation [8]. Il utilise des électrodes consommables en fer ou en aluminium pour générer des ions dans l'eau à traiter [9]. Les anodes métalliques vont subir une électro-dissolution *in situ* suite au passage du courant. Il s'en suit une concentration des espèces colloïdales dans la région proche de l'anode. Les cations coagulants et les hydroxydes métalliques vont alors « interagir » avec les particules colloïdales chargées négativement et permettent la neutralisation de leur charge et leur coagulation [10].

### **2.1.Applications de l'électrocoagulation**

Les applications de l'électrocoagulation sont présentent dans le tableau 4 [11].

**Tableau 4** : Application à pleine échelle de l'électrocoagulation pour le traitement des rejets

Domaine	Industries	Objectifs
Industriel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Centrales thermiques</li> <li>• Industries de transformation</li> <li>• Mines</li> <li>• Transformation des métaux</li> <li>• Fabrication de teintures</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Métaux</li> <li>• Huiles et hydrocarbures</li> <li>• Détergents et autres composés organiques</li> <li>• MES</li> <li>• DCO</li> </ul>
Transport	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transport naval</li> <li>• Transport routier</li> <li>• Entreposage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Huiles et hydrocarbures</li> <li>• DCO</li> <li>• MES</li> </ul>
Agroalimentaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transformation de nourriture</li> <li>• Restauration</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MES</li> <li>• DCO</li> <li>• Huiles et graisses</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porcheries</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Phosphore</li> <li>• MES</li> <li>• DCO</li> </ul>
Municipal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eau potable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enlèvement de fluorures</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Couleur</li> <li>• Turbidité</li> <li>• Désinfection</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eaux usées</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MES</li> <li>• DCO</li> <li>• Phosphore</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lixiviats de sites d'enfouissement ou de sites contaminés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DCO</li> <li>• Métaux lourds</li> </ul>

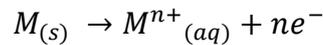
## 2.2.Mécanisme réactionnels de l'électrocoagulation

L'électrocoagulation consiste en des réactions chimiques et physico-chimiques qui sont occasionnées par un courant électrique. Elle se déroule en trois étapes successives [11] :

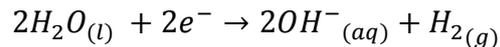
- Formation des coagulants par l'oxydation électrolytique de l'électrode consommable
- Déstabilisation des colloïdes
- Agrégation des particules déstabilisées

Quand un courant est appliqué à partir d'une source externe, le matériel anodique subira une oxydation, pendant que la cathode fera l'objet d'une réduction [8], et les réactions aux électrodes dont les suivantes [10] :

- A l'anode : on a une oxydation



- A la cathode



Dans le cas de l'aluminium on trouve une multitude de complexes anioniques et cationiques [12,10] :

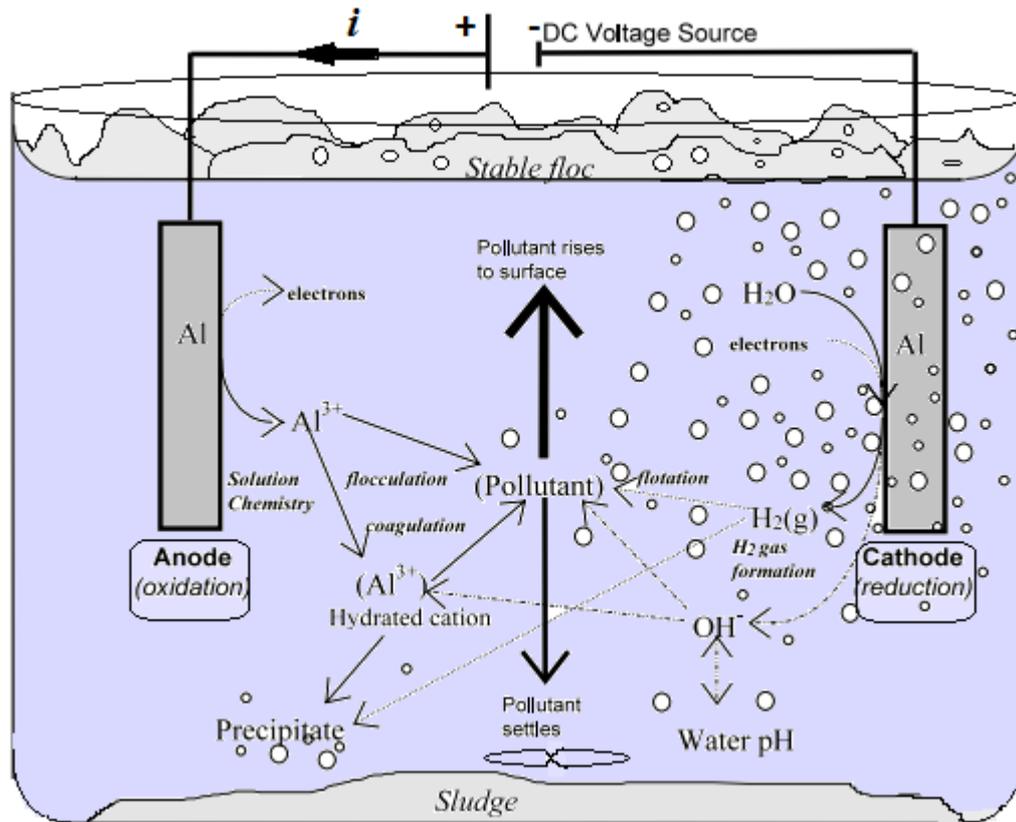
- Les monocomplexes :  $Al(OH)^{2+}$ ,  $Al(OH)_2^+$ ,  $Al(OH)^{4-}$
- Les polycomplexes :  $Al_2(OH)_2^{4+}$ ,  $Al_2(OH)^{5+}$ ,  $Al_6(OH)_{15}^{3+}$ ,  $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$
- Les espèces amorphes et très peu solubles :  $Al(OH)_3$ ,  $Al_2O_3$

Dans le cas du fer on les complexes :  $FeOH^{2+}$ ,  $Fe(OH)_2^+$ ,  $Fe(OH)_2$ ,  $Fe(OH)_3$ ,  $Fe(OH)_4^-$ ,  $FeO(OH)$ ,  $Fe_2(OH)_2^{4+}$ ,  $Fe_2(OH)_4^{2+}$  [12,10].

Les complexes s'adsorbent sur les particules et annulent leurs charges colloïdales, ce qui conduit à déstabiliser l'émulsion, comme pour la coagulation chimique, les seuls différences sont la forme et la source du coagulant, et la présence de courant électrique dans de le cas de l'électrocoagulation qui va faciliter la migration des espèces [12].

Les gaz produits aux électrodes peuvent entraîner la flottation des matières colloïdales coagulées [8]. La taille de la microbulle est suffisamment faible et a un diamètre qui se trouve entre 20 et 30  $\mu m$ . Ces bulles vont aider à réduire ou même empêcher la formation de dépôt sur la cathode et augmentent donc le rendement de l'électrocoagulation pour tout type d'électrode [11].

Le schéma de principe de l'électrocoagulation est représenté dans la figure 1 [10].



**Figure 1** : Schéma de principe de l'électrocoagulation

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.

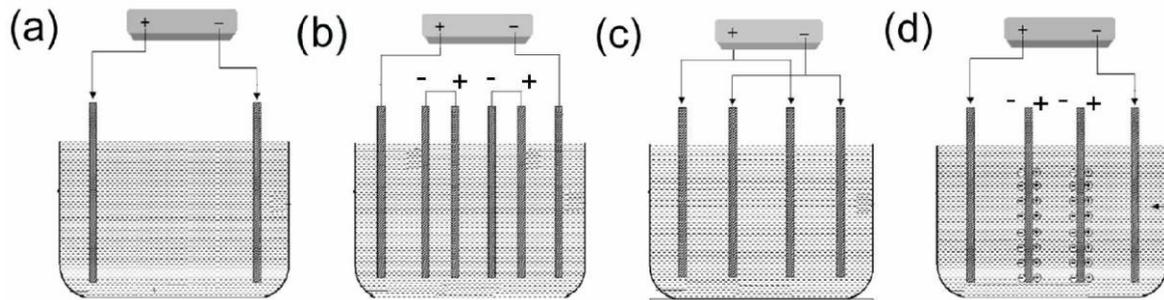
Ces électrodes peuvent être constituées de divers métaux qui sont choisis de manière à optimiser le procédé de traitement. Les deux métaux communément utilisés sont le fer et l'aluminium [10].

### 2.3. Modes de branchement des électrodes

On distingue trois modes de connexion électrique [12,10]:

- Le mode monopolaire en série
- Le mode monopolaire en parallèle
- Le mode bipolaire

Les schémas des différents modes sont représentés sur la figure 2 [11].



**Figure 2** : Configuration des branchements. (a) monopolaire simple, (b) monopolaire en série, (c) monopolaire en parallèle, (d) bipolaire.

Si l'on compare les circuits électriques associés aux divers modes de connexions, on constate que, pour une intensité donnée, la tension nécessaire sera plus importante pour le mode en série que pour le mode en parallèle puisque les résistances s'additionnent. En mode en série, l'intensité qui parcourt chacune des électrodes est identique alors qu'en mode parallèle, elle dépend de la résistance de chaque cellule individuelle (composée de deux électrodes). Pour travailler en mode parallèle, il faudrait disposer d'un générateur permettant de délivrer un courant élevé, sous une faible tension alors qu'en mode en série, il faudrait un générateur permettant d'imposer des intensités relativement faibles et des tensions plus élevées [10].

A l'opposé, dans un réacteur bipolaire les cellules extérieures sont les seules à être connectées de telle sorte que les autres électrodes acquièrent une double polarité, chaque face étant opposée électriquement à l'électrode adjacente. Cette configuration offre l'avantage de nécessiter moins de puissance électrique et moins de connexions physiques [11].

Le branchement peut se faire soit à courant continu soit à courant alternatif [9].

### 2.3.1. Electrocoagulation à courant continu

La technologie de l'électrocoagulation à courant continu est inhérente avec la formation d'une couche imperméable d'oxyde sur la cathode et une oxydation de l'anode ; ce qui conduit à une perte dans l'efficacité du procédé. On peut minimiser ces pertes par l'addition d'électrodes consommables placées en parallèle dans la cellule [9].

### 2.3.2. Electrocoagulation à courant alternatif

Le système se compose d'électrodes en parallèle entre lesquelles sont placées verticalement une série d'électrodes formant ainsi une série de cellules électrolytiques monopolaire dans lesquelles passe l'effluent à traiter, ou d'une unité à lit fluidisé dans

laquelle des cylindres non conducteurs équipés d'électrodes en métal non consommable entre lesquelles un lit fluidise granulaire en régime turbulent est maintenu.

De l'air comprimé est introduit dans la cellule pour maintenir un régime turbulent et pour améliorer l'efficacité de la dissolution de l'aluminium par l'augmentation de la surface anodique. Le diagramme basique de l'écoulement pour le système d'électrocoagulation à courant alternatif avec un lit fluidise en aluminium permet l'entraînement des granules entre une série d'électrodes métalliques non consommables [9].

#### 2.4. Théorie de l'électrocoagulation

La théorie de l'électrocoagulation a été discutée par bon nombre d'auteurs et elle peut être récapitulée comme suit [9]:

- La compression de la double couche diffuse autour des espèces chargées, celle-ci est réalisée par l'interaction des ions générés par la dissolution des électrodes consommables et du au passage du courant électrique à travers la solution.
- La charge de neutralisation des espèces ioniques présentes dans l'effluent est provoquée par la dissolution électrochimique des électrodes consommables. Ces contre ions réduisent suffisamment la répulsion électrostatique inter particulaire de sorte que l'attraction de Van der Waals prédomine causant ainsi la coagulation. Une charge nulle résulte de ce processus.
- La formation de floccs et les floccs formes par la coagulation génèrent une couche de boue qui séquestre et enveloppe les particules colloïdales qui n'ont pas été complexées.

Une des principales lois explicitant les réactions d'électrocoagulation est la seconde loi de Faraday. Elle montre que la quantité d'ions métalliques dissous par oxydation anodique est proportionnelle à l'intensité imposée et à la durée d'électrolyse mais inversement proportionnelle à la valence de l'ion formé expriment la seconde loi de Faraday relative à une électrode comme [10]:

$$m = \frac{ItM}{nF}$$

m: masse théoriquement dissoute (g)

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

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

I : Intensité imposée aux bornes des électrodes (A)

t : temps (s)

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

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

$$\Phi = \frac{nFm_B}{QM_B}$$

$\Phi$  : rendement faradique (%)

$m_B$ : masse de l'espèce formée (g)

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

## 2.5. Avantages et inconvénients de l'électrocoagulation

Parmi les principaux avantages du procédé on distingue :

- L'électrocoagulation nécessite un équipement simple, facile à utiliser avec suffisamment de latitude opérationnelle et permet de résoudre la plupart des problèmes rencontrés pendant la manipulation.
- Le traitement d'une eau usée par électrocoagulation donne une eau agréable au goût, claire, sans couleur et inodore [9].
- Les boues produites par électrocoagulation se décantent aisément et sont faciles à assécher parce qu'elles sont principalement composées d'oxydes ou d'hydroxydes métalliques. C'est aussi une technique qui produit peu de boues.
- Les floccs formés par électrocoagulation sont similaires à ceux obtenus par coagulation chimique sauf que ceux obtenus par électrocoagulation sont plus grands, contiennent moins d'eau, leur résistance à l'acide est plus stable et sont séparés plus rapidement par filtration.
- Le procédé d'électrocoagulation a l'avantage d'éliminer les petites particules colloïdales car le champ électrique appliqué génère un mouvement rapide facilitant de ce fait la coagulation.
- Le procédé d'électrocoagulation ne nécessite pas l'utilisation de produits chimiques et évite de ce fait la neutralisation des produits chimiques en excès utilisés lors de la coagulation chimique et qui génèrent une pollution secondaire.

- Les bulles d'air produites peuvent entraîner les polluants à la surface de la solution à traiter ou ils peuvent être facilement concentrés, rassemblés et éliminés.
- Le processus électrolytique dans le procédé d'électrocoagulation est commandé électriquement et nécessite peu d'entretien.
- L'électrocoagulation peut être utilisée dans les zones rurales où l'électricité n'est pas disponible par simple raccordement à un panneau solaire qui génère assez d'électricité pour le processus [9].

Mais comme tout procédé, on observe aussi des inconvénients qui sont :

- Les électrodes consommables sont dissoutes dans l'eau usée par effet d'oxydation, elles nécessitent aussi un remplacement.
- L'électricité utilisée peut être onéreuse dans certains pays.
- Une pellicule d'oxyde imperméable peut se former sur la cathode menant à une perte d'efficacité du procédé d'électrocoagulation.
- Une conductivité élevée de l'eau usée à traiter est requise.
- Dans certains cas, une couche gélatineuse d'hydroxyde se forme [9].

**CHAPITRE II :**  
**MATERIELS ET METHODES**

## Chapitre II : Matériels et Méthodes

Cette section abordera les différents produits et les dispositifs utilisés (montage expérimental), les méthodes analytiques adoptées pour la mise en marche de ces derniers, ainsi que les protocoles normés de dosages des paramètres caractérisant notre rejet.

### 1. Méthodes d'analyse

#### 1.1. Spectroscopie d'absorption UV

La spectroscopie permet d'identifier la concentration d'un soluté dans une solution, par l'interaction des électrons des molécules du soluté avec la lumière. Lorsqu'un faisceau de lumière blanche traverse la solution, le soluté contenu dans cette dernière absorbe la lumière dans une longueur d'onde bien précise et restitue une intensité plus faible que le faisceau initial. La détermination de la concentration est effectuée par dosage spectroscopique dans le domaine du visible (400-750 nm), en utilisant la loi de Beer-Lambert [13]:

$$D.O = \log\left(\frac{I_0}{I}\right) = \varepsilon \cdot C \cdot L$$

D.O : absorbance ou densité optique

$I_0$  : intensité du courant à l'entrée de la cellule du spectroscope

I : intensité du courant à la sortie de la cellule du spectroscope

$\varepsilon$  : coefficient d'extinction spécifique du soluté ( $L \cdot mol^{-1} \cdot m^{-1}$ )

C : concentration du soluté ( $mol \cdot L^{-1}$ )

l : épaisseur de la cellule (m)

Le spectromètre utilisé dans notre analyse est PRIMLIGHT, SECOMAM® avec une gamme spectrale allant de 330 à 900 nm.

#### 1.2. pH

Le pH est mesuré à l'aide d'un pH-mètre de marque HANNA instruments, équipé d'une électrode en verre combinée Ag/AgCl/KCl 4M et d'une sonde de température. L'étalonnage est effectué à l'aide de solutions tampons de pH 4 et 7 à température ambiante et la précision sur la mesure donnée par le constructeur est de  $\pm 0,1$  unité pH.

### 1.3.DCO

La demande chimique en oxygène (DCO) est la quantité d'oxygène consommé par les matières organiques dissoutes exprimée en  $\text{mg O}_2.\text{L}^{-1}$  [13].

Le protocole de dosage est donné selon la norme Canadienne MA.315 DCO 1.0. Elle est déterminée par l'oxydation de la matière organique par un oxydant puissant ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ).

L'échantillon est porté a reflux a une température de  $148^\circ\text{C}$  pendant 2 heures dans un bloc chauffant a plusieurs postes en milieu sulfurique concentre (96%) et en présence de sulfate d'argent jouant le rôle de catalyseur d'oxydation, de sulfate de mercure comme un agent complexant des chlorures et d'une quantité connue en excès de bichromate de potassium a une concentration de  $8,33 \times 10^{-3} \text{ mol/l}$ .

A chaque dosage on a réalisé un essai a blanc par l'ajout des réactifs de l'oxydation a l'eau distillée.

On dose à une longueur d'onde  $\lambda = 600 \text{ nm}$  [14].

Le protocole détaillé est donné en annexe 1.

### 1.4.Phosphates

En milieu acide et en présence d'heptamolybdate d'ammonium, les orthophosphates donnent un complexe phosphomolybdique qui, réduit par l'acide ascorbique, développent une coloration bleue pouvant être dosée colorimétriquement à une longueur d'onde de  $880 \text{ nm}$  selon la norme NF EN 1189.

Une courbe d'étalonnage a été tracée (annexe 2) afin de pouvoir déterminer sa concentration en solution.

Le pourcentage d'abattement des orthophosphates est calculé selon la relation suivante [8]:

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

%E : Pourcentage d'élimination d'orthophosphate.

$C_i$  : concentration initial en orthophosphate (avant traitement)

$C_f$  : concentration final en orthophosphate (après traitement)

## 2. Dispositif expérimental

Le dispositif de l'électrocoagulation est constitué de :

- Un bécher de 500 ml avec une section de 10 cm.
- Un générateur de courant électrique type « MCP Lab electronics »
- Un agitateur
- Un barreau magnétique
- Quatre (04) plaques rectangulaires en aluminium (7.5 cm x 4 cm x 1 mm)
- Fils de connexion

## 3. Procédure expérimentale

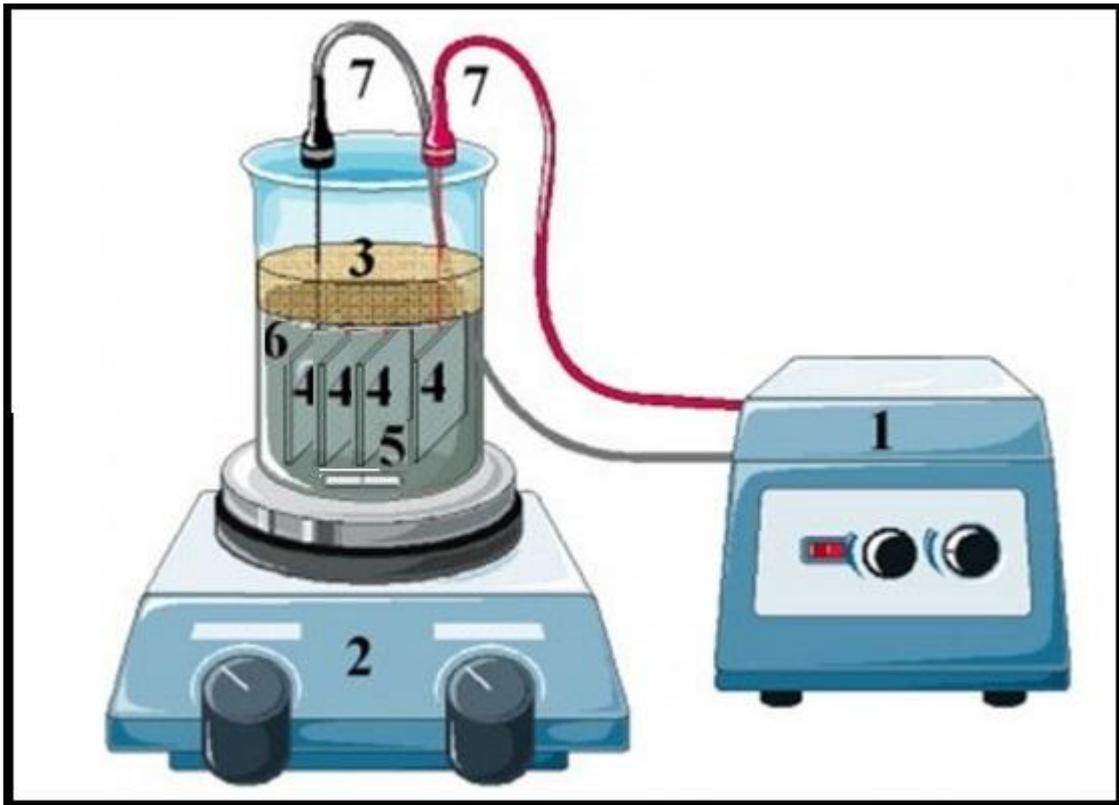
Afin d'obtenir un effluent ayant une composition constante au cours de nos manipulations, nous avons dissous 5 g de poudre de lait (Loya) dans 1 L d'eau de robinet. Le choix de cette concentration a été inspiré de plusieurs études sur les rejets laitiers (**Ramasamy et al. 2004 ; Balannec et al., 2005 ; Leal et al., 2006 ; Kushwaha et al., 2010**), l'objectif étant d'obtenir une DCO allant de 5500 et 7000 mg d'O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup> [15].

Les caractéristiques du rejet obtenu sont données dans le tableau 5.

**Tableau 5** : Caractéristiques du rejet laitier

Paramètres	Valeurs
DCO (mg d'O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )	5500 – 7000
Phosphates (mg. L <sup>-1</sup> )	22 – 28
Nitrates (mg. L <sup>-1</sup> )	40 – 45
MES (g. L <sup>-1</sup> )	4 – 4.5
pH	6.5 – 7.5
Protéines (g. L <sup>-1</sup> )	2.4 – 2.6
Conductivité (mS.cm <sup>-1</sup> )	0.8

Le dispositif expérimental fonctionnant en discontinu est illustré dans la figure 3.



**Figure 3** : Dispositif expérimental de l'électrocoagulation

- (1) Générateur de courant continu
- (2) Agitateur
- (3) Couvercle
- (4) Plaques en aluminium
- (5) Barreau magnétique
- (6) Effluent laitier
- (7) Câbles de connexion

L'unité d'électrocoagulation en mode bipolaire, est branchée à un générateur qui délivre un courant continu qui induit la dissolution du métal à l'anode, et un dégagement régulier de gaz à la cathode. Les électrodes en aluminium sont espacées de 1 cm avec une surface globale utile de 120 cm<sup>2</sup>. Les essais ont été faits dans un bécher de 500 mL, agité continuellement pour homogénéiser la solution.

Nous avons procédé à une cinétique, pour deux intensités de courant (0.1, 0.15 A [10]), et ce pour suivre l'abattement des différents paramètres à température ambiante.

En premier lieu, nous effectuons des prélèvements du milieu réactionnel toutes les 5 minutes pendant 20 minutes, puis toutes les 10 minutes pour le reste de la manipulation.

Une filtration peut être nécessaire avant le dosage des échantillons.

**CHAPITRE III :**  
**RESULTATS ET DISCUSSIONS**

## Chapitre III : Résultats et Discussions

### 1. Influence du courant

Les figures 4, 5 et 6 montrent la variation des concentrations respectivement en MES, DCO et phosphates au cours du temps, pour deux valeurs d'intensité de courant.

Un courant de 0.1 A ou plus est suffisant pour l'élimination de la pollution [10].

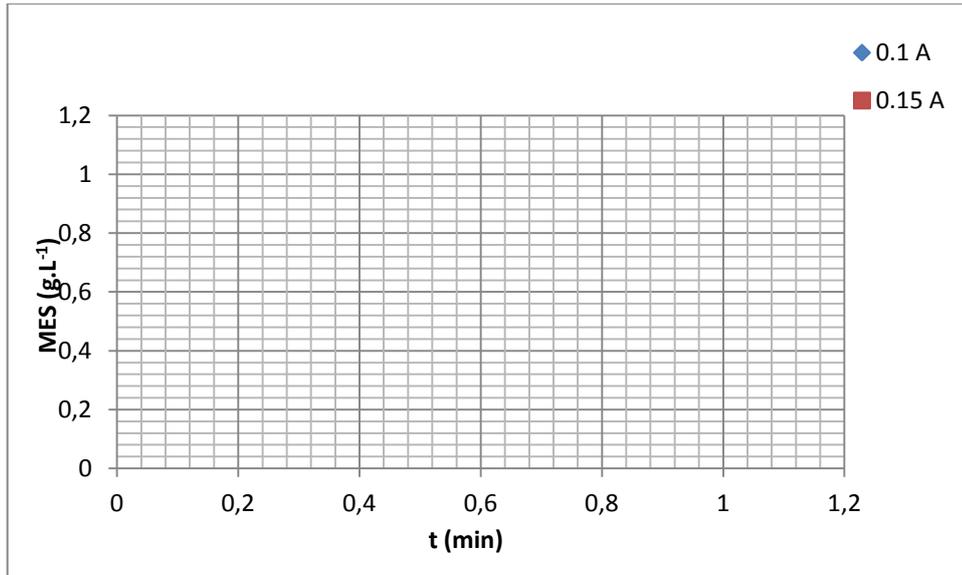


Figure 4 : Variation des MES en fonction du temps pour deux valeurs du courant

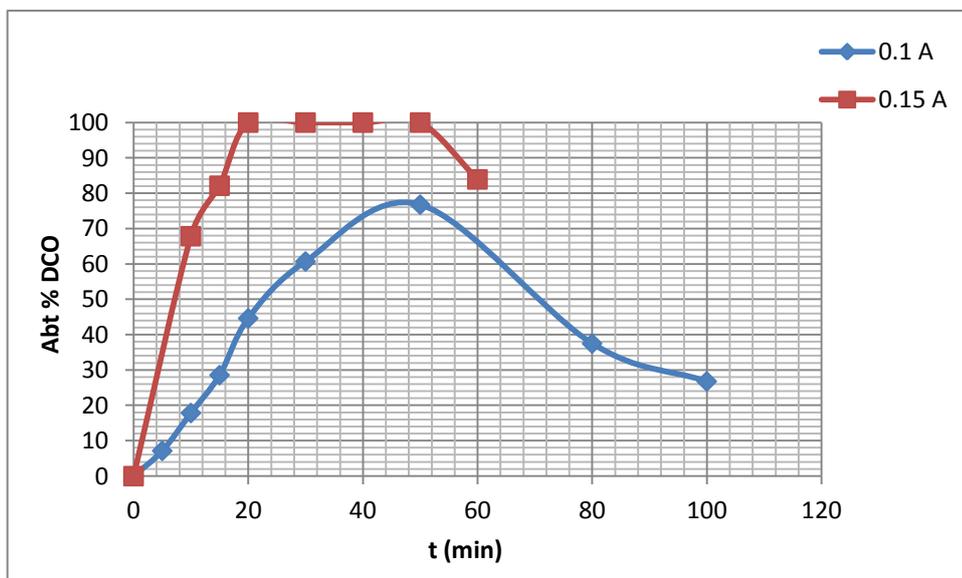
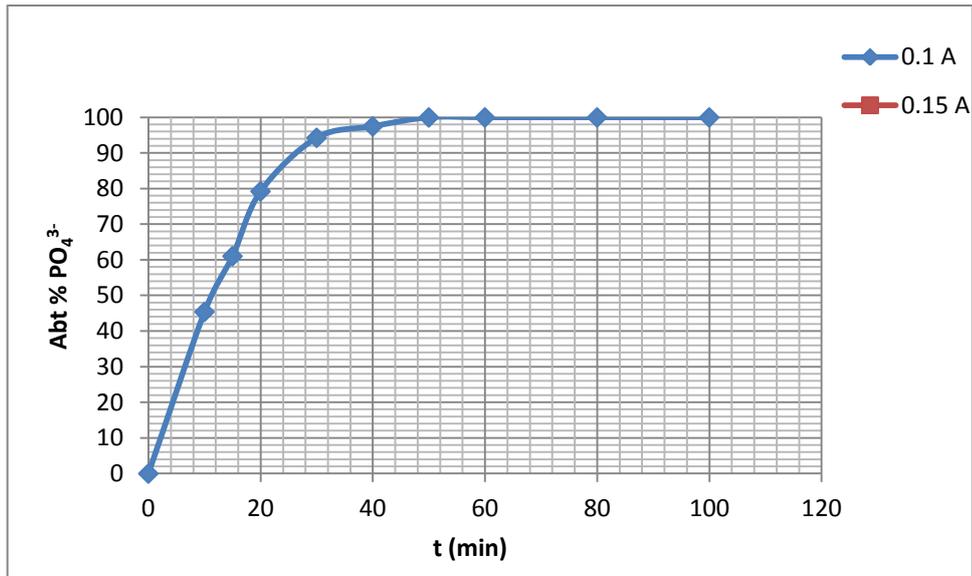


Figure 5 : Abattement de la DCO en fonction du temps pour deux valeurs du courant



**Figure 6** : Abatement des phosphates en fonction du temps pour deux valeurs du courant

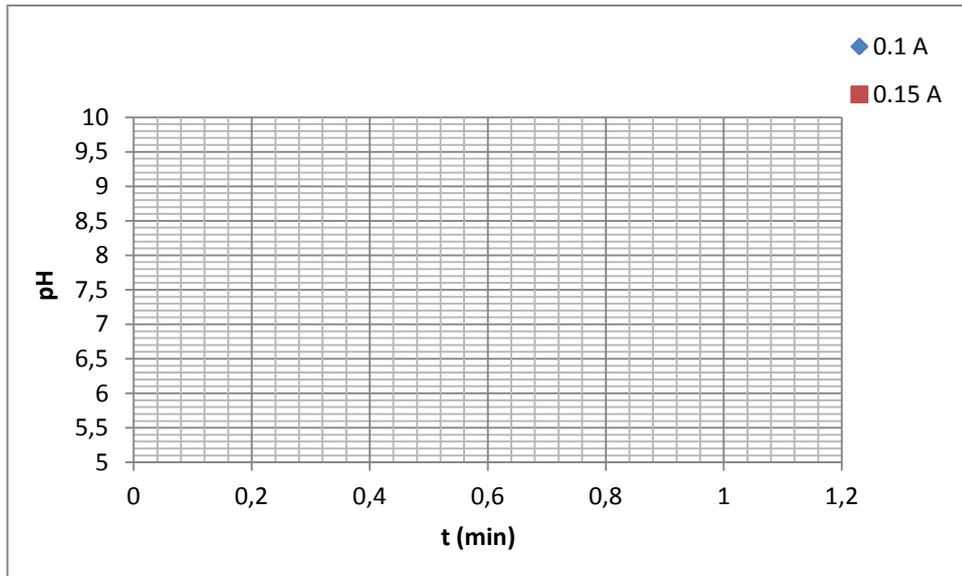
Pour les deux valeurs du courant, les MES restent pratiquement constants à cause de l'agitation, et la formation de microbulles de gaz.

En ce qui concerne les orthophosphates, on atteint un abatement de 100 % dans les deux cas, mais on y arrive plus rapidement pour un courant de 0.15 A, ce qui est en accord avec la loi de Faraday qui montre que la quantité d'aluminium dissoute électrochimiquement de la cathode pour un temps d'électrolyse donné est proportionnelle à l'intensité de courant imposé (Picard, 2000 ; Khemis *et al.*, 2006 ; Adhoum *et al.*, 2004 ; Lung Chou *et al.*, 2009 ; Bekta *et al.*, 2004 ; Canizares *et al.*, 2006 ; Tchamango *et al.*, 2010 ).

Enfin, la DCO se voit atteindre un abatement total pour un courant de 0.15 A et un abatement de l'ordre de 78 % quand l'intensité du courant est de 0.1 A. L'optimum est atteint plus rapidement quand le courant est plus élevé.

## 2. Suivi du pH

La variation du pH pendant l'électrocoagulation est représentée dans la figure 7.



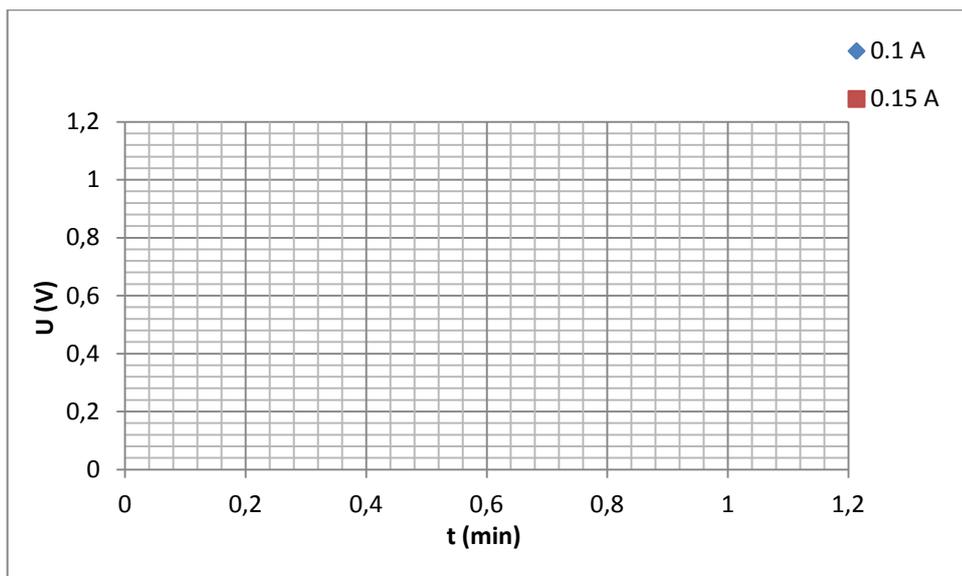
**Figure 7** : variation du pH au cours du temps pour deux valeurs de courant

On remarque une augmentation du pH pour les deux valeurs du courant. Cela s'explique par la production d'hydroxydes par la réduction de l'eau à la cathode (**Kumar et al., 2004 ; Parga et al., 2005**).

En allant vers des pH alcalins, on favorise la déstabilisation des floccs ce qui justifie l'abaissement de l'abattement de la DCO dans la figure 5.

### 3. Suivi du potentiel

Au cours de la manipulation, le potentiel évolue d'une manière progressive comme montré dans la figure 8.



**Figure 8** : Evolution du potentiel du milieu au cours du temps

Cette hausse est due à la résistance qui va croître au fur et à mesure car le courant doit être maintenu constant, selon la loi d'ohm :

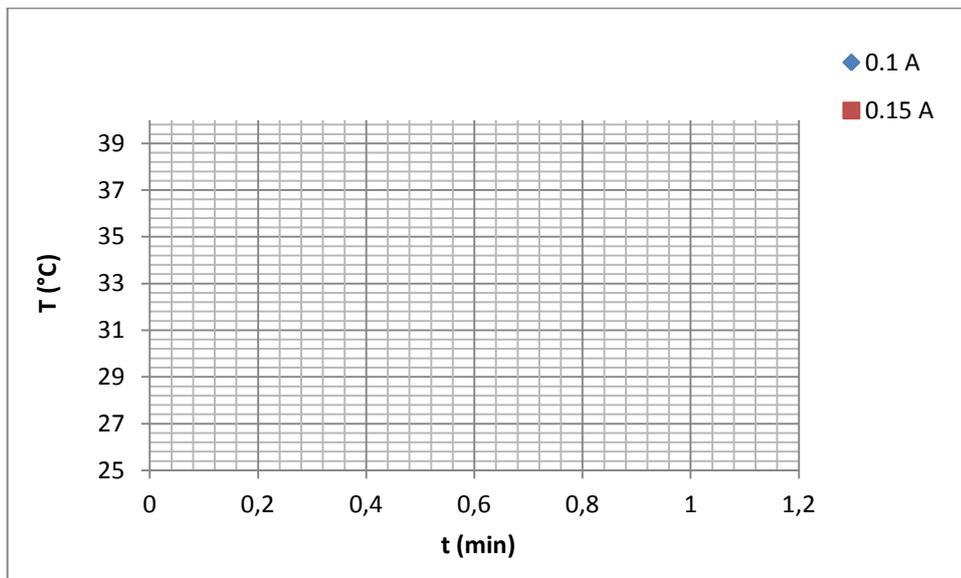
$$U = R.I$$

U : potentiel (V)

I : courant (A)

R : Résistance ( $\Omega$ )

Cela va induire une montée de la température du milieu au cours du temps sous effet de joule, qui est illustrée dans la figure 9.



**Figure 9** : Variation de la température au cours du temps pour deux valeurs du courant

Cette amplification de la température va générer une déstabilisation des floccs qui peut tout autant expliquer l'allure de l'abattement de la DCO.

# **CONCLUSION**

## **Conclusion**

L'objectif de ce travail, était l'étude de l'efficacité de dépollution des eaux issus de l'industrie laitière, et ce par le biais du procédé d'électrocoagulation.

Nous avons cherché à optimiser l'intensité du courant traversant la cellule, et avons conclu qu'un courant de 0.15 A, permet d'avoir de meilleurs rendements et de façon plus rapide que pour la coagulation chimique.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## **Références bibliographiques**

[1] **SNAPPE Jean-Jacques, LEPOUDERE Anne, SREDZINSKI Natacha** « Protéines Laitières » (F4820, 2010).

[2] **DOUAG-TIRICHINE Nassima** « Extraction et caractérisation de quelques plantes locales à pouvoir coagulant le lait » (Ecole Nationale Polytechnique, Magister, 2010).

[3] **ZEMMOUR Nabila** « Contribution à la compensation de la subvention par une meilleure productivité et maîtrise des coûts dans l'industrie du lait : Application laiterie Trèfle et Giplait (unité des Arribs) » (Ecole Nationale Polytechnique, PFE, 2008).

[4] **MOLETTE René, TORRIJOS Michel** « Impact environnemental de la filière laitière » (F1500, 1999).

[5] **GACI Sakoura** « Evaluation de la pollution issue de l'industrie laitière et valorisation du lactosérum » (Ecole Nationale Polytechnique, PFE, 2011).

[6] **CASTILLO de CAMPINS Soraya** « Etude d'un procédé compact de traitement biologique aérobie d'effluents laitiers » (Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Doctorat, 2005).

[7] **MOLETTA René, TORRIJOS Michel** Traitement des effluents de la filière laitière (Techniques de l'Ingénieur, 1999, F1501)

[8] **GHARSA Sabiha** « Caractérisation et traitement par coagulation-floculation et électrocoagulation des lixiviats du CET de Ouled Fayet » (Ecole Nationale Polytechnique, PFE, 2011).

[9] **DROUCHE Nadjib** « Traitement des effluents issus du traitement de surface des plaquettes de silicium par réacteurs électrochimiques » (Ecole Nationale Polytechnique, Doctorat, 2010).

[10] **BELHOUS SI AHMED Dihya** « Déphosphatation des eaux par procédés électrochimiques et chimique » (Ecole Nationale Polytechnique, Magister, 2012).

[11] **BOUHEZILA Farouk** « Traitement des eaux polluées à l'aide d'un nouveau type de réacteurs électrochimiques » (Ecole Nationale Polytechnique, Magister, 2007).

[12] **ZONGO Inoussa** « Etude expérimentale et théorique du procédé d'électrocoagulation : Application au traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie » (Institut National Polytechnique de Lorraine, Doctorat, 2009).

[13] **FEDDAOUI Farah** « Optimisation des paramètres opératoires d'ultrafiltration des protéines à partir d'un rejet » (Ecole Nationale Polytechnique, PFE, 2012).

[14] **YAHIA CHERIF Mohamed El Amine** « Traitement des colorant textiles par procédé floculation-coagulation » (Ecole Nationale Polytechnique, PFE, 2013).

[15] **J.P.KUSHAWAHA et al.** « Treatment of dairy wastesawter by inorganic coagulants : Parametric and disposal studies ». *Water Reaserch* 44 (2010) 5867 – 5874.

# **ANNEXES**

## Annexes

### Annexe 1 : Dosage de la DCO

#### Principe

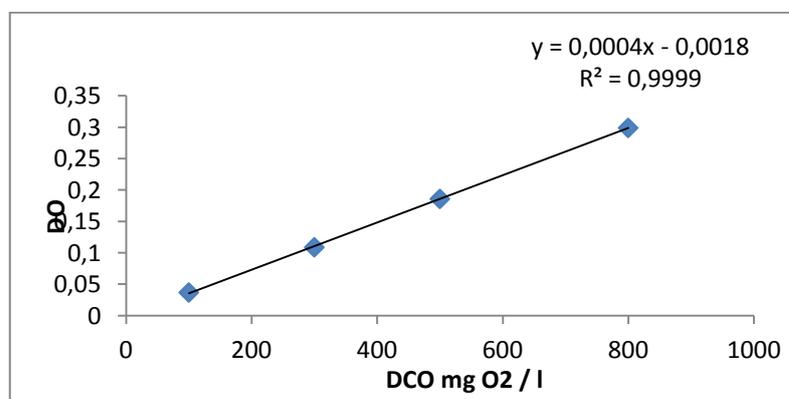
Cela repose sur l'oxydation chimique des matières réductrices par un excès de  $K_2Cr_2O_7$ . Cette oxydation se réalise en milieu sulfurique ( $H_2SO_4$ ), en présence de sulfate d'argent ( $Ag_2SO_4$ ) comme catalyseur et sulfate de mercure ( $HgSO_4$ ), à ébullition à reflux pendant 2 heures dans un bloc chauffant.

#### Réactifs

- Réactif acide : dissolution de 23.4 g de sulfate d'argent dans 4.25 kg d'acide sulfurique
- Solution de digestion : 10.2 g de bichromates de potassium préalablement séchés sont introduit dans 500 mL d'eau distillée auquel on ajoute 167 mL d'acide sulfurique pur et 33.3g de sulfate de mercure.

#### Mode opératoire

- Introduire dans un tube de DCO 2,5 mL de l'échantillon à analyser.
- Ajouter 1,5 ml de solution de digestion.
- Ajouter lentement et avec précaution 3,5 mL de réactif acide.
- Agiter pendant quelques secondes à l'aide de l'agitateur vortex.
- Porter à l'ébullition dans un bloc chauffant pendant 2 h.
- Laisser refroidir jusqu'à température ambiante
- Lire la valeur de la densité optique au spectrophotomètre pour une longueur d'onde de 600nm.



**Figure 9** : Courbe d'étalonnage de la DCO

**Annexe 2 : Dosage des phosphates (ISO N° 6878)****Principe**

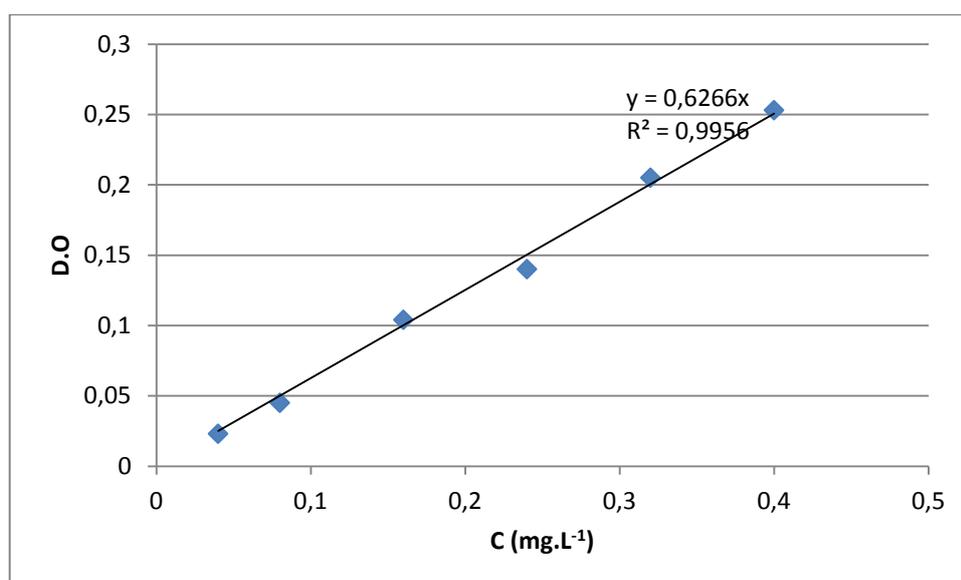
Formation en milieu acide d'un complexe avec le molybdate d'ammonium et le tartrate double d'antimoine et de potassium. Réduction par l'acide ascorbique en un complexe coloré en bleu qui présente deux valeurs maximales d'absorption l'une vers 700 nm, l'autre plus importante à 880 nm.

**Réactifs**

- Réactif mixte :
  - 13 g de heptamolybdate d'ammonium dans 100 mL d'eau distillée.
  - 0.35 g de tartrate d'antimoine dans 100 mL d'eau distillée
  - 150 mL d'acide sulfurique pur dans 150 mL d'eau distilléeMélanger les trois solutions, conserver le réactif dans un flacon brun.
- Acide ascorbique à 10 %

**Mode opératoire**

- Prendre 40 ml d'eau à analyser.
- Ajouter 1 ml acide ascorbique
- Ajouter 2 ml du réactif mixte.
- Attendre 10 mn le développement de la couleur bleue.
- Effectuer la lecture à une longueur d'onde de 880 nm.
- La teneur en phosphates est déduite du graphe d'étalonnage



**Figure 10** : Courbe d'étalonnage des phosphates