



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



Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

Département: Sciences de la matière

Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences de la matière

Filière: Chimie

Option : Chimie des produits naturels

Thème

**TRAITEMENT D'UN EFFLUENT
AGROALIMENTAIRE PAR UNE
METHODE ELECTROCHIMIQUE**

Présenté par :HADJI Amatoullah

Devant le jury :

Présidente : M ^{me} CHABBI Kawther	MAA	Univ. Tébessa
Rapporteur : M ^{lle} TOUAHRIA Soraya	MCB	Univ. Tébessa
Examineur : M ^r MESSAI Laid	MCB	Univ. Tébessa

Date de soutenance : 26 /06/2019

Année universitaire : 2018-2019

Remerciements

Louange à **ALLAH** pour avoir complété cette étude

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à **DOCTEUR TOUAHRIA SORAYA**, pour avoir accepté de me diriger tout au long de ce travail. Je lui témoigne ma profonde reconnaissance pour la disponibilité, la patience et la bienveillance dont elle a fait preuve

Une très grande reconnaissance va au **MADAME CHABBI KAWTHER**, d'avoir accepté de présider le jury de ma soutenance

Je remercie chaleureusement **MONSIEUR Dr. MESSAI LAID**, pour avoir bien voulu examiner ce travail

Je remercie vivement mes collègues de l'institut de chimie



Dédicace :

A mes chers parents et mon mari, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A ma chère grande mère et ma tante pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mes chers frères et mes camarades pour leur appui et leur encouragement,

ملخص:

تحتوي المخلفات السائلة لصناعة الألبان على نسبة كبيرة من المواد العضوية التي تشكل تلوثا كبيرا للبيئة بسبب تصريفها في المحيط بكميات كبيرة و نون معالجة و تعتبر هذه المخلفات عبارة عن حليب كامل مخفف بدرجة كبيرة بواسطة مياه التنظيف.

تفكك هذه المخلفات السائلة أو بالأحرى المياه المستعملة، يؤدي إلى اضطرابات كبيرة في البيئة مثل: زيادة الكتلة الحيوية الميكروبية، انخفاض مستويات الأكسجين الذائب في المياه، انتشار الفطريات و الطحالب و الترسبات الطينية... الخ كل هذه الاضطرابات تؤدي إلى ظاهرة الإثراء الغذائي للأوساط المائية.

في هذه الدراسة طبقنا المعالجة عن طريق التخثر الكهربائي مخبريا، هذه التقنية فعالة في معالجة المياه المستعملة الصناعية. تركيبة مخلفات الملبنة تتغير حسب نشاطها و من الصعب اختبار تأثير العوامل المؤثرة على طريقة المعالجة لهذا السبب قمنا بتحضير محاليل عن طريق مادة الحليب المجفف بتركيز محددة بهدف تحديد الشروط المثالية للتخثر الكهربائي.

تجارب التخثر الكهربائي أجريت على مستوى المخبر في مفاعل زجاجي حجمه 1 لتر.

لتحديد الشروط المثالية لهذه التقنية تم إجراؤها في مفاعل مختبر زجاجي سعته 1 لتر باستخدام صفائح الألمنيوم مع أزمنة مختلفة من المعالجة ، تطبيق قيم مختلفة لفرق الكمون ، أربعة مسافات مختلفة بين قطبي صفحتي الألمنيوم و ، قيم مختلفة للناقلية الكهربائية (إضافة ملح كلوريد البوتاسيوم بتركيز مختلفة)، ثلاث مسافات مختلفة بين قطبي الألمنيوم، تراكيز ابتدائية مختلفة للمحلول المراد معالجته.

بعد تطبيق الشروط النظامية المحددة سابقا على عينة مياه مستعملة حقيقية ناتجة من ملبنة وجدنا ان فعالية المعالجة بلغت نسبة إزالة تقدر ب (90%) بالنسبة للحاجة الكيميائية للأوكسجين (DCO) و(99%) بالنسبة للتعكر مع تكلفة منخفضة لعملية المعالجة.

الكلمات المفتاحية: مخلفات صناعة الألبان، معالجة كهربائية، تخثر كهربائي، ماء مستعمل، تعكر، الحاجة الكيميائية للأوكسجين (DCO).

Résumé

Les effluents des industries laitières sont très chargés en matières organiques et constituent un risque de pollution lorsqu'ils sont déversés avec des grands volumes et sans traitement préalable dans l'environnement. En effet, ces rejets sont considérés comme étant du lait complet fortement dilué par les eaux de nettoyage, leurs dégradations découlent des troubles importants à savoir : une augmentation de la biomasse microbienne, une baisse des teneurs en oxygène dissous, une prolifération de champignons et d'algues, des dépôts de boue...etc. autrement dit une eutrophisation du milieu aquatique.

Dans ce travail, un traitement d'électrocoagulation en mode batch a été réalisé au laboratoire. Ce procédé électrochimique est très sollicité dans le traitement des eaux résiduaires industrielles.

La composition réelle des effluents laitiers est variée selon l'activité de la laiterie et il n'est pas facile de tester l'influence des paramètres affectant le traitement d'une façon régulière. Pour cette raison on a préparé des solutions à base du lait en poudre avec des concentrations définies afin d'optimiser les conditions de ce procédé.

Les essais d'électrocoagulation (EC) en mode batch sont effectués dans un réacteur de laboratoire de 1 litre en utilisant des plaques d'aluminium avec des différents temps d'électrolyse, différentes tensions électriques appliquées, différents conductivités initiales de la solution à traiter (l'ajout d'un électrolyte support KCl à différentes concentrations), 3 distances inter-électrodes, différentes concentrations initiales de la solution à traiter.

L'application des paramètres optimisés sur une eau résiduaire réelle d'une laiterie a montré, une réduction importante de la demande chimique en oxygène DCO (90%), et de la turbidité (99%) avec un faible coût opérationnel.

Mots clés : Effluent laitier, traitement électrochimique, électrocoagulation en mode batch, eau résiduaire, turbidité, demande chimique en oxygène (DCO).

Abstract:

The dairy effluents are heavily loaded with organic matter and pose a risk of pollution when discharged with large volumes and without prior treatment in the environment. In fact, these discharges are considered like a complete milk that is highly diluted by the cleaning water, their degradations cause an environmental perturbations like: the increase in microbial biomass, a lower levels of dissolved oxygen, a proliferation of mushrooms and algae, sludge deposits, etc. In other words, an eutrophication of the aquatic environment.

In this work, a batch electrocoagulation treatment was realized in the laboratory. This electrochemical process is very demanding in the treatment of industrial wastewater.

The actual composition of the dairy effluents is varied according to the activity of the dairy and it is not easy to test the influence of the parameters affecting the treatment in a regular way. For this reason milk powder solutions with defined concentrations have been prepared in order to optimize the conditions of this process.

Electrocoagulation tests in batch mode are carried out in a laboratory reactor of one liter using aluminum plates with different electrolysis times, different electrical voltages, different initial conductivities of the solution to be treated (the addition of a supporting electrolyte KCl at different concentrations), 3 inter-electrode distances, different initial concentrations of the solution to be treated.

The application of optimized parameters to real waste water from a dairy showed, a significant reduction in chemical oxygen demand COD (90%), and turbidity (99%) with low operating cost.

Key words : Dairy effluent, electrochemical treatment, batch electrocoagulation, waste water, turbidity, chemical oxygen demand (COD).

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	01
PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE	
Chapitre I : Généralités sur les eaux résiduaires	
I-1- Introduction	03
I-2- Paramètre de caractérisation de la pollution des eaux	03
I-2-1- Paramètres organoleptiques	03
I-2-1-1- Couleur	03
I-2-1-2- Odeur – Saveur	03
I-2-2- Paramètres physico-chimiques	04
I-2-2-1- Température.....	04
I-2-2-2-Turbidité	04
I-2-2-3- Potentiel Hydrogène (pH)	04
I-2-2-4- Conductivité électrique (σ)	05
I-2-2-5- Matières en suspension (MES)	05
I-2-2-6- Demande biochimique en oxygène (DBO)	05
I-2-2-7- Demande chimique en oxygène (DCO)	05
I-2-3- Paramètres microbiologiques	06
I-2-3-1- Coliformes fécaux.....	06
I-2-3-2- Entérocoques	06
I-2-3-3- Escherichia coli	06
I-3- Différents types des eaux résiduaires.....	07
I-3-1- Eaux résiduaires domestiques.....	07
I-3-2- Eaux résiduaires agricoles.....	07
I-3-3- Eaux résiduaires industrielles.....	07

I-4- Les eaux résiduaires de laiterie.....	08
I-4-1- Introduction.....	08
I-4-2- Le lait et le Lactosérum.....	09
I-4-2-1- Le Lait : Composition et caractéristiques.....	09
I-4-2-2- Définition et types de lactosérum.....	10
I-4-2-3- Composition des lactosérums.....	12
I-4-3- Constituants et caractéristiques des eaux résiduaires de laiterie.....	13
I-4-4- Procédés de traitement des eaux résiduaires laitières.....	13
I-4-4-1- Les prétraitements.....	14
I-4-4-2- Les procédés biologiques anaérobies.....	14
I-4-4-3- Les procédés biologiques aérobies.....	14
I-4-4-4- Les traitements tertiaires.....	15
I-5- L'effet néfaste des eaux résiduaires laitières sur le milieu aquatique (phénomène d'eutrophisation).....	15
I-6- Législation sur l'environnement.....	17

Chapitre II : Traitement d'électrocoagulation

II-1- Introduction.....	19
II-2- Historique du procédé d'électrocoagulation.....	19
II-3- Principe du procédé d'électrocoagulation.....	20
II-4- Réactions aux électrodes.....	22
II-5- Principale loi régissant l'électrocoagulation.....	23
II-5-1- La seconde loi de faraday.....	23
II-5-2- Le rendement énergétique (RE).....	23
II-6- Paramètres influençant le procédé d'EC.....	24
II-7- Applications de l'électrocoagulation.....	24
II-8- Avantages et inconvénients du procédé d'électrocoagulation.....	24
II-8-1- Avantages de l'électrocoagulation.....	24
II-8-2- Inconvénients de l'électrocoagulation.....	25

PARTIE EXPERIMENTALE**Chapitre III : Matériels et méthodes**

III- Matériels et méthodes.....	26
III-1- Solution à traiter.....	26
III-2- Montage électrochimique.....	27
III-3- Les électrodes utilisées.....	28
III-4- Méthodologies d'analyse et équipements utilisés en Electrocoagulation.....	30
III-4-1- Mesure de la turbidité.....	31
III-4-2- Mesure de la Demande Chimique en Oxygène (DCO).....	32

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV-1- Introduction.....	34
IV-2- Paramètres étudiés.....	34
IV-3- Influence de la tension électrique.....	34
IV-4- Effet de la conductivité électrique sur le traitement d'EC.....	37
IV-5- Effet de la concentration initiale sur le traitement d'EC.....	42
IV-6- L'effet de la distance inter-électrode sur l'efficacité d'EC.....	43
CONCLUSION GENERALE.....	45
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	47

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Dans l'industrie agroalimentaire le principal problème se situe au niveau des effluents liquides qui contiennent une charge polluante élevée et qui doivent être épurés avant leur rejet dans le milieu naturel en accord avec la réglementation nationale.

Et comme L'Algérie est le plus gros consommateur de lait et de produits laitiers au niveau maghrébin avec près de à 120 L/an /habitant. Elle est aussi le deuxième importateur mondial du poudre du lait après la chine (**Amellal, 1995 ; Bekhouche, 2011 ; Kirat, 2007 ; Kacimi El Hassani, 2013 ; Meribai et al, 2016**), donc l'industrie laitière représente un secteur plus important au niveau économique.

L'industrie laitière comme toutes les industries agro-alimentaires, utilisent énormément d'eau pour le nettoyage et la fabrication de produits de consommation courante et par conséquent déversent des volumes d'eaux résiduaire importantes d'une manière non optimisée, à charge polluante essentiellement organique (**Hazourli et al, 2007 ; Aitbara et al, 2013**) ; par ce fait la biodégradation de ces matières provoque une consommation importante de l'oxygène dissous d'où une eutrophisation possible du milieu récepteur avec une détérioration de la faune et la flore et formation d'espèces résistantes nocives (**Corthondo et Trepos, 2004 ; Vander borght et Ska, 1989**).

Plusieurs recherches préfèrent l'épuration des eaux résiduaire laitières par des traitements biologiques à cause de leur nature essentiellement organique (**Boeglin, 1998 ; Boeglin, 1999 ; Moletta et Torrijos, 1999a**). Toute fois, la principale contrainte d'utilisation du traitement biologique, provient de la difficulté d'acclimater les bactéries à certains rejets et à leur inhibition par certains composants chimiques (**Alinsafi et al, 2005**) ainsi que la durée du traitement.

Pour éviter les problèmes liés aux traitements biologiques (**Greaves et al, 1999**), les recherches actuelles visent donc à limiter la contamination d'origine industrielle en proposant des technologies simples et moins coûteuses comme celle qui a été employée dans cette étude et qui utilise le processus d'EC en batch. Ce processus très sollicité dans le traitement d'eaux potables ou usées, permet la clarification de ces eaux (**Ivanishvili et al, 1987 ; Larue et al, 2003 ; Cãnizares et al, 2007**).

Dans le but d'évaluer la performance de cette technique, et l'optimisation de ses conditions opératoires, nous avons réalisées des essais sur des solutions artificielles à base du lait en poudre avec des concentrations définies.

Dans la partie bibliographique de ce travail, nous avons essayé de donner en premier lieu un aperçu général sur les eaux résiduaires et surtout les effluents liquides de la laiterie et leurs techniques du traitement. En second lieu une attention bien particulière a été donnée à la synthèse bibliographique sur la méthode électrochimique de traitements des eaux résiduaires en employant le processus d'électrocoagulation (EC) en batch. Ce processus très efficace dans le traitement d'eaux résiduaires laitières, permet la clarification de ces eaux (Aitbara et al, 2014). Il a été prouvé que cette technique offre la simplicité, l'efficacité, la compatibilité environnementale, la sécurité, la sélectivité, pour un faible coût (Mollah et al, 2004).

La partie expérimentale de cette étude divisée en 2 chapitres : L'un est réservé pour détailler l'ensemble des méthodes expérimentales et du matériel utilisé et l'autre est consacré aux résultats obtenus suite à la clarification des solutions artificielles étudiées et l'effluent réel d'une laiterie.

PARTIE

BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I :

Généralités sur les eaux

résiduaire

I-1- Introduction :

Des défis majeurs qui font face à l'espèce humaine aujourd'hui est de fournir de l'eau propre à une majorité vaste de la population autour du monde (**Slimane, 2010**). La pollution des eaux est définie comme toute modification physique ou chimique de la qualité des eaux qui a une influence négative sur les organismes vivants. Donc on dit que l'eau est polluée lorsque sa composition ou son état est directement ou indirectement modifiée par l'action humaine (**Ezziane, 2007**). L'utilisation des eaux engendre un nouveau produit appelé effluent ou eau résiduaire. Les problèmes liés aux eaux résiduaires sont aussi anciens que ces eaux elles mêmes et ils s'aggravent suivant la croissance démographique, l'amélioration de la qualité de vie des populations et le développement des activités industrielles.

I-2- Paramètre de caractérisation de la pollution des eaux :

Les normes de rejet des eaux résiduaires, fixent des indicateurs de qualité physico-chimique et biologique. Ce potentiel de pollution généralement exprimés en mg/l, est quantifié et Apprécié par une série d'analyses. Pour les eaux usées domestiques, industrielles et les effluents naturels, on peut retenir les analyses suivantes (**Metahri, 2012**).

I-2-1- Paramètres organoleptiques :

I-2-1-1- Couleur :

Pour les eaux résiduaires, le degré de couleur est très élevé. Elle peut être due à certaines impuretés minérales, mais également à certaines matières organiques. Elle doit être éliminée pour la réutilisation de l'eau. Cependant l'élimination de la couleur s'accompagne également de celles de certaines matières organiques indésirables (**Beaudry et Tardat-Henry, 1993**).

I-2-1-2- Odeur – Saveur :

Dans l'eau, diverses molécules sont responsables des odeurs. Elles proviennent des composés azotés ou soufrés : (amines, ammoniacque...). Mais la molécule qui pose le plus de problème est l'hydrogène sulfuré (H_2S), qui possède une odeur caractéristique d'œuf pourri.

La saveur de l'eau est due à de nombreuses molécules (fer, manganèse, le chlore actif...) et ne révèle pas si l'eau est polluée ou non (**Abbas et Messaad, 2017**).

I-2-2- Paramètres physico-chimiques :

I-2-2-1- Température :

La température de l'eau, est un facteur écologique. Elle agit sur la densité, la viscosité, la solubilité des gaz dans l'eau, la dissociation des sels dissous, de même que sur les réactions chimiques et biochimiques, le développement et la croissance des organismes vivant dans l'eau et particulièrement les microorganismes (Makhoukh et al, 2011). Des changements brusques de température de plus de 3°C s'avèrent souvent néfastes (Devillers et al, 2005). Elle intervient aussi dans l'efficacité de certains traitements tels que la décantation, la coagulation-floculation et la désinfection (Abbas et Messaad, 2017).

I-2-2-2-Turbidité :

La turbidité représente l'opacité d'un milieu trouble. C'est la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de matières non dissoutes. Elle est causée dans les eaux, par la présence de matières en suspension (MES) fines. Une faible part de la turbidité peut être due également à la présence de matières colloïdales d'origine organique ou minérale (Abibsi, 2011). Ce paramètre se mesure sur le terrain à l'aide d'un turbidimètre et prend pour unité NTU (Nephelometric Turbidity Unit). Les classes de turbidité usuelles sont données dans le tableau 1.

Tableau 1 : Classes usuelles de turbidité (Rodier et al, 2009).

Turbidité (NTU)	Classe
< 5	Eau claire
> 5	Eau légèrement trouble
< 50	Eau trouble
> 200	La plupart des eaux de surface en Afrique atteignent ce niveau de turbidité

I-2-2-3- Potentiel Hydrogène (pH) :

Le pH est une mesure de l'acidité de l'eau c'est-à-dire de la concentration en ions (H_3O^+). Les eaux résiduaires constituent un système physico-chimique complexe, caractère acide ($1 < pH < 7$) ou basique ($7 < pH < 14$), par ailleurs les milieux naturels sont généralement tamponnés par les divers équilibres entre les espèces moléculaires ou ionisées présentes, dont les équilibres carboniques.

En général, les effets du pH se font surtout sentir par l'influence qu'exerce ce paramètre sur les équilibres entre les autres composés du milieu (azote ammoniacal, sulfure de sodium, acide cyanhydrique, les métaux, etc..) lorsqu'ils ont une toxicité variable selon qu'ils se trouvent ou non sous forme ionisée (Gerard, 1999).

I-2-2-4- Conductivité électrique (σ) :

La conductivité est la propriété que possède une eau à favoriser le passage d'un courant électrique. Elle fournit une indication précise sur la teneur en sels dissous. La conductivité s'exprime en micro Siemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$). La mesure de la conductivité permet d'évaluer la minéralisation globale de l'eau. Sa mesure est utile car au-delà de la valeur limite de la salinité correspondante à une conductivité de 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la prolifération de microorganismes peut être réduite d'où une baisse du rendement épuratoire (Metahri, 2012).

I-2-2-5- Matières en suspension (MES) :

Les matières en suspension comprennent toutes les matières minérales ou organique qui ne se solubilisent pas dans l'eau .ces matières affectent la transparence de l'eau et diminuent la pénétration de la lumière et, par suite, la photosynthèse (Devillers et al, 2005). Les MES possèdent une large surface d'adsorption et constituent de ce fait un support idéal pour les ions, les molécules diverses et les agents biologiques (bactéries, champignons...) dont ils facilitent la dispersion. Elles contribuent également à un déséquilibre du milieu aquatique elles provoquent la chute de la teneur en oxygène dissous dans l'eau (Balaska, 2005).

I-2-2-6- Demande biochimique en oxygène (DBO) :

La demande biochimique en oxygène (DBO) représente la quantité d'oxygène utilisée par les microorganismes pour oxyder partiellement totalement les matières organiques présentes dans l'eau. La DBO est exprimée en mg d' O_2/l (Mouaz et Bentschich, 2017).

I-2-2-7- Demande chimique en oxygène (DCO) :

La Demande chimique en oxygène (DCO) représente la quantité totale de pollution oxydable. Elle correspond à la quantité d'oxygène qu'il faut fournir grâce à des réactifs chimiques puissants pour oxyder les matières (biodégradables et non biodégradables)

contenues dans l'effluent (Abbas et Messaad, 2017). Dans les eaux résiduaires de l'industrie laitière, les substances sont facilement biodégradées, ce qui se traduit par une consommation rapide d'oxygène avec un DCO élevé (Rodier et al, 2009 ; Gerard, 1999).

I-2-3- Paramètres microbiologiques :

Les eaux résiduaires contiennent de nombreux germes (champignons, amibes, protozoaires, bactéries, virus) dont certains sont pathogènes. La présence de coliformes et de streptocoques témoigne d'une contamination fécale de ces eaux, qu'il est impératif de les épurer pour préserver le milieu naturel (Bonnefoy et al, 2002). Il est détaillé ci-dessous, les espèces les plus virulentes et rencontrées en milieu hydrique souillé.

I-2-3-1- Coliformes fécaux :

C'est un groupe de bactéries utilisé comme indicateur de contamination fécale. Selon l'organisation internationale de standardisation (ISO), le groupe des coliformes comprend des bacilles gram négatifs, capables de se multiplier en présence de sels biliaires ou d'autres agents de surface ayant des propriétés équivalentes et capables de fermenter le lactose, avec production d'acide et de gaz en 24 heures à une température comprise entre 35 et 37°C. Ce groupe renferme des espèces vivantes dans les eaux et le sol, des espèces d'origine fécale, habituellement rencontrées dans les matières fécales humaines ou animales, les eaux résiduaires (Balaska, 2005).

I-2-3-2- Entérocoques :

Les entérocoques sont des bactéries à métabolisme anaérobie à Gram positif, se présentant habituellement sous forme de chaînettes (Abibsi, 2011). Elles sont utilisées comme indicateur de contamination d'origine fécale ou une infiltration d'eau de surface.

I-2-3-3- *Escherichia coli* :

Escherichia coli est une bactérie qui se trouve couramment dans le tractus gastro-intestinal des humains et des animaux à sang chaud. *E. coli* est un indicateur privilégié de la contamination fécale lors de l'évaluation de la qualité de l'eau. (Moataz et Bentchich, 2017).

I-3- Différents types des eaux résiduaires :

En parlant de l'eau résiduaire il semble important d'avoir une idée sur sa définition, son origine et ses caractéristiques, ainsi que les différentes méthodes utilisées pour son épuration. Les eaux résiduaires sont des eaux chargées de polluants, solubles ou non, provenant essentiellement de l'activité humaine (**Rejsek ,2002**). Une eau résiduaire est généralement un mélange des matières polluantes répondant à ces catégories, dispersées ou dissoutes dans l'eau qui a servi aux besoins domestiques ou industriels (**Grosclaude, 1999**). Donc sous la terminologie d'eau résiduaire, on groupe des eaux d'origines très diverses qui ont perdu leurs puretés ; c'est-à-dire leurs propriétés naturelles par l'effet des polluants après avoir été utilisées dans des activités humaines (domestiques, industrielles ou agricoles).

I-3-1- Eaux résiduaires domestiques :

Elles proviennent des différents usages domestiques de l'eau. Les eaux résiduaires domestiques comprennent les eaux ménagères (eaux de toilette, de cuisine) et les eaux vannes (urines et matières fécales). Ces eaux contiennent des matières minérales (chlorures, phosphates, sulfates, etc..), des matières organiques constituées de composés ternaires, tels que les sucres et les graisses (**Vaillant, 1974 ; Zeghoud, 2014**).

I-3-2- Eaux résiduaires agricoles :

Ce type de pollution s'est intensifié depuis que l'agriculture est entrée dans un stade d'industrialisation assez avancé. La concentration des élevages entraîne un excédent de déjections animales et Des produits phytosanitaires (herbicides, fongicides, insecticides...) (**Grosclaude, 1999**). Qui finissent par enrichir les cours d'eau et les nappes souterraines en dérivés azotés, encourageant ainsi une source de pollution bactériologique (**Abbas et Messaad, 2017**).

I-3-3- Eaux résiduaires industrielles :

Les eaux résiduaires d'origine industrielle ont généralement une composition plus spécifique et directement liée au type d'industrie considérée. Indépendamment de la charge de la pollution organique ou minérale, de leur caractère putrescible ou non, elles peuvent avoir des caractéristiques de toxicité propres liées aux produits chimiques transportés (**Rodier, 2005**).

Selon leur origine industrielle elles peuvent également contenir :

- des graisses (industries agroalimentaires, équarrissage).
- des hydrocarbures (raffineries).
- des métaux (traitements de surface, métallurgie).
- des acides, des bases et divers produits chimiques (industries chimiques divers, tanneries).
- de l'eau chaude (circuit de refroidissement des centrales thermiques).
- des matières radioactives (centrales nucléaires, traitement des déchets radioactifs).

(Metahri, 2012).

I-4- Les eaux résiduaires de laiterie :

I-4-1- Introduction :

Les rejets aqueux des industries agroalimentaires sont intégrés dans les eaux résiduaires industrielles. Les laiteries par exemple **photo 1**, utilisent énormément d'eau pour la fabrication du lait et de ses dérivés ainsi que pour le nettoyage et la désinfection

(Demirel et al, 2005 ; Hazourli et al, 2007 ; Boumaaza, 2014).

Malheureusement une partie non négligeable de cette eau générée par les installations de production est déversée sans prétraitement dans le milieu récepteur (oued, mer) pouvant engendrer une eutrophisation de ce milieu (Tchamango et al, 2010). Cette eau est caractérisée le plus souvent par des concentrations élevées de la demande biologique en oxygène (DBO) et la demande chimique en oxygène (DCO) en même temps avec la présence de l'azote et du phosphore. En raison de ces caractéristiques polluantes, les eaux usées issues de l'industrie laitière doivent être traitées avant leur rejet dans l'environnement.



Photos 1 : Laiterie (Boumaza, 2014).

I-4-2- Le lait et le Lactosérum :

I-4-2-1- Le Lait : Composition et caractéristiques :

Le lait a été défini en 1908, au cours du Congrès International de la Répression des Fraudes à Genève comme étant : « Le produit intégral de la traite totale et ininterrompue d'une femelle laitière bien portante, bien nourrie et non surmenée. Le lait doit être recueilli proprement et ne doit pas contenir de colostrum» (Alais, 1975). Cet aliment fait partie de la culture humaine depuis des siècles.

Des millions de personnes en boivent chaque jour. Avec le temps, ils apprirent à le transformer pour varier le goût et la texture. La composition du lait varie d'un type à l'autre (entier, demi-écrémé, écrémé). Cependant, on retrouve des caractéristiques communes : qualité protéique, présence de lactose, de vitamines et des sels minéraux. La différence essentielle entre ces différents laits concerne donc le pourcentage de matières grasses. En plus, Il y a autant de calcium dans du lait entier que dans du lait écrémé.

Le tableau 2 donne les composantes principales d'un lait entier.

Tableau 2 : Concentration moyenne des constituants du lait entier (Daufin et al, 1998).

Composition	Concentration g.Kg ⁻¹ de lait
Matière grasse	40
Eau	863
Lactose	46
Sels minéraux	6
Acides organiques	2
Caséines	26
Protéines solubles (α - β)	6
Immunoglobulines	1

Les trois phases caractéristiques du lait :

1. Phase colloïdale : la caséine, la principale protéine du lait, est associée à des sels minéraux (Calcium ...) Et se trouve dispersée sous la forme de nombreuses particules solides en suspensions trop petites pour déposer, leur dispersion dans le lait est appelé suspension colloïdale.
2. Phase lipidique : les graisses et les vitamines solubles dans les lipides laitiers se rencontrent sous forme d'émulsion.
3. Phase aqueuse : Le lactose, certaines protéines, des sels minéraux.

I-4-2-2- Définition et types de lactosérum :

Le lait peut être coagulé en lui ajoutant de la présure ou en l'acidifiant par l'intermédiaire de bactéries lactiques ou par acidification chimique pour la fabrication des fromages. Il en résulte une agrégation des micelles de caséine donnant un gel (ou coagulum). Le lactosérum ou petit-lait ou sérum **photo 2** est la partie liquide issue de la coagulation du lait, il est un liquide jaune-verdâtre, composé d'environ 94 % d'eau de sucre (le lactose), de protéines, de très peu de matières grasses et de sels minéraux (Ali Mahamane Oumarou et Yacouba Mai Kodomi, 2015 ; Muller et al, 2003). La production de 10-20 Kg de fromage donne 80 à 90 Kg de lactosérum (Ilker et al, 2006). Il est estimé que 40-50% du lactosérum est utilisé comme engrais, le reste étant employé principalement en tant qu'alimentation des animaux (Yebo et al, 2006).

Deux grandes classes de lactosérums sont souvent distinguées en fonction du coagulant : le lactosérum doux, obtenu par coagulation du lait avec de la présure et le lactosérum acide, obtenu par coagulation du lait par acidification provoquée par le métabolisme des bactéries lactiques ou par acidification chimique. On obtient en effet environ 9 litres de lactosérum et 1 kg de fromage à partir de 10 litres de lait.



Photo 2 : Lactosérum.

On distingue donc maintenant les lactosérums selon l'acidité du liquide obtenu :

I-4-2-2-1- Lactosérum doux :

Le lactosérum doux est obtenu après la coagulation de la caséine sous l'action de la Présure sans acidification préalable, on obtient alors un sérum doux, pauvre en sels minéraux et riche en lactose et en protéine, ce type de lactosérum issu de la fabrication de fromage à pâte pressée cuite ou non cuite (Emmenthal, Saint Paulin, Edam...etc.), est de pH variant entre 5- 6 - 3. Les sérums doux sont généralement déshydratés (**Morr et al, 1993 ; Moletta, 2002**).

I-4-2-2-2- Lactosérum acide :

Le lactosérum acide obtenu par coagulation du lait par acidification provoquée par le métabolisme des bactéries lactiques ou par acidification chimique (**Benslama, 2016**). Les lactosérums acides sont moins riches en lactose et plus riche en minéraux. Ils sont Aussi plusensemencés en germes lactiques et moins sujets à des fermentations que les Lactosérums doux (**Moletta, 2002**). Les lactosérums acides sont souvent utilisés à l'état liquide provient de la fabrication des pâtes fraîches et des pâtes molles, son pH varie entre 4,5 et 5 (**Adrian et al, 1991**).

I-4-2-3- Composition des lactosérums :

Autrefois considéré comme déchet de la fabrication fromagère et donc comme sous-produit, le lactosérum est désormais considéré comme un co-produit. Représentant au moins 85% du lait transformé en fromage, sa valorisation est un enjeu à la fois économique et écologique puisqu'il possède une Demande Chimique en Oxygène (DCO) très élevée ce qui en fait donc un produit polluant ne pouvant plus être rejeté dans la nature (Chaque fois qu'un litre de lait est mis en œuvre pour fabriquer un fromage, il y a production de 0.6 à 0.9 litre de lactosérum). L'intérêt relativement nouveau pour ce produit résulte essentiellement de sa composition riche notamment en protéines grâce à leurs propriétés technico-fonctionnelles et nutritionnelles particulièrement intéressantes en Industrie Alimentaire (Mulvihill and Fox, 1989 ; Hambraeus, 1992).

En plus, le lactosérum est riche en vitamines hydrosolubles. Qu'il soit doux ou acide, le lactosérum est constitué principalement de lactose, de protéines solubles et d'ions minéraux. En fonction des différents paramètres de production utilisés dans les industries laitières, la teneur en caséines résiduelles, en matières grasses et en certains ions minéraux peut varier (Bergel et al, 2004 ; Benabbou et Bentalab, 2015).

La composition des différents lactosérums est décrite dans le **tableau 3**.

Tableau 3 : Composition des lactosérums.

	Lactosérum doux (g/L)	Lactosérum acide (g/L)
Extrait Sec Total (E.S.T)	66	63
Protéines	6,6	6,1
Lactose	52	44
Lipides	0,2	0,3
Minéraux	5	7,5
Calcium	0,5	1,6
Phosphore	1	2
Sodium	0,53	0,51
Zinc	0,3	2,3
pH	6	4,6

D'après ce tableau on constate que Le lactosérum doux possède un peu plus de protéines et de lactose puisque ce dernier n'est pas fermenté en acide lactique, contrairement au lactosérum acide qui a été produit par fermentation lactique. En plus les lactosérums doux sont pauvres en calcium (reste dans le caillé pour participer à la coagulation des protéines), alors que les lactosérums acides sont riches en calcium (**Morr et al, 1993**).

I-4-3- Constituants et Caractéristiques des eaux résiduaires de laiterie :

Les effluents issus de la transformation laitière sont caractérisés par des charges élevées de matière organique. En effet les effluents de laiterie contiennent essentiellement des résidus de produits laitiers dilués. Les produits de nettoyage peuvent également être à l'origine de taux élevés de phosphore. De plus, la qualité des effluents dépend des produits finis fabriqués sur le site. La constitution des eaux résiduaires de laiterie dépend des produits laitiers et leurs dérivés et des procédés de production mis en œuvre.

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, acide 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 (**Moletta et Torrijos, 1999**). L'eau est une constituante majeure ; une laiterie consomme de 2 à 10 litres d'eau par litre de lait traité (**Daufin et al, 2000**). Les eaux résiduaires de laiterie sont considérées comme étant du lait fortement dilué (**Sachon, 1980**).

I-4-4- Procédés de traitement des eaux résiduaires laitières :

Les stations de traitement des eaux résiduaires laitières, indépendamment du type de traitement c'est pour réduisent la charge organique et les solides en suspension et enlèvent les constituants chimiques des eaux usées qui peuvent être toxiques aux récoltes ainsi que les constituants biologiques (microbes pathogènes) qui concernent la santé publique en général. Les différents degrés de traitements conventionnels sont (**Zeghoud, 2014**) :

I-4-4-1- Les prétraitements :

Un prétraitement comportant un certain nombre d'opérations physiques ou mécanique. Il est dessiné à extraire de l'eau brute la plus grande quantité possible d'éléments, dont la nature où la dimension constituerait un gêne pour les traitements ultérieurs (**Harrat, 2013**). La première étape du traitement consiste à débarrasser les effluents de tout élément susceptible (de taille comprise entre 0,1 et 50 mm) de gêner le fonctionnement des ouvrages (**Grosclaude, 1999**).

Ils font appel :

- 1- A des procédés mécaniques, comme des grilles ou des tamis, pour éliminer des grosses Particules transportées par les eaux.
- 2- A des procédés physiques, comme des phénomènes de décantation pour éliminer les sables, ou de flottation pour éliminer les graisses (matières graisseuses) (**Rejsek, 2002**).

I-4-4-2- Les procédés biologiques anaérobies :

Les traitements anaérobies font appel à des bactéries n'utilisant pas de l'oxygène correspondent à la transformation d'une partie de la matière organique biodégradable en biogaz (méthane et dioxyde de carbone (**Bourbon, 2018**)). Ce type de fermentation est appelé digestion en hydrologie. C'est une opération délicate qui demande une surveillance importante. En effet la température doit être maintenue à un niveau très stable et suffisamment élevé. Il faut aussi éviter les écarts brutaux de pH et les substances inhibitrices du développement bactérien, à titre d'exemple : les cyanures, les sels de métaux lourds et les phénols.

I-4-4-3- Les procédés biologiques aérobies :

Les micro-organismes utilisés exigent un apport permanent d'oxygène (**Metahri, 2012**). Les procédés biologiques aérobies consistent en une élimination des matières organiques biodégradables dans des conditions aérobies. Efficaces pour réduire la DCO et la DBO, les procédés aérobies sont les plus répandus sur les sites de transformation laitière. Il s'agit de procédés maîtrisés et rentables (**Bourbon, 2018**).

I-4-4-4- Les traitements tertiaires :

Les traitements tertiaires appelés aussi les traitements complémentaires qui visent l'élimination de la pollution l'azotée et phosphatée ainsi que la pollution biologique des eaux usées domestiques, ayant déjà subi au préalable des traitements primaires et secondaires qui s'avèrent insuffisants pour arriver au bout de ces polluants. Elles souvent considérés comme facultatif permettent d'affiner ou d'améliorer le traitement secondaire.

Les traitements tertiaires visent à améliorer la qualité générale de l'eau. Leur utilisation s'impose lorsque la nature des milieux récepteurs recevant l'eau dépolluée l'exige. On y distingue généralement les opérations suivantes :

- 1- La nitrification-dénitrification et déphosphoration biologique ou mixte (biologique et Physico-chimique).
- 2- La désinfection bactériologique et virologique (Metahri, 2012).

I-5- L'effet néfaste des eaux résiduaires laitières sur le milieu aquatique (phénomène d'eutrophisation) :

Chacun des êtres vivants participe à un équilibre qui assure la pérennité des écosystèmes. La restitution au milieu aquatique d'eaux polluées peut rompre cet équilibre. La biodégradabilité des effluents engendrés par les eaux usées d'origines diverses les rend, en principe, susceptibles de s'intégrer dans l'édifice biologique aquatique et d'être ainsi assimilés et transformés en matières vivantes. L'industrie laitière déverse des charges en matière organique souvent très supérieures à la capacité d'absorption locale des cours d'eau ; il en résulte des troubles importants : baisse des teneurs en oxygène, mortalité des poissons, prolifération d'organismes à cycle court (algues, bactéries, champignons, etc) et des dépôts de boues. Les effets induits sont d'autant plus apparents que ces activités ont souvent des implantations situées à proximité ou sur des cours d'eau particulièrement sensibles à la pollution. L'action néfaste sur le milieu récepteur est en rapport avec les constituants organiques et minéraux dissous et non dissous ainsi que les germes pathogènes (Gaël, 2002).

Dans le cas d'extrême appauvrissement du milieu aquatique en oxygène, on parle alors **d'eutrophisation** du milieu. Ce terme est fréquemment utilisé dans l'étude des eaux résiduaires surtout stagnantes (dont l'eau n'est pas suffisamment renouvelée) ou à vitesse de circulation très réduite. L'eutrophisation est la réponse du milieu aquatique à un **enrichissement** excessif en substances nutritives, essentiellement le Phosphore et l'Azote ; ces principaux nutriments sont mobilisés au bénéfice d'une forte augmentation de la production végétale dans le milieu aquatique **photo 3** pouvant aller jusqu'à une prolifération anarchique. La **figure 1**, symbolise un tel système, lorsque l'évolution atteint le stade de l'anaérobiose, on parle alors de milieu eutrophé.

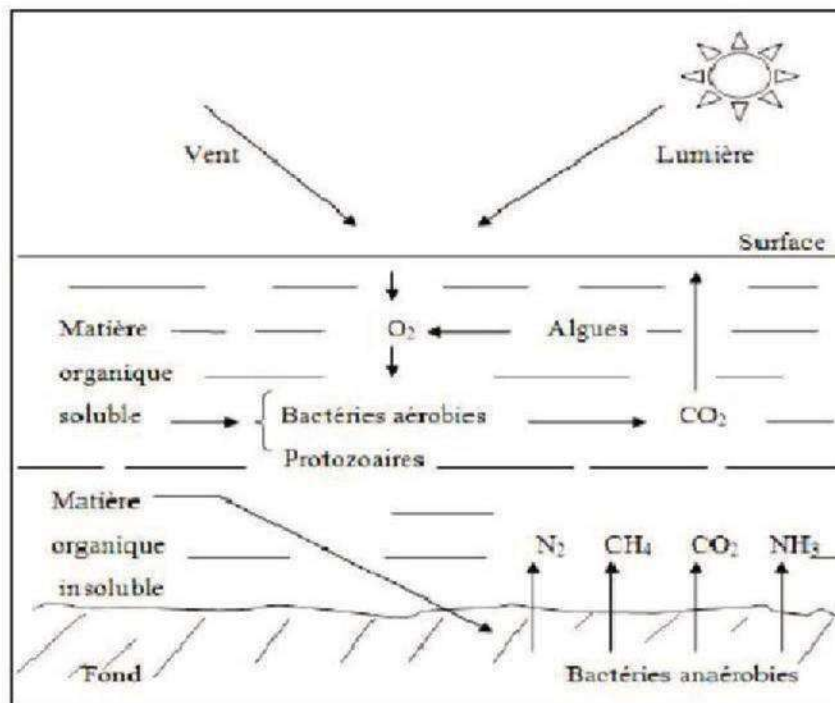


Figure 1 : Représentation schématique des principaux facteurs participant à l'eutrophisation du milieu aquatique



Photo 3 : Couverture végétale d'une mare eutrophisée

I-6- Législation sur l'environnement :

Depuis 2003 l'année d'apparition de la loi cadre de l'environnement: Protection de l'Environnement dans le cadre du Développement Durable N°03-10 du 19 juillet 2003, la législation Algérienne est dotée d'une réglementation sur les rejets d'effluents liquides industriels définissant les valeurs limitent des ces rejets 'Décret exécutif N °06-141 au 19 avril 2006' (**tableau 04**).

Tableau 04 : Valeurs limites des paramètres de rejets d'effluents liquides industriels (JORADP N° 26, 2006)

Paramètres	Unité	Valeurs Limites	Tolérances aux valeurs limites Anciennes Installations
Température	°C	30	30
PH	-	6,5 - 8,5	6,5 - 8,5
MES	mg/l	35	40
Azote Kjeldahl	"	30	40
Phosphore total	"	10	15
DCO	"	120	130
DBO ₅	"	35	40
Aluminium	"	3	5
Substances toxiques bio-accumulable	"	0,005	0,01
Cyanures	"	0,1	0,15
Fluor et composés	"	15	20
Indice de phénols	"	0,3	0,5
Hydrocarbures totaux	"	10	15
Huiles et Graisses	"	20	30
Cadmium	"	0,2	0,25
Cuivre total	"	0,5	1
Mercure total	"	0,01	0,05
Plomb total	"	0,5	0,75
Chrome Total	"	0,5	0,75
Etain total	"	2	2,5
Manganèse	"	1	1,5
Nickel total	"	0,5	0,75
Zinc total	"	3	5
Fer	"	3	5

Chapitre II :

Traitement

d'électrocoagulation

(EC)

II-1- Introduction :

Le monde a connu un développement très important dans le secteur industriel tandis qu'il y a toujours des risques et des conséquences néfastes sur l'environnement et la santé publique. Pour cela les écologistes, les biologistes et les chimistes sont intéressés depuis longtemps aux procédés et techniques qui servent à limiter la pollution Engendrée par les industries (**Boudjema, 2007**). Les recherches actuelles sont orientées vers des technologies simples, efficaces et moins coûteuses pour le traitement et la gestion de rejets industriels.

De ce point de vue, les procédés électrochimiques sont particulièrement intéressants. Ils sont reconnus pour leur efficacité de traitement et d'assainissements des eaux (**Feng et al, 2003**). Ils se caractérisent par un aspect non polluant et une facilité d'automatisation et constituent l'une des méthodes visant à réduire l'emploi de réactifs. Parmi ces techniques on a l'électrocoagulation (EC) qui est l'objet de ce travail, elle a montré son efficacité dans le traitement de divers rejets industriels et urbain (**Naje et al, 2015 ; Vinodha et al, 2012 ; Irmedez et al, 2006 ; Chen et al, 2000 ; Zidane et al, 2012 ; Khennoussi et al, 2013**).

En effet, l'EC est un procédé électrochimique complexe qui met à profit un éventail de phénomènes physiques et chimiques pour entraîner l'abatement des polluants disséminés dans l'effluent, ce phénomène s'opère à l'aide d'électrodes (anodes et cathodes), lesquelles sont plongées dans le milieu aqueux, la quantité d'ions métalliques injectés est contrôlée par le courant électrique (**Holt et al, 2004**).

II-2- Historique du procédé d'électrocoagulation :

Le premier document rapportant l'utilisation de l'EC pour le traitement des effluents est un brevet américain déposé en 1880 par Webster qui utilisait des électrodes en fer.

En 1990, Harries dépose un nouveau brevet sur ce procédé : les anodes étaient alors constituées par des plaques de fer et d'aluminium.

En 1946, Stuart étudie plus précisément le procédé avec un réacteur équipé d'électrodes en aluminium comparant le procédé de coagulation physico-chimique et le procédé électrochimique, il observe que le phénomène de coagulation semble plus rapide avec la méthode électrochimique.

(**Bollina, 1947**) se base sur les résultats de Stuart et réalise une comparaison économique des deux procédés. Il estime que pour les installations de petites tailles, l'EC peut s'avérer plus compétitive que les procédés classiques.

Les recherches se sont poursuivies sur les effluents de caractéristiques très différentes, **Holden en 1956** s'intéresse à la possibilité de traiter par cette technique (EC), les eaux de surface pour la production d'eau potable, alors que **Sadek (1970)** propose l'élimination des phosphates des eaux résiduaires.

(Back et al, 1974) emploient ce procédé pour le traitement des effluents issus des industries agroalimentaires. Les efforts récents concernant le développement des procédés propres de traitement des eaux, ont permis à l'électrocoagulation de prendre de l'importance, offrant ainsi un coût d'investissement et de traitement compétitif, et une large efficacité d'élimination des polluants **(Bengana et Bouda, 2013)**.

L'utilisation de l'EC s'est accrue et bon nombre d'industriels font appel à cette technique pour le traitement de leurs effluents. La technologie a été optimisée pour minimiser la consommation énergétique et pour augmenter l'efficacité du traitement **(Mollah et al, 2001 ; Holt et al, 2005)**.

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 grâce à leur prix abordable et à leur forme ionique qui présente une valence élevée **(Koby et al, 2003 ; Bennajah, 2007)**.

II-3- Principe du procédé d'électrocoagulation :

Le procédé d'électrocoagulation **figure 2** est basé sur le principe des anodes solubles. Il s'agit d'imposer un courant (ou potentiel) entre deux électrodes (fer ou aluminium). Les anodes et les cathodes utilisées peuvent avoir différentes configurations, elles peuvent se présenter sous forme de plaques ou des boules **(Lemlikchi, 2012)**, immergées dans un électrolyte contenu dans un réacteur pour générer, in situ des ions (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+}) susceptibles de produire un coagulant en solution et de provoquer une coagulation Floculation des polluants que l'on souhaite éliminer. L'électrolyse peut également coaguler les composés solubles oxydables ou réductibles contenus dans l'effluent. Le champ électrique crée un mouvement d'ions et de particules chargées. Cette action permet de rassembler les matières en suspension sous forme de floes qu'on élimine ensuite par un procédé physique classique (décantation, flottation, filtration) **(Abbas et Messaad, 2017 ; Mohammad et Muttucumar, 2006)**.

Les processus d'EC impliquent les trois étapes suivantes :

1. formation des coagulants par oxydation électrolytique de l'électrode sacrificielle (l'anode).
2. déstabilisation des particules de la suspension, et le cassage des émulsions.
3. agrégation des phases déstabilisées pour former des floccs.

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

1. Compression de la couche diffuse autour des espèces chargées par les interactions avec les ions générés par l'oxydation de l'anode sacrificielle.
2. Neutralisation de la charge des espèces ioniques présentes dans le rejet aqueux à l'encontre des ions produits par dissolution électrochimique de l'anode sacrificielle. Ces ions réduisent la répulsion électrostatique entre les particules jusqu'à ce que les forces d'attraction de Van der Waals prédominent, causant ainsi la coagulation.
3. Formation du flocc: le flocc formé suite à la coagulation crée les boues qui piègent et relie les particules colloïdales restant dans le milieu aqueuse (**Lemlikchi, 2012**).

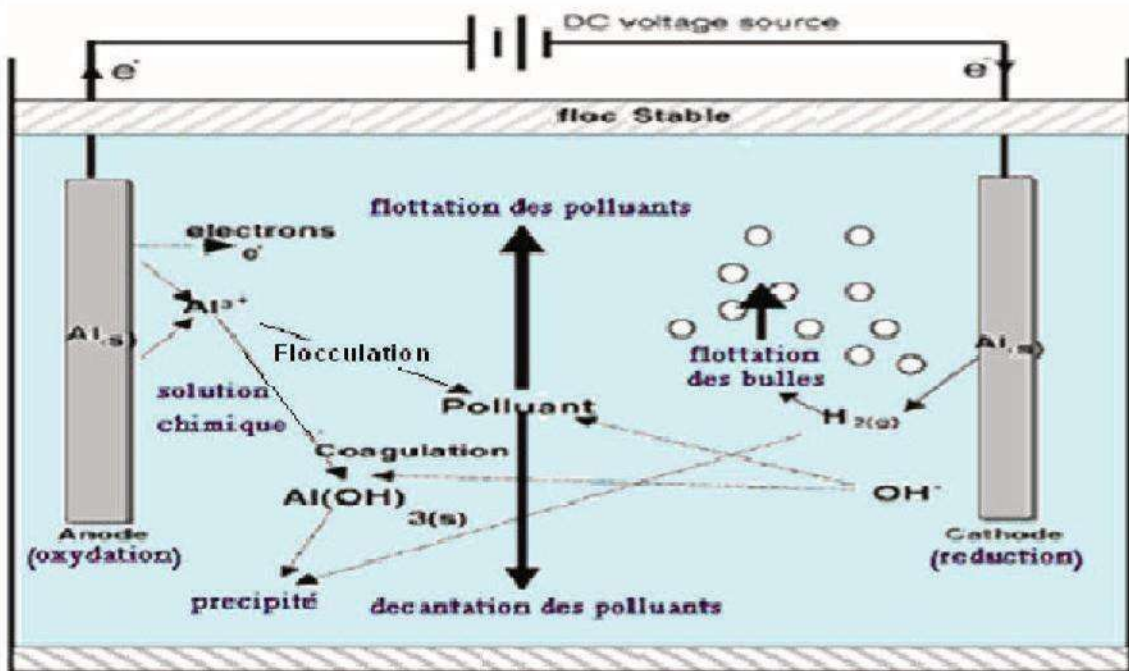


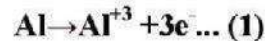
Figure 2 : Procédé d'électrocoagulation.

II-4 Réactions aux électrodes :

Dans le procédé d'EC le coagulant est produit in situ par oxydation électrolytique d'une anode suite au passage d'un courant. 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 grâce à leur prix abordable et à leur forme ionique qui présente une valence élevée (**Koby et al, 2003; Bennajah, 2007**). Un réacteur simple d'électrocoagulation est composé d'une anode et une cathode comme il est représenté dans la **figure 2**. Quand une tension est appliquée à partir d'une source d'alimentation externe, le matériau de l'anode subit l'oxydation, tandis que la cathode est soumise à la réduction. Les principes réactions mises en jeu pour les électrodes en aluminium sont (**Bessioud, 2010**) :

- À L'anode :

On a l'oxydation et le métal va passer de l'état solide à l'état ionique selon la réaction (**Khemis et al, 2006 ; Essadki et al, 2008**).



Ces ions réagissent avec les espèces ioniques du milieu aqueux, ce qui résulte l'abattement des polluants. Lors du processus d'oxydation, il peut aussi y avoir une autre réaction, secondaire, qui entraîne la formation d'oxygène par hydrolyse de l'eau. Cette demi-réaction se module en fonction du pH (acide ou basique) du milieu aqueux.

- À la cathode :

Au voisinage de la cathode, la réduction du solvant (eau) provoque la formation du gaz hydrogène. Ce dégagement de gaz se présente sous formes de bulles, estimées à un diamètre d'environ 10 à 100 μm et contribuent fortement à l'agitation du milieu (**Abbas Meriem et Messaad Aicha, 2016**). Dont le dégagement permet la flottation des particules floculées. Sous conditions acides la réduction de l'eau est la suivant :



Sous conditions basiques, elle prend la forme suivant :



Réaction au sein de la solution :



II-5-Principale loi régissant l'électrocoagulation :

II-5-1-La seconde loi de faraday :

Une des principales lois explicitant les réactions d'électrocoagulation est la seconde loi de faraday. Cette loi montre que la quantité d'ion métallique dissous par oxydation anodique est directement proportionnelle à l'intensité imposée et à la durée d'électrolyse mais inversement proportionnelle à la valence de l'ion émis.

La loi de Faraday est exprimée par l'équation suivante :

$$m = I t M/n F \dots (5)$$

m : masse théorique dissoute en (g).

I : intensité du courant imposé (A).

t : durée d'électrolyse (s).

M : poids moléculaire de l'élément considéré ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$).

F : constante de Faraday ($96500 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$).

n : nombre d'électrons mis en jeu dans la réaction considérée (**Belayachi, 2016**).

A partir de la loi de faraday, il est donc possible d'estimer la masse d'électrode théorique consommée par électrolyse et d'en déduire un rendement anodique.

$$R_{\text{anode}} = \frac{\text{masse expérimentale dissoute (g)}}{\text{masse théorique donnée par la loi de faraday (g)}} \cdot 100 \dots (6)$$

A la cathode, et sans autres réactions de réduction, la production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau suit également la seconde loi de faraday, de même le rendement cathodique peut être exprimé par :

$$R_{\text{cathode}} = \frac{\text{masse expérimentale formée (g)}}{\text{masse théorique donnée par la loi de faraday (g)}} \cdot 100 \dots (7)$$

II-5-2- Le rendement énergétique (RE) :

Le rendement énergétique est défini par l'équation suivante :

$$RE = \frac{\text{Energie minimale nécessaire pour produire N moles de P}}{\text{Energie réellement consommée pendant l'électrolyse}} \dots (8)$$

N : nombre de moles de P produites (**Bennajah, 2007**).

II-6- Paramètres influençant le procédé d'EC :

Plusieurs facteurs peuvent influencer la performance d'EC tel que la densité de courant, la température, le matériau, la position des électrodes, le mode de connexion des électrodes, le pH du milieu, la concentration initiale et la nature de l'effluent...etc (Merzouk, 2009).

II-7- Applications de l'électrocoagulation :

L'EC a attiré l'attention de nombreux chercheurs, son application s'est accrue ces dernières années du fait de son efficacité, généralement supérieure aux autres techniques, de son faible coût, pour éliminer les différentes formes de pollution organique ou métallique (Drogui et al, 2007). L'EC fait actuellement l'objet de recherche pour le traitement d'un nombre varié d'effluents pollués dont des eaux domestiques (Yu et al, 2005), des eaux résiduaires de restaurants (Chen et al, 2000), des eaux de lavage (Ge et al, 2004), des eaux résiduaires de papeteries (Ugurlu, 2004), des eaux résiduaires minières, des eaux résiduaires laitières (Aitbara et al, 2014 ; Boumaza, 2014), des eaux brutes pour la production d'eau de consommation (Holt et al, 2005), ainsi que des eaux contenant des composés fluorés (Mameri et al, 2001 ; Ghosh et al, 2008), des colorants textiles (koby et al, 2003) ...etc.

II-8- Avantages et inconvénients du procédé d'électrocoagulation :

De nombreux auteurs ont comparé le procédé d'électrocoagulation avec le procédé physico-chimique classique réalisé par l'addition de coagulants chimiques tels que le sulfate d'aluminium et le chlorure ferrique. Parmi les arguments en faveur de l'électrocoagulation on peut citer les suivants :

II-8-1- Avantages :

- L'électrocoagulation offre la possibilité de traiter des effluents par oxydation et réduction de plusieurs composés dissous tel que les nitrites, les sulfures, les cyanures, les sulfites, les chromates et les ions fluorures.
- La biodégradabilité des effluents traités par électrocoagulation est améliorée. Ce perfectionnement est dû à la non-toxicité de la forme d'aluminium utilisée et à la faible salinité du milieu (Bessioud, 2010).

- L'importance du champ électrique entre les électrodes qui conduit à la destruction de certaines souches de bactéries.
- Très bonne efficacité du procédé d'EC pour des polluants colloïdaux très fins. Avec d'autres procédés tel que la coagulation chimique, ces polluants imposent des étapes de traitement plus lentes et des quantités de coagulant plus élevées (**Abbas et Messaad, 2016**).
- Le traitement d'une eau usée par EC donne une eau agréable au goût, claire, sans couleur et inodore.
- L'électrocoagulation évite l'utilisation des réactifs chimique, de telle sorte qu'il n'ya aucun problème de neutralisation des réactifs en excès et aucune possibilité de pollution secondaire par les substances chimique ajoutées.
- Les bulles d'air produites peuvent entraîner les polluants à la surface de la solution traitée ou ils peuvent être facilement concentrés, rassemblés et éliminés.

II-8-2- Inconvénients :

- ❖ Pour permettre un passage du courant suffisant, l'effluent à traiter doit être suffisamment conducteur et il y a toujours une probabilité d'avoir la formation d'un film d'oxyde passivant la surface des électrodes, ce qui diminue de façon l'efficacité du système (**Mollah et al, 2001**).
- ❖ La maintenance des installations, le nettoyage et le changement des électrodes impliquent Une perte de temps dû à l'arrêt du procédé au cours de ces opérations.
- ❖ Le coût des électrodes consommables semble être le principal inconvénient. L'utilisation de métaux recyclés a permis de palier partiellement à ce problème.
- ❖ Le procédé d'électrocoagulation est basé sur des réactions électrochimiques. L'effluent à traiter doit donc être un électrolyte ce qui impose un ajout de sel (généralement NaCl) pour certains effluents faiblement conducteurs (**Sahraoui et Yahia Mohamed, 2017**).
- ❖ L'utilisation de l'électricité peut revenir chère voire difficile dans certaines régions.

PARTIE

EXPERIMENTALE

Chapitre III :

Matériels et Méthodes

III- Matériels et méthodes :

III-1- Solution à traiter:

Les expériences de traitement d'électrocoagulation en mode batch ont été réalisées avec une solution préparée à base du lait en poudre (**photo 4-a**) avec l'eau de robinet. On a démarré le traitement pour une solution avec une concentration $C_0 = 1000 \text{ mg/L}$ (**photo 4-b**). La masse du lait en poudre a été pesée à l'aide d'une balance électronique (**KERN ALS 220-4N**) présentée par (**la photo 5**).



Photo 4- a : Lait en poudre



Photo 4- b : Solution préparée



Photo 5 : Balance électronique (KERN ALS 220-4N)

III-2- Montage électrochimique :

Les expériences d'EC ont été réalisées au laboratoire dans les conditions opératoires choisies à l'aide d'un montage de mise en œuvre et d'utilisation faciles (**Figure 3 et Photo 6**). Ce dispositif est constitué d'un réacteur électrochimique cylindrique en verre, de capacité de 1 litre d'eau à traiter dans lequel il est plongé verticalement et au centre du réacteur, deux électrodes solubles d'aluminium planes et parallèles, l'une des électrodes joue le rôle d'une électrode sacrificielle (anode) et l'autre est une cathode, elles sont approximativement identiques à 15 cm de longueur et 2 cm de largeur soit une surface totale (S_T) de 30 cm² chacune ; la profondeur de leurs immersion est de 13 cm dont la surface active (S_A) est de 26 cm². La tension aux bornes des électrodes est assurée par un potentiostat (**Consort E143**), le contrôle du courant dans le circuit a été réalisé de telle sorte que la connexion soit de type monopolaire en série. Ce type de connexion permet de réduire la consommation d'énergie électrique, de diminuer la quantité de résidus métalliques et d'éviter autant que possible l'ajout d'électrolyte support (**Asselin, 2007**). Plusieurs géométries de cellule existent dans la littérature mais cette configuration est la plus répandue car elle permet d'avoir une mise en œuvre simple et facile (**Zongo, 2009**), l'agitation et l'homogénéisation de la solution est assurée par un agitateur magnétique (**Stuart CD 162**).

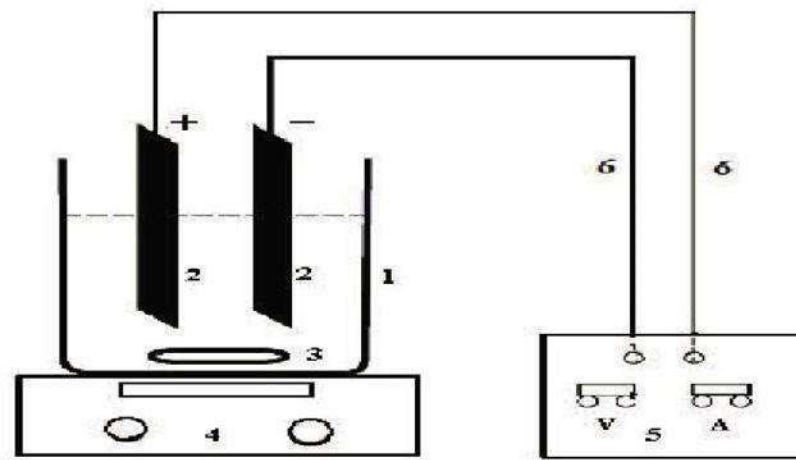


Figure 3 : Schéma du dispositif expérimental d'électrocoagulation utilisé

- (1) Réacteur en verre, (2) électrodes en Aluminium, (3) Barreau magnétique,
(4) agitateur magnétique, (5) source de tension (V) et courant (A), (6) fils électriques.



Photo 6 : Cellule d'électrocoagulation en mode batch

III-3- Les électrodes utilisées :

Le métal des électrodes peut être obtenu par récupération des déchets d'aluminium, ce qui rend leur coût supportable pour un procédé de dépollution. La forme plane des électrodes permet un montage et un nettoyage faciles des plaques (Zongo, 2009). Les deux plaques parallèles et rectangulaires d'aluminium ont été préalablement traitées avec un papier abrasif au niveau de leur surface, dans le but d'homogénéiser celles-ci et d'éliminer les impuretés et les dépôts qui peuvent les contaminer. Les électrodes sont extraites du réacteur, après chaque essai d'EC dans le but de les examiner, et de les nettoyer pour éliminer les dépôts des polluants pouvant former une couche résistante sur leur surface (photo 7).

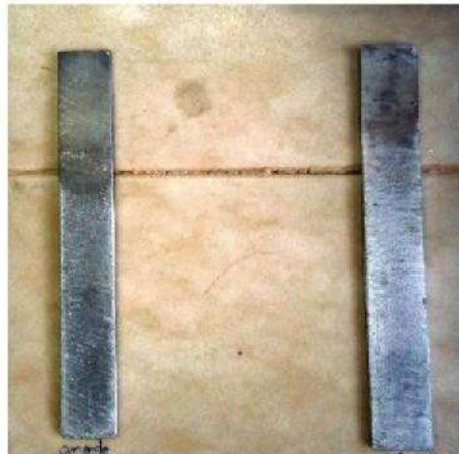


Photo 7 : Vue des électrodes d'aluminium après l'EC

En fin de chaque essai d'EC désiré, l'application de potentiel est suspendue et l'échantillon est décanté pendant 30min. Ce temps est inspiré de la coagulation-chimique (Jar-Test), il permet aux particules floculées de bien sédimenter ou éventuellement floculées comme il est courant dans le procédé d'EC (**Photos 8-a , 8-b**)



Photos 8 : L'eau Traitée avant et après décantation

a- L'eau traitée avant décantation

b- L'eau traitée après décantation pendant 30 min

La conductivité et le pH de la solution traitée ont été mesurés en utilisant respectivement un conductimètre (inoLabcond 7310) (photo 9) et un pH mètre (inoLab 720) (photo 10).



Photo 9 : Conductimètre (inolab cond 720)



Photo10 : pH mètre (inoLab720)

III-4- Méthodologies d'analyse et équipements utilisés en Electrocoagulation :

L'efficacité du traitement d'EC en mode batch est évaluée par rapport au paramètre de turbidité qui exprime le mieux la clarification visée dans cette étude, ce paramètre est très utile pour le contrôle d'un traitement. La réduction de la pollution a été suivie aussi par le contrôle de la DCO qui joue un rôle très important dans l'évaluation de la charge polluante d'une eau résiduaire avant et après un traitement. Les méthodes d'analyses employées sont reconnues standard pour l'examen des eaux résiduaires (Rodier et al., 2009). Tous les résultats d'analyses présentent une moyenne d'erreur d'environ $\pm 5\%$. Le calcul du taux d'abattement de la pollution d'un paramètre donné X, exprimé en pourcentage TX(%), est basé sur la formule suivante :

$$T (\%) = \frac{(C_{iX} - C_{fX})}{C_{iX}} \times 100 \quad \dots \dots (9)$$

Où, C_{iX} et C_{fX} sont, respectivement, les mesures d'un paramètre X avant et après ce traitement.

III-4-1- Mesure de la turbidité :

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

La turbidité de l'ensemble des échantillons a été mesurée à l'aide d'un turbidimètre (Phywe System GMBH 2100N, Germany) (photo 11). Cette mesure permet une lecture directe et rapide (quelques secondes) de la turbidité de l'échantillon ; ce dernier ne nécessite pas une préparation particulière. Il suffit seulement d'agiter l'échantillon avant la mesure. L'étalonnage de l'appareil se fait par la lecture directe de solutions étalons à 0,2 NTU, 10 NTU et 1000 NTU.

L'unité utilisée pour la mesure de turbidité est (NTU) « Nephelometric Turbidity Unit » Unité néphélogométrique de turbidité.



Photo 11 : Turbidimètre (Phywe System GMBH 2100N, Germany)

III-4-2- Mesure de la Demande Chimique en Oxygène (DCO)

La demande chimique en oxygène (DCO) est la mesure de la quantité d'oxygène requise pour oxyder la matière organique et inorganique oxydable contenue dans un échantillon. Ce paramètre donne une estimation de la quantité de polluants présents dans un effluent industriel ou une eau résiduaire. Les eaux d'un effluent industriel dont la DCO est élevée peuvent provoquer des problèmes de diminution de la concentration d'oxygène dans des cours d'eau.

La mesure de la (DCO) est particulièrement utile pour l'appréciation du fonctionnement des stations de traitement.

■ Principe d'analyse :

La demande chimique en oxygène (DCO) est la concentration exprimée en litre d'oxygène équivalent à la quantité de dichromate consommée par les matières dissoutes et en suspension lorsqu'on traite un échantillon d'eau avec cet oxydant dans des conditions définies, 1 mole de dichromate ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) est équivalente à 1.5 mole d'oxygène (O_2).

Dans des conditions définies, certaines matières contenues dans l'eau sont oxydées à l'ébullition (148 °C) par le dichromate de potassium en milieu acide et en présence de sulfate d'argent jouant le rôle de catalyseur d'oxydation et de sulfate de mercure (II) permettant de complexer les ions chlorures. Le rôle du catalyseur est de faciliter l'oxydation.

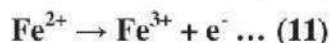
L'excès de dichromate introduit est dosé par un réducteur, le sulfate ferreux, on peut ainsi remonter à la quantité de dichromate consommé par les matières oxydables. Un indicateur approprié permet de détecter la fin du dosage.

Les matières oxydables (et en particulier les matières organiques) de l'échantillon sont oxydées par le dichromate de potassium dans les conditions précitées.

Le dichromate de potassium est réduit :



Le dichromate de potassium résiduel est dosé par une solution de sulfate de fer (II) et d'ammonium (donc de Fe^{2+}), en présence de ferroïne (indicateur d'oxydo-réduction) :

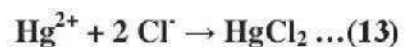


La réaction globale du dosage est la suivante :



Il est alors possible de déterminer la quantité de dichromate de potassium consommé lors de l'essai et d'en déduire la quantité d'oxygène équivalente.

Pour éviter l'oxydation des ions chlorures en chlore, on utilise le sulfate de mercure (II) qui complexe les ions Cl^- et conduit à la formation de chloromercurate (II), soluble et peu oxydable :



Chapitre IV :

Résultats et Discussions

IV-1- Introduction:

Ce chapitre rassemble tous les résultats des essais d'EC sur la solution artificielle préparée à base du lait en poudre pour les différents paramètres étudiés afin de définir les conditions optimales de clarification des solutions étudiées et d'évaluer les performances du traitement à pH libre des solutions ($\sim 6,15$) et à température ambiante ($\sim 20^\circ\text{C}$).

IV-2- Paramètres étudiés :

Afin d'optimiser le traitement d'EC en mode batch, on a varié les paramètres suivants :

- La tension électrique imposée U (V) et le temps d'électrolyse (t en min)
- La conductivité ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) (l'addition d'électrolyte support KCl).
- La concentration initiales (C_0 en mg/l)
- La distance inter- électrodes (d en cm).

IV-3- Influence de la tension électrique :

La réduction de la turbidité et la DCO dépend de la concentration des ions d'aluminium produits à l'anode qui dépend à son tour de la densité de courant appliquée et du temps de traitement comme il est décrit par la loi de Faraday. Il est bien connu que la densité de courant détermine non seulement la dose du coagulant mais aussi le taux de production des bulles et par conséquent affecte la croissance des floes (**Holt et al., 2002; Letterman et al., 1999, Khandegar and Saroha, 2013**) qui peuvent influencer l'efficacité du traitement, la consommation énergétique et par conséquent le coût du procédé (**Mohora et al., 2012**).

Pour cette étude, l'effet de la tension électrique appliquée à la cellule sur l'élimination des polluants a été étudié pour les valeurs suivantes : **1, 2, 3, 4, 5 V** en fonction de temps d'électrolyse variable de **0 à 120** minutes à : (pH libre de l'eau **6,15**, turbidité initiale de **680 NTU**, conductivité de **1055 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$** et température d'eau $\sim 20^\circ\text{C}$). Les **figures 4 et 5** expriment les résultats de l'effet de la tension électrique appliquée sur le taux d'abattement de la turbidité et de la DCO étudiés.

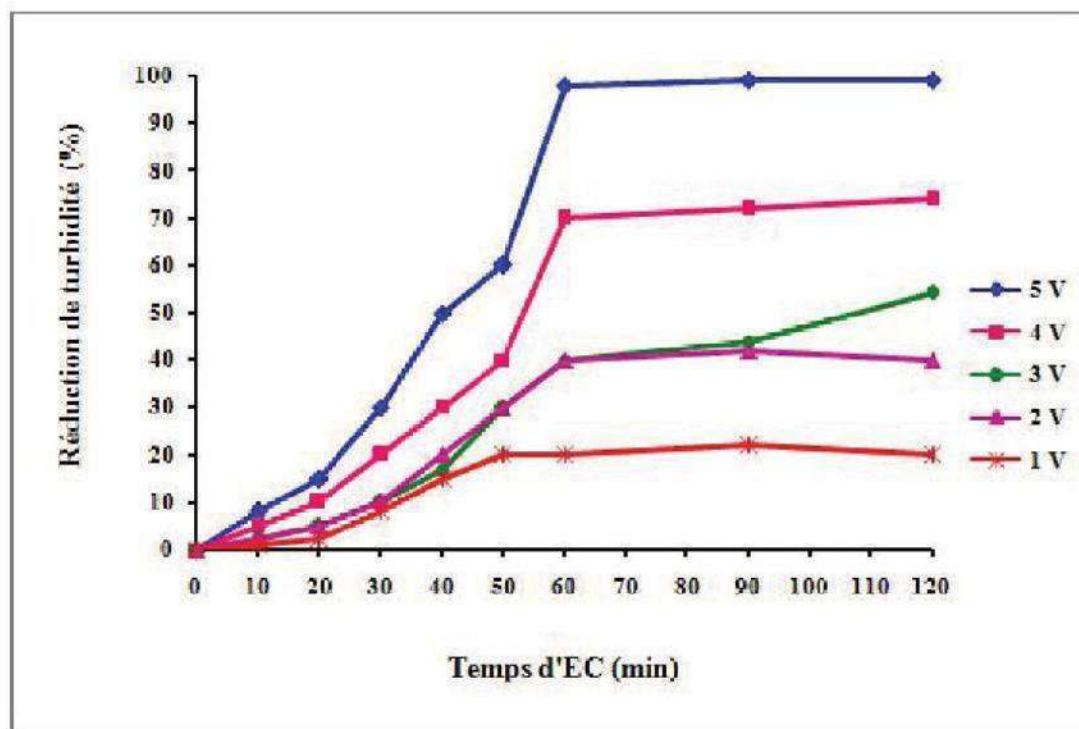


Figure 4 : Effet de la tension électrique et le temps d'électrolyse sur la réduction de la turbidité

($C_0=1000$ mg/L, turbidité initiale = 680 NTU, DCO initiale = 1296 mg/L, pH initial = 6.15, $d=1$ cm)

Comme on pouvait s'y attendre, il semble que, pour un temps donné, l'efficacité du traitement augmente significativement avec l'augmentation de la tension électrique. La meilleure tension appliquée est de **5V** soit **13,50 mA/cm²**.

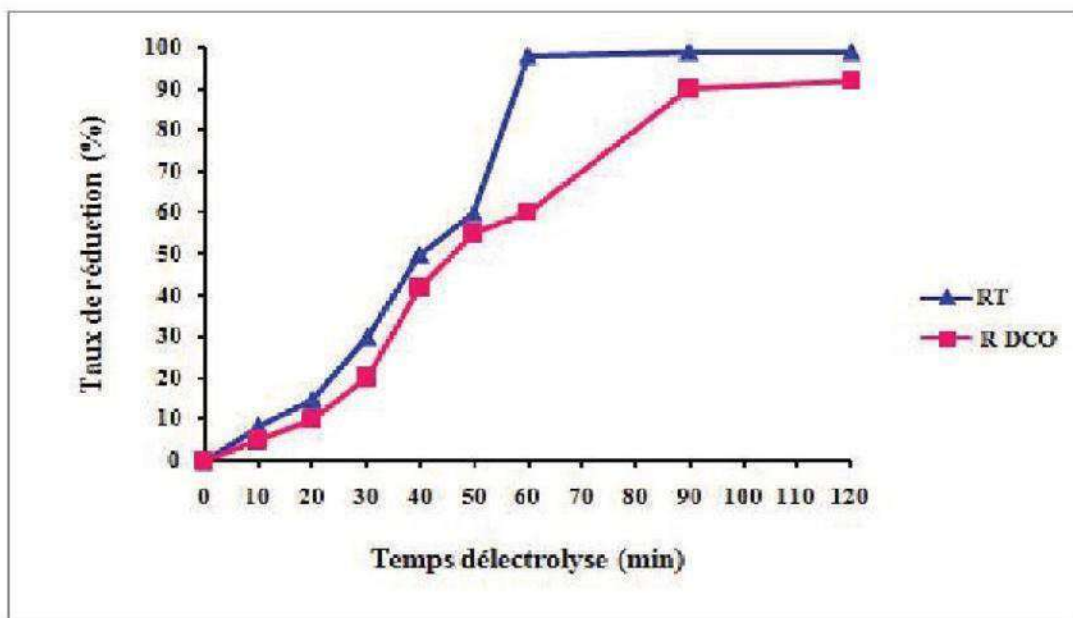


Figure 5: Effet du temps d'électrolyse sur la réduction de la turbidité et la DCO ($C_0=1000$ mg/L, $U= 5V$, turbidité initiale = 680 NTU, DCO initiale =1296 mg/L, pH initial = 6,15, $d=1$ cm)

D'après ces résultats, on peut remarquer que la réduction de la pollution suit deux étapes. La première étape qui présente la phase réactive dans laquelle on constate une diminution significative de la turbidité et de la DCO avec l'augmentation de la tension électrique appliquée qui peut être due à l'augmentation de la production des cations Al^{3+} provenant de la dissolution anodique suivant la loi de Faraday (équation 5). La seconde étape ou phase stationnaire est atteinte au bout d'un temps d'électrolyse de **60 min** pour la turbidité et **90 min** pour la DCO ; la tension électrique optimale étant de **5V** soit **13,50 mA/cm²**. A cette période, malgré l'apport en continu d' Al^{3+} l'efficacité du traitement reste constante à ~ 90% pour la DCO et ~ 99% pour la turbidité.

Toute nouvelle augmentation de la tension, au-delà de **5V**, induit une augmentation relativement forte de la consommation des électrodes avec un coût plus élevé. Un comportement similaire a déjà été observé par **Holt et al, (2002)** et a été expliqué par le fait que, aux tensions électriques plus élevées, la formation des ions d'aluminium est produite

rapidement, par rapport aux processus de la coagulation, ce qui entraîne une baisse de rendement d'épuration.

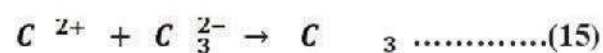
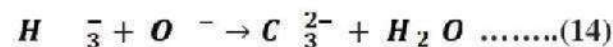
En outre, le niveau de production des bulles de gaz augmente et leurs tailles diminuent avec l'augmentation de la tension électrique appliquée (Kholza et al., 1991 ; Kobya et al., 2006 ; Hanafi et al., 2009), conduisant à la suppression rapide de l'hydroxyde d'aluminium de la solution par flottation ce qui va conduire à une réduction de la probabilité de collision entre les polluants et le coagulant (Kholka et al., 1991 ; Bennajah, 2007) et par conséquent la diminution du rendement de traitement.

IV-4- Effet de la conductivité électrique sur le traitement d'EC:

La conductivité électrique d'une solution, est un paramètre important pour l'efficacité du traitement d'électrocoagulation, c'est pourquoi l'effet du type et de la concentration d'électrolytes sur la performance des processus d'EC a été largement étudiée (Bensadok et al., 2011 ; Chou et al., 2010 ; Cãnzaires et al., 2007), ils ont observé que la présence d'ions halogénures comme électrolytes support était indispensable à l'oxydation des anodes. Ce paramètre affecte la tension électrique de la cellule, la consommation énergétique et par conséquent le cout du procédé. En effet, dans le cas où la conductivité est trop faible, la résistance du milieu est très forte, ce qui oblige l'application d'une tension très élevée pour faire passer le courant. Une tension très élevée implique une grande dépense énergétique, ce qui n'est pas désirable sur le plan monétaire (Mélani, 2007).

Dans cette étude Nous avons choisi le chlorure de potassium (KCl) comme électrolyte support (Jiang et al ; 2002, Naje et al, 2015). Le choix de ce sel découle du fait que les ions chlorures réduisent les effets indésirables d'autres anions tels que HCO_3^- et SO_4^{2-} , en évitant la précipitation des ions calcium (Ca^{2+}) contenus dans les eaux résiduaires (équation 14 et 15) (Chen, 2004 ; Kabdaşlı et al., 2012).

En effet, le précipité va former une couche isolante sur la surface de l'électrode et augmenter la résistance de la cellule électrochimique ou inhiber la dissolution métallique.



Afin d'étudier l'influence de la conductivité de solution à traiter sur le rendement d'EC nous avons effectué une série d'essais avec des concentrations différentes de KCl allant de 0,5 g/L à 2 g/L. La relation entre la concentration du sel ajouté et la conductivité du solution à traiter illustrée sur la **figure 6**.

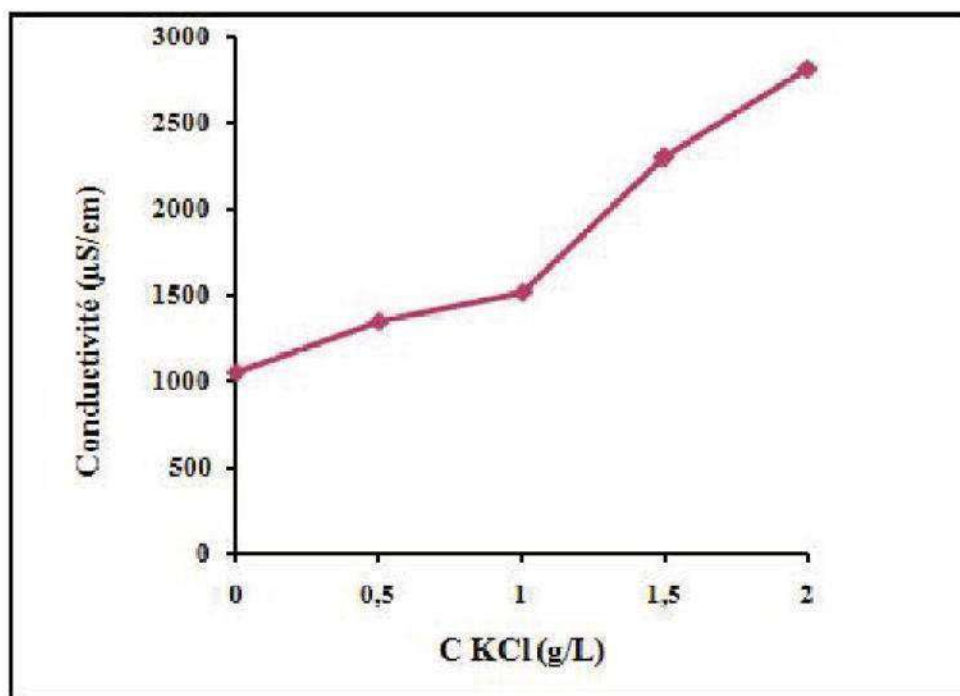


Figure 6: Variation de la conductivité de la solution à traiter en fonction de la concentration de sel ajouté

Le suivi de l'évolution de la réduction de la turbidité en fonction des différentes concentrations en KCl est illustré sur la **figure 7**.

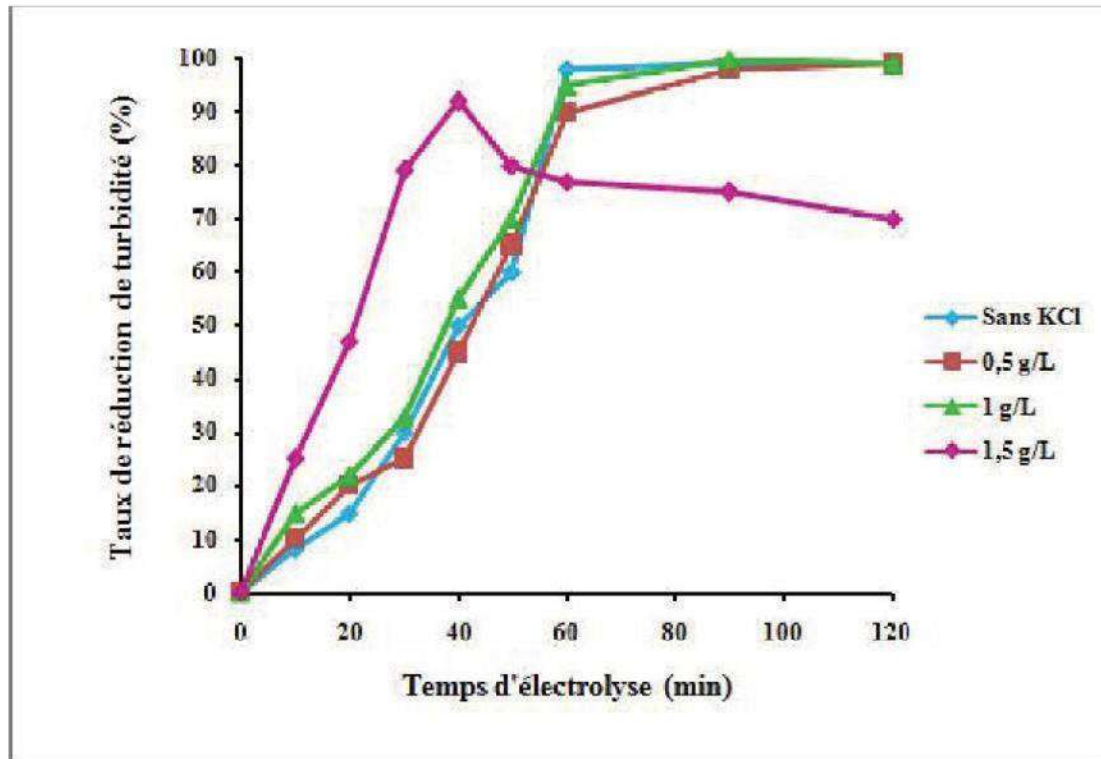


Figure 7 : Effet de la conductivité sur la réduction de la turbidité

($C_0=1000 \text{ mg/L}^+$, $U= 5V$, turbidité initiale = 680 NTU, DCO initiale =1296 mg/L, $d=1\text{cm}$)

D'après les résultats obtenus on a constaté que l'ajout d'électrolyte support a un effet négligeable sur l'efficacité du traitement, cela peut s'expliquer par le fait que la solution à traiter est conductrice ($\sigma =1055 \mu\text{S.cm}^{-1}$) et n'a pas besoin d'augmenter sa conductivité.

En effet, on a observé que l'optimal de réduction de la turbidité ($\sim 99,96 \%$) et la DCO ($\sim 93 \%$) **figure 8** est obtenu avec une concentration en KCl de 1 g/L, cela peut être expliqué par le fait que les anions Cl^- détruisent la couche de passivation des électrodes en évitant les dépôts de précipité sur leurs surfaces et permettent de catalyser la dissolution de l'anode sacrificielle en aluminium (Mameri et al., 1998). La concentration optimale de clarification égale à 1g/L en KCl.

Pour la concentration du sel égale à 1,5 g/l, on a remarqué une diminution d'efficacité du traitement, cela peut être dû à l'excès des ions Cl^- dans la solution qui vont former quelques composés transitoires, tels que $\text{Al}(\text{OH})_2\text{Cl}$, $\text{Al}(\text{OH})\text{Cl}_2$ et AlCl_3 . Ces derniers seront finalement dissous dans la solution sous forme d' AlCl_4^- . Ainsi, la quantité de coagulant $\text{Al}(\text{OH})_3$ diminuerait, entraînant une réduction de l'efficacité du traitement (Wang et al., 2009),

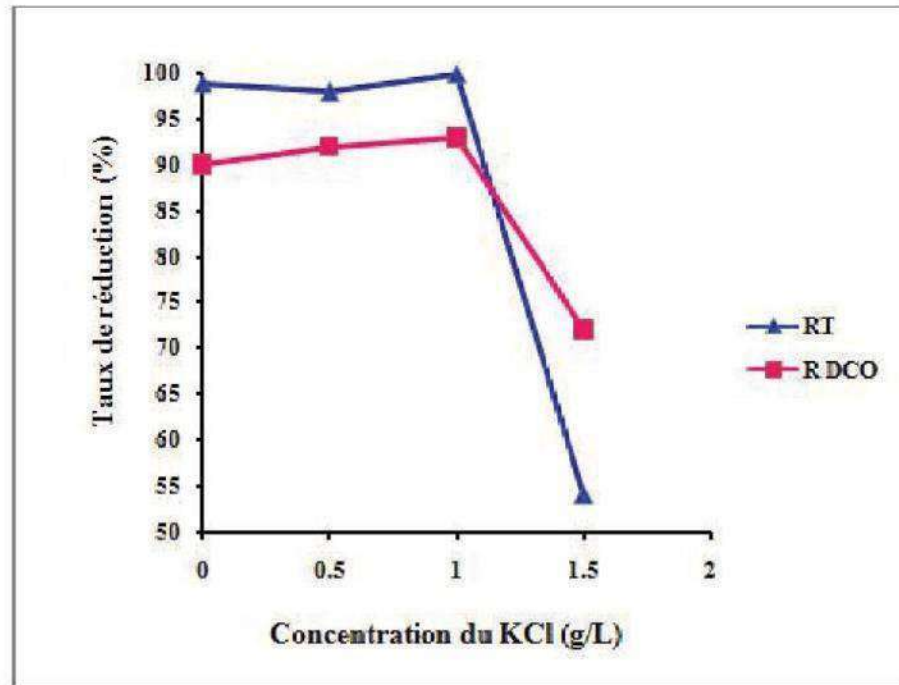


Figure 8 : Variation du taux de réduction de la turbidité et de la DCO en fonction de la concentration d'électrolyte support (KCl)

($d = 1 \text{ cm}$; $t = 90 \text{ min}$; $\text{pH initial} = 6,15$; Turbidité initiale = 680 NTU ;
C initiale de la solution = 1000 mg/L ; $U = 5 \text{ V}$).

En outre, une concentration excessive de KCl dans l'eau polluée à traiter induit une surconsommation des électrodes d'aluminium par corrosion. Il en résulte donc une attaque sur la plaque d'aluminium de l'anode et une dissolution irrégulière de celle-ci (Bennajah, 2007).

Pour une concentration du sel égale à 2 g/l, l'essai d'électrocoagulation a été annulé à cause d'une alarme du danger indiquée par le générateur du courant électrique.

En dépendant des explications précédentes, on a décidé de réaliser le traitement d'EC sans l'ajout d'électrolyte support qui pose un autre problème présenté par la formation d'un volume du boue plus important qu'en absence du sel, cette boue et parmi les inconvénients d'EC. **Photos 12.**



$C_{KCl} = 0,5 \text{ g/L}$

V Boue flottante = 120 cm³/L

V Boue sédimentée = 150 cm³/L



$C_{KCl} = 1 \text{ g/L}$

V Boue flottante = 120 cm³/L



$C_{KCl} = 1,5 \text{ g/L}$

V Boue flottante = 150 cm³/L



$C_{KCl} = 0 \text{ g/L}$

L'eau après traitement sans l'ajout du KCl

V Boue sédimentée = 80 cm³/L

Photos 12: Les aspects des eaux traitées

IV-5- Effet de la concentration initiale sur le traitement d'EC:

L'objectif de ces essais, est d'étudier l'influence de l'augmentation de la concentration initiale des solutions à traiter sur l'efficacité d'EC. Pour ce faire, tous les autres paramètres autre que la concentration initiale, ont été fixés constants. On a testé les concentrations initiales: ($C_0 = 1000, 1500, 2000 \text{ mg/L}$).

D'après la mesure de la turbidité et la DCO des solutions à traiter, on a remarqué une augmentation pour les deux mesures avec l'augmentation des concentrations initiales.

D'après les résultats de traitement obtenus **figure 9** on a constaté que la cinétique d'abattement a été d'autant plus importante que la concentration initiale est faible. Ce résultat peut être expliqué par le fait que les solutions concentrées seront très chargées en polluants ce qui va élargir le temps d'électrolyse pour atteindre l'abattement souhaité. En plus l'insuffisance en terme de quantité d'hydroxyde d'aluminium nécessaire à la coagulation de l'excès des polluants à des concentrations élevées (Mollah et al., 2004).

On peut déduire donc que plus la concentration initiale est petite plus l'efficacité d'EC est importante (Emamjohar et Sivakumar, 2009, Annane, 2008).

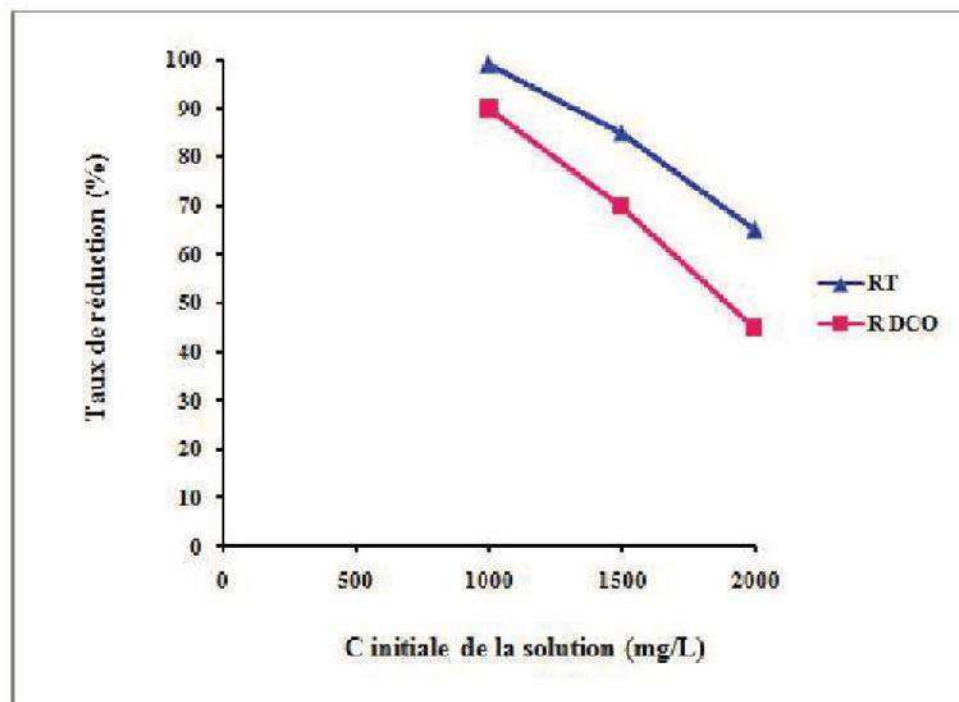


Figure 9: Effet de la concentration initiale de la solution sur la réduction de la turbidité et de la DCO
($d = 1 \text{ cm}$; $t = 90 \text{ min}$; $\text{pH initial} = 6,15$; $U = 5 \text{ V}$).

IV-6- L'effet de la distance inter-électrode sur l'efficacité d'EC :

L'un des paramètres affectant le processus d'EC est la distance inter-électrode. Pour tester l'influence de ce paramètre sur l'efficacité de dépollution par EC, nous avons fait varier d de 1 à 3 cm en gardant les autres paramètres constants. On a évité la distance inter-électrode moindre à 1 cm car il est difficile de la réaliser à l'échelle industrielle et aussi pour éviter les courts circuits.

Les résultats illustrés sur **la figure 10** montrent que plus la distance inter-électrode est grande plus l'efficacité du traitement est petite. Ceci peut être expliquer par le fait que l'augmentation de distance inter-électrode va diminuer la chance d'interactions des ions avec les hydroxydes métalliques et par conséquent la performance de dépollution va diminuer aussi (**Annane, 2008**).

En outre, le meilleur rendement du traitement est obtenu avec une la distance inter-électrode de 1cm. Ceci peut être expliquer par le fait que qu'aux faibles distance inter-électrode le dégagement de l'hydrogène à la cathode va favoriser de flottation et d'extraire les floes de complexes métalliques ce qui va améliorer l'efficacité du traitement.

La distance inter-électrode = 1 cm est la distance idéale dans notre étude. Cette distance est recommandée par plusieurs auteurs (**Chen et al., 2003**).

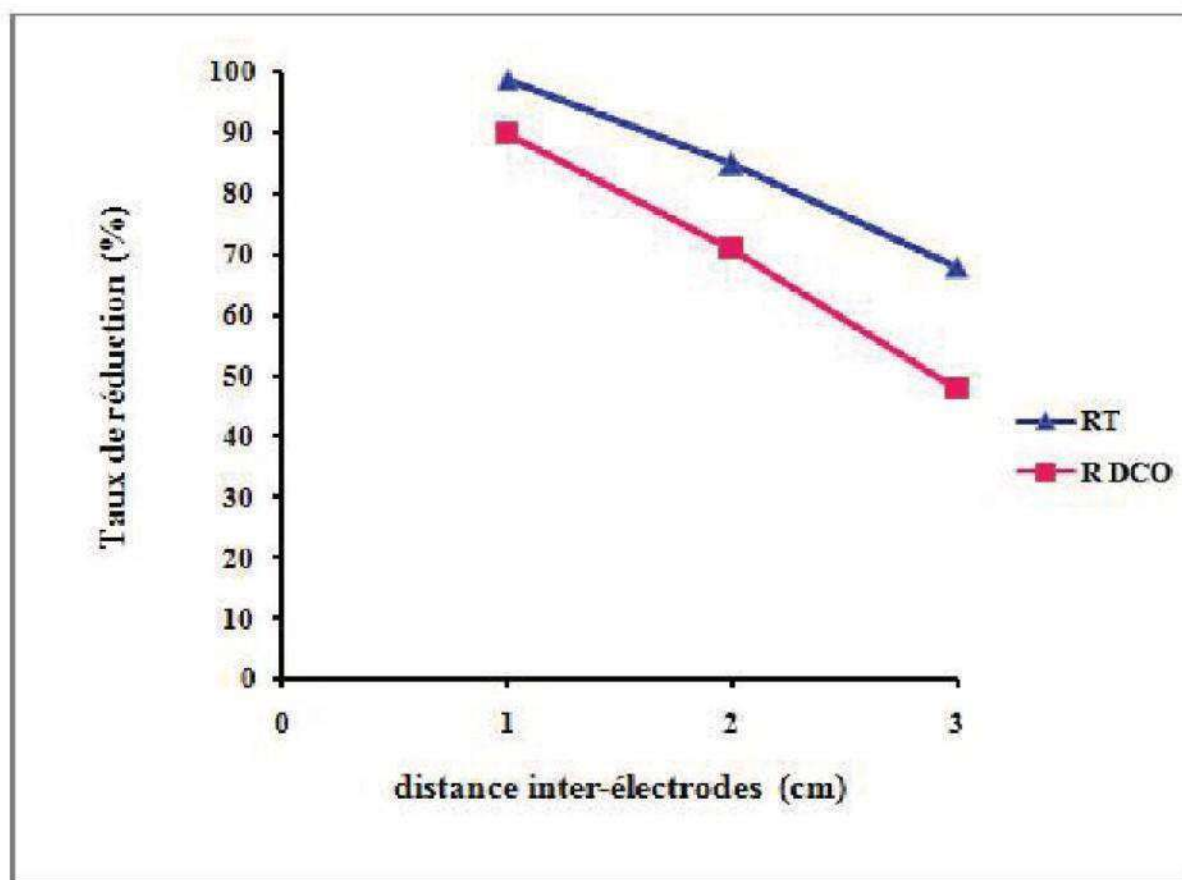


Figure 10 : Effet de la distance inter-électrodes sur la réduction de la turbidité et de la DCO
($t = 90$ min ; pH initial = 6,15 ; Turbidité initiale = 680 NTU ;
Concentration initiale de la solution = 1000 mg/L ; $U = 5$ V).

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Parmi les sources de pollutions de l'environnement, les eaux résiduaires industrielles agroalimentaires et notamment laitières qui utilisent énormément d'eau pour le nettoyage et la fabrication de produits de consommation les plus courants. Une quantité considérable de ces eaux est souvent rejetée dans le milieu récepteur (mer, rivières, sols) sans traitement préalable, provoquant une dégradation de la qualité physico-chimique et biologique de ce milieu en générant de nombreuses maladies hydriques (Abid et al ,2009).

Il faut donc limiter la contamination d'origine industrielle en proposant des technologies simples et moins coûteuses comme les techniques électrochimiques et notamment l'EC en mode batch. C'est est une technique attirante et convenable pour le traitement des différents effluents en raison de ses nombreux avantages tels que sa compatibilité environnementale, son adaptabilité, son efficacité et son faible coût (Bayramoglu et al., 2004). Ce processus est caractérisé par un matériel simple, facile a réaliser et ne nécessitant pas l'ajout de produits chimiques.

Dans l'électrocoagulation, le coagulant est libère dans la solution in situ, en utilisant la dissolution d'une anode sacrificielle (Chen et al., 2000). Lors de l'alimentation des électrodes en courant, il y a simultanément une dissolution du métal de l'anode et un dégagement du gaz d'hydrogène au voisinage de la cathode. Les métaux aluminium et fer sont généralement utilisés comme anode. Leur dissolution conduit à la formation des hydroxydes métalliques. Ces composés ont généralement une meilleure efficacité de coagulation que celle des produits chimiques utilisés dans les techniques conventionnelles. Ils peuvent déstabiliser les colloïdes en suspension, en adsorbant, neutralisant ou précipitant les espèces polluantes dissoutes dans le liquide, pour les transformer finalement en floes facilement extractibles par précipitation, filtration ou flottation.

Pour cette étude, et afin d'optimiser les conditions opératoires affectant l'EC des solutions à traiter, nous avons utilisé des échantillons artificielles à base du lait en poudre lorsque la composition réelle des effluents laitiers est variée selon l'activité de la laiterie et il n'est pas facile de tester l'influence des paramètres affectant le traitement d'une façon régulière.

Pour optimiser les conditions du procédé, les essais d'EC sont menés dans un réacteur de laboratoire de un litre en utilisant des plaques d'aluminium identiques ($S_T=30 \text{ cm}^2$, dont la surface active est $S_A= 26 \text{ cm}^2$) avec des différents temps du traitement jusqu'à 2 heures au maximum, différentes tensions électriques appliquées allant de **1V** à **5V**, différents conductivités initiales de la solution à traiter (l'ajout d'un sel **KCl** à différentes concentrations $C_{\text{KCl}} = 0,5, 1, 1,5, 2 \text{ g/L}$), **3** distances inter-électrodes($d=1, 2, 3 \text{ cm}$) différentes concentrations initiales de la solution à traiter ($C_0 = 1000, 1500, 2000 \text{ mg/L}$).

L'efficacité de traitement a été effectuée par le suivi de la réduction de la turbidité et la DCO. L'application des paramètres optimisés sur une eau résiduaire réelle d'une laiterie a montré, une réduction importante de la demande chimique en oxygène DCO (90%), et de la turbidité (99%) avec un faible cout.

Après l'application des paramètres optimisés sur une eau résiduaire réelle d'une laiterie ; les résultats obtenus, ont été encourageant, ils ont montré que l'EC, pourrait être appropriée pour le traitement de clarification des eaux résiduaires laitières, pour une densité de courant de **13 mA/cm²**, un temps d'électrolyse de **60 min** à **90 min**, un **pH** proche de la neutralité, une température de **20°C** et, les taux de réduction approximatifs de **la turbidité** et de la **DCO** sont de 99% et 90% respectivement avec un faible coût opérationnel.

D'après cette étude on a constaté que l'EC est sollicité dans la réduction de la pollution initiale des eaux étudiées à pH libre sans l'utilisation des réactifs chimiques, d'une autre façon l'EC est une méthode économique et elle peut être appliqué plus que **5** fois sans perte d'efficacité des électrodes avec un volume minimal de boue ($\sim 80 \text{ cm}^3/\text{L}$). Les eaux traitées peuvent être réutilisées.

Références

Bibliographiques

A

Abbas M et Messaad A. (2016). Utilisation de l'électrocoagulation pour l'élimination de colorants des eaux usées de l'industrie textile. Mémoire de Master. Université Mouhamed Boudiaf –M'sila, Algérie, p 67.

Abibsi N. (2011). Réutilisation des eaux usées épurées par filtres plantes (phytoepuration) pour l'irrigation des espaces verts application à un quartier de La ville de Biskra. Mémoire de Magister. Université Mohamed Khider-Biskra, Algérie, p149.

Abid A., Zouhri A., Ider A., Kholtei S., (2009). Valorisation d'un nouveau bio flocculant (extrait de cactus) dans le traitement physico-chimique des rejets liquides chargés en cuivre, en zinc et en matière en suspension. *Revue des Energies Renouvelables*, 12(2), p. 321-330.

Aitbara A, Cherifi M, Hazourli S, Leclerc J.P, 2014. Continuous treatment of industrial dairy effluent by electrocoagulation using aluminum electrodes. *Desalination and Water Treatment* 57, 3395–3404.

Alinsafi, A., Khemis, M., Pons, M.N., Leclerc, J.P., Yaacoubi, A., Benhammou, A., Nejmeddine, A. (2005). Electro-coagulation of reactive textile dyes and textile wastewater. *Chemical Engineering and Processing* 44, p. 461-470.

Amellal, R. (1995). La filière du lait en Algérie : entre l'objectif de la sécurité alimentaire et la réalité de la dépendance. *CIHEAM. Options Méditerranéennes Série B*, n14 Pp : 229- 238.

Annane O., (2008). Amélioration de la technique de défluoruration par le nouveau procédé d'électrocoagulation bipolaire. Mémoire de Magister, université de Mouloud Mammeri de Tizi- Ouzou, 91p.

B

Back E.C ; Giannini A.P ; Ramirez E.R. (1974). Electrocoagulation clarifies food wastewater, *Food technology*, Feb, p18-22.

Balaska A. (2005). Traitement de l'eau usée de la laiterie Edough-Annaba par des procédés physicochimiques et biologiques. Mémoire de Magister. Université Badji mokhtar Annaba, Algérie, p145.

Beaudry J.P ; Tardat-Henry M. (1993). Chimie des eaux, Collège d'enseignement général et professionnel de Saint-Laurent, Québec. 2^{ème} Edition, Édition : Le Griffon d'argile, p 537.

Bekhouche- Guendouz N (2011). Evaluation de la Durabilité des Exploitations Bovines Laitières des Bassins de la Mitidja et d'Annaba. Thèse de Doctorat Ecole Nationale Supérieure Agronomique d'Alger (ENSA). Algerie. Pp : 49, 58.

Belaachi A. (2016). Elimination d'un colorant anionique par adsorption, Electrocoagulation, Fenton. Thèse de doctorat. Université Abdelhamid ibn badis, Mostganem, Algérie, p181.

Benabbou A et Bentalab S. (2015). Valorisation du lactosérum liquide en l'incorporant dans la fabrication des crèmes glacées de type sorbet. Mémoire de Master. Université de Tlemcen, Algérie, p 72.

Bengana N et Boudaa T. (2013). Application de la Photocatalyse combinée avec l'électroflotation pour le traitement des effluents de l'industrie textile. Mémoire de Master. Université Abderrahmane Mira- Bejaia, Algérie, p 160.

Bennajah M. (2007). Traitement des rejets industriels liquide par électrocoagulation/électroflotation en réacteur airlift. Thèse de doctorat. Institut National polytechnique de Toulouse, France , p 197.

Bessioud S. (2010). Traitement D'une eau de surface par electrocoagulation. Mémoire de Magister. Université 08 mai 1945 Guelma, Algérie, p 127.

Boeglin, J.C. (1998). Technique de l'ingénieur ; Traitement biologique des eaux résiduaires. J 3942, p. 1-27.

Boeglin, J.C. (1999). Technique de l'ingénieur ; Lutte contre la pollution de l'eau, Inventaire des traitements. J 1250, p. 1-10.

Bollina, (1947). Possibilities of the electric coagulator for water treatment. Water and Sewage p 3, 21-25.

Bonnefoy C ; Guillet F ; Leyrat G. (2002). Microbiologie et qualité dans les industries agroalimentaire, Centre régional de documentation pédagogique d'aquitaine. DOIN editeurs CRDP, Paris, p 248.

Boudjema K. (2007). Essai d'optimisation de la production d'acide lactique sur lactosérum par *Streptococcus thermophilus*. Mémoire de Magister. Université M'Hamed Bougara, Boumerdès, Algérie, p 111.

Bourbon B. (2018). Gestion des effluents et des boues issus de la transformation Laitière. p 18.

C

Chen G ; Chen X ; Yue P.L. (2000). Electrocoagulation and electroflotation of restaurant wastewater. Journal of Environmental Engineering 126 (9), p 858-863.

Corthondo, T., Trepos, F. (2004). Traitement des effluents laitiers : laits concentrés ; laits en poudre. Revue de la recherche « France lait » p. 3.

D

Daufin G; Rene F ;Aimar P. (1998). Les séparations par membrane dans les procédés de l'industrie alimentaire. Édition Lavoisier TEC & DOC, Paris, p 592.

Demirel B., Yenigun O. & Onay T.T., 2005. Anaerobic treatment of dairy wastewaters: a review, *Process Biochemistry.*, Vol. 40, 2583-2595.

Devillers J; Squikbin M; Yourassowasky C. (2005). Qualité Physico-chimique et chimique des eaux de surface. Les données de l'IBGE : "L'eau à Bruxelles", p 16.

Djabri L. (2013). Synthèse bibliographique sur la production d'acide lactique sur lactosérum par *Streptococcus thermophilus*. Mémoire de Licence. Université Kasdi Merbah-Ourgla, Algérie, p 54.

Drogui P ; Asselin M ; Brar S.K ; Benmoussa H ; Blais J.F. (2007). Electrochemical removal of pollutants from agro-industry wastewaters. *Separation and Purification Technology* 61, p 301-310.

E

Essadki A.H; Bennajah M; Gourich B; Vial C; Azzi M; Delmas H. (2008). Electrocoagulation/electroflotation in an external-loop airlift reactor-Application to the decolorization of textile dye wastewater: a case study. *Chemical Engineering and Processing* 47, p 1211-1223.

F

Feng C ; Suguiura N ; Shimada S and Maekawa T. (2003). Development of high performance electrochemical wastewater treatment system. *Journal of Hazardous Materials*, B103, p 65-78.

G

Gaël, P., (2002). Impact environnemental des effluents d'abattoirs : Actualités techniques et réglementaires. Thèse de doctorat d'état, Université Paul-Sabatier. Toulouse, France, 140 p.

Ge J ; Qu J ; Lei P ; Liu H. (2004). New bipolar electrocoagulation-électroflotation process for the treatment of laundry wastewater. *Separation and Purification Technology* 36 (1), p 33-39.

Gérard, G. (1999). L'eau usage et pollution : tome II, Institut National de La Recherche Agronomique, INRA ; Paris, p 210.

Greaves, J., Hobbs, P., Chadwick, D., Haygarth, P., 1999. Prospect for the recovery of phosphorus from animal manures: A review. *Environmental Technology*, 20 (7), 697-708.

H

Harrat N. (2013). Elimination de la matière organique naturelle dans une filière conventionnelle de potabilisation d'eaux de surface. Thés de doctorat. Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie, p 168.

Hazourli S ; Boudiba L ; Fedaoui D ; Ziati M. (2007). Prétraitement par coagulation-floculation d'eaux résiduaires d'une laiterie industrielle. Journal de la société algérienne de chimie 17 (2), p 155-172.

Holt P.K ; Barton G.W ; Mitchell C.A. (2004). The future for électrocoagulation as a localized water treatment technology. Chemosphere 59 (3), p 355-367.

I

Irdemez S ; Yildiz Y.S ; Tosunoglu V. (2006). Optimization of phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with aluminum plate electrodes. Separation and Purification Technology 52 (2), p 394-401.

Ivanishvili, A.I., Przhgorlinskii, V.I., Kalinichenko, T.D. (1987). Comparative evaluation of the efficiency of electrocoagulation and reagent methods of clarifying waste water. Journal of Water Chemistry and Technology 9, p. 468-469.

J

Journal Officiel de la République Algérienne N° 26, 23 Avril 2006, Décret exécutif n° 06-141 du 20 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 19 Avril 2006 définissant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels. p 4-9.

K

Kacimi El Hassani S., 2013. La dépendance alimentaire en Algérie : importation de lait en poudre versus production locale, quelle évolution ? Mediterranean Journal Of Social Sciences Vol 4, N°11, p 152-158.

Khemis M; Leclerc J.P; Tanguy G; Valentin G and Lopicque F. (2006). Treatment of industrial liquid wastes by electrocoagulation : experimental investigation and an overall interpretation model ,Chem.Eng.Sci ; 61 , p 3602-3609.

Khennoussi A ;Ameziane N ;Chahlaoui A et Chaouch M. (2013). Effet bactéricide et épuratoire de traitement électrochimique sur l'effluent d'abattoir de viande rouge. European Scientific Journal, edition Vol 9, N° 36.

Kirat S 2007. Les conditions d'émergence d'un système d'élevage spécialisé en engraissement et ses conséquences sur la redynamisation de l'exploitation agricole et la filière des viandes rouges bovines - Cas de la Wilaya de Jijel en Algérie. Montpellier (France): CIHEAM-IAMM, 137p.

Koby M; Can O.T; Bayramoglu M. (2003). Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. Journal of Hazardous Materials B100, p 163-178.

L

Laboratoire d'analyses S.M.INC. Analyse microbiologique et physico-chimique de l'eau potable, P8.

Lemlikchi W. (2012). Elimination de la pollution des eaux industrielles par différents procédés d'oxydation. Université Mouloud Maamri Tizi Ouzou. Algérie, p177.

M

Maalem R. (2016). Décoloration des eaux par électrocoagulation .Mémoire de Master. Université Tébessa, Algérie, p 54.

Mahamane Oumarou A ; Yacouba Mai Kodomi A. (2015). Valorisation du lactosérum comme milieu de culture pour la production de métabolites d'*Aspegillus niger*. Mémoire de Master. Université M'hamed Bouguerra Boumerdès, p 60.

Makhoukh M; Sbaa M; Berrahou A; Van Clooster M. (2011). Contribution à l'étude physico-chimique des eaux superficielles de L'oued moulouya (Maroc oriental) . Larhyss Journal, p 149-169.

Maméri N ; Lounici H ; Belhocine D ; Grib H ; Piron D.L ; Yahiat Y. (2001). Defluoridation of Sahara water by small plant electrocoagulation using bipolar aluminum electrodes. Separation and Purification Technology 24 (1-2), p 113-119.

Meribai A, Ouarkoub M , Bensoltane A, 2016. Algerian dairy sector analysis: deficit aspects and perspectives. La problématique de la production et d'importation du lait en Algérie: état des lieux, aspects déficitaires et perspectives. Journal of new sciences, Agriculture and Biotechnology, 35(7), 1986-1992

Metahri M.S. (2012). Elimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées, par des procédés mixtes .cas de la STEP est de la ville de Tizi-Ouzou. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzu, Algérie, P172

Mohammad M.E ; Muttucumar S. (2006). An empirical model for defluoridation by batch monopolar electrocoagulation/flotation (ECF) process. Journal of Hazardous Materials B131, p 118-125.

Moletta, R., Torrijos, M. (1999a). Technique de l'Ingénieur ; traitement des effluents de la filière laitière. F 1501, p. 1-21.

Mollah, M.Y.A; Schennach, R; Parga J.R; Cocks D.L. (2001). Electrocoagulation (EC) science and applications. Journal of Hazardous Materials B 84, p 29-41.

Mouaz N et Bentchich K. (2016). Caractérisation physico-chimiques et bactériologiques de l'eau de l'oued de Cheliff. Mémoire de Master. Université de Khemis-Miliana, Algérie, 64 p.

N

Naje A.S ;Chelliapan S ;Zakaria Z and Abbas S.A.(2015).Treatment Performance of Textile Wastewater Using Electrocoagulation (EC) Process under combined Electrical Connection of Electrodes .International Journal of Electrochemical Science 10, p5924-5941.

R

Rejsek F., (2002). Analyse des eaux: aspect réglementaires et techniques, Ed. CRDP d'aquitaine, France, 350p.

Rodier J ; Legube B ; Merlet N ; Et al. (2009). L'analyse de l'eau, 9^{ème} Edition. Edition DUNOD, Paris.1526 p.

S

Sachon, G. (1980). L'industrie laitière et la pollution de l'eau, Revue des ENIL, 1^{er} partie n°49 ; p 7-12.

Sahraoui H et Yahia Mohammed.(2017). Étude de la dégradation du colorant bleu de méthylène Par l'électrocoagulation. Diplôme de Master. Université Djilali Bounaama de khemismiliana. Algérie, p76.

U

Ugurlu, M. (2004). The removal of some inorganic compound from paper mill effluents by the electrocoagulation method. G. U. Journal of Science 17 (3), P 85-99.

V

Vander borgh, P., Ska, B. (1989). Eutrophisation et qualité des eaux de la SEMOIS. Tribune de l'eau, 42, n° 538, p. 7-14.

Y

Yu M.J ; Koo J.S ; Myung G.N ; Cho Y.K ; Cho Y.M. (2005). Evaluation of bipolar electrocoagulation applied to biofiltration for phosphorus removal. Water Science and Technology 51 (10), p 231-239.

Z

Zamouche S. (2015). Contribution à l'étude de l'action d'agents polluants sur des végétaux bioindicateurs. Thèse de doctorat. Université des Freres Mentouri Constantine,Algérie, p 189.

Zeghoud MS. (2014). Etude de système d'épuration des eaux usées urbaines par lagunage naturel de village de méghidra. Mémoire de Master. Université D'el-Oued, Algérie, P 90.

Zidane F ;Qassid F ;El Basri S ;Bensaid J ;Drogui P et Blais J .F.(2012).décoloration des effluent par des structures absorbantes générées par électrocoagulation avec des électrodes d'aluminium et de fer, Revue des Sciences de l'Eau 25(1), p 33-47.