

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar El oued



Faculté de Technologie

Département : Hydraulique et Génie Civil

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme du Master en Hydraulique

Option: ouvrage hydraulique

THEME

**Mise en œuvre de procédé
électrocoagulation pour le traitement
des eaux résiduaires**

Dirigé par :

Meguelliati Soumia

Ouakouak Abdelkader

Présenté par :

Tita Ouarda

Hannouna Youcef

Promotion : Juin 2023

REMERCIEMENTS

A l'issue de cette étude, nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé tout au long de notre travail.

Note promotrice **M^{me} Soumia Meguelatti** et **Dr Ouakouak Abdelkader** professeur en hydrauliques pour sa contribution à l'encadrement de ce mémoire. Nous sommes également reconnaissant aux membres de Jury qui ont bien voulu examiner et discuter notre travail , nous les en remercier vivement nos sincères remerciements.

Nous remercions **Dr Salim Khechanna** pour leur aide, et tout le corps enseignant du département d'Hydraulique et Génie Civil.

Enfin, nous voudrions souligner les contributions efficaces de tous nos proches et Amis qui nous ont aidé et soutenu moralement, tout au long de la préparation de ce mémoire.

Hannouna Youcef

Tita Ouarda

DEDICACE

Nous dédions ce travail à :

Nos parents

Nos belles familles

Nos enfants

Nos frères et sœurs et leurs familles

Nos camarades de la promotion

Résumé :

La grande expansion de l'utilisation des colorants a accru leur présence avec les déchets textiles industriels aqueux rejetés dans l'environnement, ce qui a causé le problème de la pollution de l'eau en particulier et de la pollution naturelle de l'environnement en général. de nombreux chercheurs.

Dans notre étude, une technique moderne a été utilisée, qui est le procédé d'électrocoagulation(CE), en utilisant des électrodes solubles telles que : l'aluminium pour produire des ions Al^{3+} à l'anode, qui réagissent ensuite en solution avec les ions OH pour former de l'hydroxyde d'aluminium $Al(OH)_3$.

Le but de notre travail est d'appliquer le procédé CE pour éliminer le colorant textile (MO) de la solution synthétique.

Mots-clés : Colorants textiles, pollution, l'électrocoagulation (EC), le Méthylorange, électrodes en aluminium

Abstract:

The great expansion in the use of dyes has increased their presence with aqueous industrial textile waste discharged into the environment, which has caused the problem of water pollution in particular and natural pollution of the environment in general. Many researchers.

In our study, a modern technique was used, which is the electrocoagulation (EC) process, using soluble electrodes such as: aluminum to produce Al^{3+} ions at the anode, which then react in solution with the OH ions to form aluminum hydroxide $Al(OH)_3$.

The aim of our work is to apply the CE process to remove the textile dye (MO) from the synthetic solution.

Key words: Textile dyes, pollution, electrocoagulation (EC), Methyl orange, aluminum electrodes

ملخص

إن التوسع الكبير في استخدام الأصباغ زاد من تواجدها مع المخلفات الصناعية النسيجية المائية المطروحة في البيئة والتي تسببت في مشكلة تلوث المياه بصفة خاصة والتلوث البيئي الطبيعي بصفة عامة، فقد أصبحت عملية إزالتها محط اهتمام الكثير من الباحثين.

ومن خلال دراستنا هذه تم استخدام تقنية حديثة وهي عملية التبخثر الكهربائي (CE) عن طريق استخدام الأقطاب الكهربائية القابلة للذوبان مثل: الألمنيوم لإنتاج أيونات Al^{3+} عند الأنود، والتي تتفاعل بعد ذلك في محلول مع أيونات OH لتكوين هيدروكسيد الألومنيوم $Al(OH)_3$.

الهدف من عملنا هذا هو تطبيق عملية (CE) لإزالة صبغة النسيج (MO)، من المحلول الاصطناعي.

الكلمات المفتاحية: أصباغ النسيج، التلوث، التبخثر الكهربائي (EC)، ميثيلبرتقالي (MO)، أقطاب الألمنيوم.

Sommaire

REMERCIEMENTS.....	
DEDICACE	
Résumé :	
Sommaire.....	V
Liste des figures.....	IX
Liste des Photos.....	X
Liste des tableaux :	XI
INTRODUCTION GENERALE.....	1

PARTIE I:SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1: Généralités sur les eaux résiduaires

Introduction :	6
1-1-Définition des eaux résiduaires :	6
1-2- Origines des eaux résiduaires:	7
1-2-1- Les eaux usées domestiques :	7
1-2-2- Les eaux résiduaires pluviales :	8
1-2-3- Les eaux résiduaires agricoles :	8
1-2-4- Les eaux résiduaires industrielles :	8
1-2-5- Les eaux de drainage :	8
1-3- Caractéristiques des eaux résiduaires :	9
1-3-1- Paramètres Physiques :	9
1-3-1-1-La température :	9
1-3-1-2- La matière en suspension (MES) :	9
1-3-2- Paramètres Organoleptiques :	10
1-3-2-1- La Turbidité :	10
1-3-2-2- La couleur :	10
1-3-3- Paramètres Chimiques :	10
1-3-3-1- Le potentiel Hydrogène (pH) :	10
1-3-3-2- La Conductivité :	10

1-3-3-3- L'oxygène dissous :	11
1-3-3-4- La Demande Chimique en Oxygène (DCO) :	11
1-3-3-5- La Demande Biochimique en Oxygène (DBO5) :	11
1-3-3-6- L'azote :	11
1-3-3-7- Les nitrates :	11
1-3-3-8- L'azote ammoniacal :	12
1-3-3-9- Le phosphore :	12
1-3-3-10- Le sulfate :	13
1-4-Paramètres bactériologiques :	13
1-5- Les normes de rejet des eaux résiduaires :	13
1-5-1-Normes internationales :	13
1-5-2-Normes Algériennes :	14

CHAPITRE 2: Généralités sur les pollutions des eaux résiduaires d'industrie textile

Introduction :	17
2-1- Pollution des eaux résiduaires :	17
2-1-1-Définition :	17
2-1-2-Les différents types de pollution :	17
2-2- Eaux résiduaires issues de l'industrie du textile :	18
2-3- Les activités de l'industrie textile :	19
2-4- Les dangers des rejets textiles :	20
2-4-1- Les dangers à long terme :	21
2-5- Législation sur l'environnement :	22
2-6- Les colorants de l'industrie textile :	23
2-7- Traitement d'effluent des colorants :	24
2-7-1- Méthode biologique :	26
2-7-1-1-Traitement aérobie :	26
2-7-1-2-Traitement anaérobie :	26
2-7-2- Méthodes physiques :	27
2-7-2-1- Adsorption sur charbon actif :	27
2-7-2-2- Filtration sur membrane :	27
2-7-3-Méthodes physico-chimiques :	27
2-7-3-1- Coagulation - floculation	27
2-7-4- Méthode chimique :	28

CHAPITRE 3: Traitement des eaux résiduaires par le procédé d'électrocoagulation

Introduction :	32
3-1- Le procédé d'électrocoagulation (EC) :	32
3-1-1- Historique du procédé :	32
3-1-2- Définition du procédé (EC) :	33
3-1-3- Théorie de l'électrocoagulation :	33
3-1-4- Principe d'électrocoagulation (EC) :	35
3-1-5- Les différents matériaux utilisés pour les électrodes :	36
3-2- Réactions aux électrodes :	38
3-2-1- Cas d'électrodes en aluminium :	38
3-3- Principale loi de l'électrolyse :	39
3-4- Paramètres influençant l'EC :	40
3-4-1- Le pH :	40
3-4-2- La conductivité :	42
3-4-3- L'intensité du courant :	42
3-4-4- La distance entre électrodes :	43
□ Autres facteurs influençant l'électrocoagulation :	43
3-5- Avantages et inconvénients de l'électrocoagulation :	43
3-5-1- Avantages :	43
3-5-2- Inconvénients :	44
Conclusion de cette première partie :	45

PARTIE II PARTIE: EXPERIMENTALE

CHAPITRE 1: Matériels et méthodes

Introduction :	48
Choix de polluant organique :	48
1-2- Dispositif expérimental de procédé d'électrocoagulation :	49
1-3- Méthodologie expérimentale :	53
1-3-1- Préparation des solutions :	53
1-3-2- Déroulement d'expérience :	53
1-4- Méthodes d'analyse :	53
1-4-1- La mesure d'absorbance :	54
1-4-2- La mesure de pH :	54
1-5- La courbe d'étalonnage :	54

CHAPITRE 2: Résultats et interprétations

Introduction :	57
2-1- Essai avec 2 électrodes :	57
2-1-1- Effet de temps d'électrolyse :	58
2-1-2- Effet d'intensité de courant :	59
2-1-3- Evolution de la concentration du colorant :	61
2-1-4- Effet de pH :	62
CONCLUSION GENERALE	65
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	67

Liste des figures

PARTIE I:SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure 1.2 : Consommation d'eau et production d'eaux usées par les principaux.....	9
Figure 2.1 : Conséquences de la bioaccumulation après déversement de substances toxiques(insecticides) dans un cours d'eau (Abbas et Messaad, 2017).....	21
Figure 2.2 : Schéma du procédé de traitement classique d'un rejet textile.....	25
Figure- 3.1 : Représentation schématique d'une installation typique de traitement des eaux, etles procédés complexes qui peuvent être remplacés par l'électrocoagulation.....	34
Figure 3.2 : Schéma du principe de l'électrocoagulation.....	35
Figure 3.3 : Mécanisme de corrosion par les ions chlorures et hydroxydes par piqure sur unalliaged'aluminium.....	40
Figure 3.4 : Diagramme de prédominance des espèces aluminium en fonction du pH.	41

PARTIE II PARTIE: EXPERIMENTALE

Figure 1.1 : Électrode en aluminium.....	51
Figure 1.2 : Dispositif expérimental final de procédé d'électrocoagulation.....	52
Figure 1.3 : Courbe d'étalonnage de colorant Méthylorange.....	55
Figure 2.1 : Effet de temps d'électrolyse sur l'élimination du colorant MO.....	59
Figure 2.2a : Effet de l'intensité de courant sur le rendement du colorant MO.....	60
Figure 2.2b : Effet de l'intensité de courant sur le rendement du colorant MO.....	60
Figure 2.2c : Effet de l'intensité de courant sur le rendement du colorant MO.....	61
Figure 2.3 : Evolution de la concentration du colorant en fonction du temps pour le 3intensités de courant.	62
Figure 2.4 : Variation du pH en fonction du temps.	63

Liste des Photos

PARTIE I:SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Photos 1.1 : Photos des rejets de textile	20
--	----

PARTIE II PARTIE: EXPERIMENTALE

Photo 1.1 : Réacteur de 2 L.....	49
Photo 1.2 : Agitateur magnétique.....	50
Photo 1.3 : Une pompe à eau de la marque kamoer.....	50
Photo 1.4 : Générateur de courant électrique avec des fils électriques	50
Photo 1.5 : Un barreau magnétique	51
Photo 1.6 : Le spectrophotomètre UV-Visible utilisé	54
L'efficacité de décoloration a été calculée en pourcentage (%) selon la relation suivante	54
Photo 1.7 : Le pH mètre de type Hanna utilisé.....	54

Liste des tableaux

PARTIE I:SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau 1.1 : Normes de rejets internationales.....	14
Tableau I.2 : Normes de rejets dans un milieu récepteur	15
(Journal Officiel de laRépublique Algérienne, 2006.).....	15
Tableau 2.1 : Principaux types de pollution des eaux continentales, nature de produitspolluants et leurs origines (Lévêque, 1996).....	18
Tableau 2.2 : Différentes activités d’une entreprise textile et les effluents associés.....	19
Tableau 2.3 : Valeurs limites des paramètres de rejets d’effluents textiles.	22
Tableau 2.4 : Principaux groupes chromophores et auxochromes.....	24
Tableau 2.5 : Taux de fixation sur textile pour les différentes classes de colorants.	25
Tableau 2.6 : Traitements possibles pour les rejets textiles et leurs avantages et inconvénientsassociés.	29
Tableau 3.1 : Exemples d’applications du procédé d’électrocoagulation.....	36
Tableau 3.2 : Matériaux d’électrodes utilisés en EC :	37

PARTIE II ~~PARTIE~~: EXPERIMENTALE

Tableau 1.1: Propriétés chimiques et physiques de MO. (Belouettar L, 2020)	49
Tableau 2.1 : Les résultats des 3 essais. I=66mv ,I=86mv,I=118mv	57

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Avec le développement rapide de l'industrie moderne, la contamination de l'environnement est devenue de plus en plus grave ou de nombreux déchets industriels ont cruellement pollué l'environnement naturel qui était très adéquat à l'habitation humaine dans le passé.

Les rejets polluants restent un problème sérieux dans plusieurs pays du monde, pour l'élimination du potentiel de perturbation environnementale dans une perspective de développement durable, la dépollution des eaux et la valorisation des résidus sont des objectifs importants des pays industrialisés et des pays en voie de développement. Pour y parvenir des technologies de traitement doivent être développées permettant ainsi de préserver l'environnement.

Les eaux résiduaires sont des milieux extrêmement complexes, altérés par les activités anthropiques à la suite d'un usage domestique, industriel, artisanal, agricole ou autre. Elles sont considérées comme polluées et doivent être donc traitées avant toute réutilisation ou injection dans les milieux naturels récepteurs (Selghi, 2001). C'est pourquoi, dans un souci de respect de ces différents milieux naturels récepteurs, des traitements d'abattement ou d'élimination de ces polluants sont effectuées sur tous les effluents urbains ou industriels.

Les colorants textiles sont l'un des importants polluants qui peuvent constituer des facteurs de risques pour notre santé et de nuisances pour notre environnement, quand ils sont rejetés sans traitement préalable dans la biosphère. Le dysfonctionnement et la corrosion des installations industrielles peuvent également générer d'autres pollutions (métalliques, organométalliques et surtout organiques) qui engendrent des effets néfastes sur la flore et la faune aquatique, mais aussi sur les populations humaines et animales qui consomment les eaux non traitées. Un traitement sera donc indispensable pour éliminer ces matières néfastes à l'environnement (Lemlikchi, 2012).

Quand on veut parler sur le traitement des eaux cela veut dire qu'il y a des technique et des méthodes pour cette opération, et Parmi les techniques on déclarer le procédé qui se nommé par électrocoagulation (EC) et qui se caractérise par un aspect non polluant et une facilité d'automatisation et constituer l'une des méthodes visant à réduire l'emploi de réactifs. C'est ainsi que l'EC est utilisé dans l'élimination des matières organiques comme minérales, les métaux lourds, les hydrocarbures...etc. Globalement ce procédé a été utilisé pour les eaux souterraines et les eaux de surface dans diverses situations, et il a été appliqué à divers problèmes de traitement des eaux (Emamjomeh et Sivakumar, 2009).

Le but de cette étude est d'évaluer la performance de procédé électrocoagulation pour le

traitement des eaux résiduaires, par l'élimination du colorant Méthylorange présents dans les effluents des industries textile. Pour l'évaluation de cette performance on a réalisé des essais sur une solution synthétique typiques d'un rejet liquide d'industrie de textile, cette solution est préparée à base de colorant utilisé. Notre travail comporte deux parties :

PARTIE I : Synthèse bibliographique, elle est constituée de trois chapitres.

Chapitre1 : Généralités sur les eaux résiduaires :

C'est l'étude bibliographique de la définition des eaux résiduaires et ces origines avec une présentation des paramètres les caractérisons, ainsi que les normes de rejet des eaux résiduaires.

Chapitre 2 : Généralités sur les pollutions des eaux résiduaires d'industrie textile :

Ce chapitre est l'étude bibliographique de la pollution des eaux résiduaires avec une présentation de l'industrie textile et les rejets qu'elles génèrent ainsi qu'une vue générale sur les traitements possible.

Chapitre 3 : Traitement des eaux résiduaires par le procédé d'électrocoagulation :

C'est une synthèse sur le procédé d'électrocoagulation, son principe, ces applications, les différentes lois qui les réagissent ainsi que ces avantages et inconvénients.

PARTIE II : Etude expérimentale, elle est constituée de deux chapitres.

Chapitre1 : Matériels et méthodes :

Ce chapitre décrit, les matériels et les méthodes utilisé pour réaliser l'étude du procédé d'électrocoagulation (EC) en continu, ainsi que le dispositif expérimental mis au point.

Le chapitre présentera aussi une description des méthodes d'analyses, des outils utilisés et la composition des effluents étudiés pour l'évaluation des performances de la technique.

Chapitre 2 : Résultats et discussion :

Ce chapitre est consacré à l'évaluation de la performance du procédé d'électrocoagulation en continu, on présente l'ensemble des résultats obtenus, et il détaille l'influence des paramètres de l'EC sur la cinétique de traitement des pollutions.

Quelques paramètres influençant sur l'efficacité de ce procédé ont été étudiés, à savoir :

- ✓ L'effet de temps d'électrolyse,
- ✓ L'effet d'intensité de courant,
- ✓ L'effet de la concentration en colorant.
- ✓ L'effet de pH,

En fin nous avons terminé le manuscrit par une conclusion générale qui regroupe les résultats qui ont été appliqués dans le système de colorant.

PARTIE I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1

Généralités sur les eaux résiduaires

Introduction :

Les eaux résiduaires proviennent de différentes combinaisons d'activités domestiques, industrielles, commerciales ou agricoles, du ruissellement de surface (eau de ruissellement) et de toute entrée d'égout ou infiltration d'égout. Les types d'eaux résiduaires peuvent commodément être regroupées en eaux résiduaires domestiques (des ménages), en eaux résiduaires municipales (des communautés), en eaux résiduaires agricoles et en eaux résiduaires industrielles. Certaines eaux résiduaires prennent des noms techniques qui précisent leur provenance (eaux grises, eaux-vannes, eaux noires, eau blanche de papeterie, eaux blanches de laiterie, etc.)

Les caractéristiques des eaux résiduaires varient en fonction de la source et contiennent des polluants physiques, chimiques et biologiques. Les eaux résiduaires sont traitées comme un déchet.

Le terme assainissement extrêmement large comprend la gestion des eaux résiduaires, des excréments humains, des déchets solides et des eaux pluviales. Le terme égouttage fait référence à l'infrastructure physique requise pour transporter et traiter les eaux résiduaires

1-1-Définition des eaux résiduaires :

Les eaux rejetées après leurs utilisations pour les activités domestiques, industrielles, artisanales ou agricoles et celles déversées à la suite d'événements pluvieux constituent les eaux résiduaires. Celles-ci sont généralement classées en cinq catégories :

- Les eaux résiduaires domestiques,
- Les eaux résiduaires industrielles,
- Les eaux pluviales et de ruissellement.
- Les eaux agricoles
- Les eaux de drainages

Les eaux résiduaires sont composées d'environ 99% d'eau et 1% de matières solides en suspension, colloïdales et dissoutes. Les conséquences de l'émission d'eaux usées non traitées ou mal traitées peuvent être classées en trois catégories :

- Effets nocifs pour la santé humaine,
- Impacts négatifs sur l'environnement,
- Répercussions néfastes sur les activités économiques.

Les eaux résiduaires sont très souvent considérées plus comme une nuisance à éliminer plutôt qu'une ressource. Pourtant, elles constituent une source non négligeable de substances

valorisables : eau, énergie, nutriments, matières organiques et autres sous-produits. Elles représentent une composante importante du cycle de l'eau et doivent être gérées dans l'ensemble du cycle de gestion de l'eau : à partir du prélèvement, du traitement, de la distribution, de la collecte et du traitement après utilisation de l'eau douce, jusqu'à sa réutilisation et son retour ultérieur à l'environnement où elles réapprovisionnent la source pour des prélèvements d'eau ultérieurs (Figure 1.1).

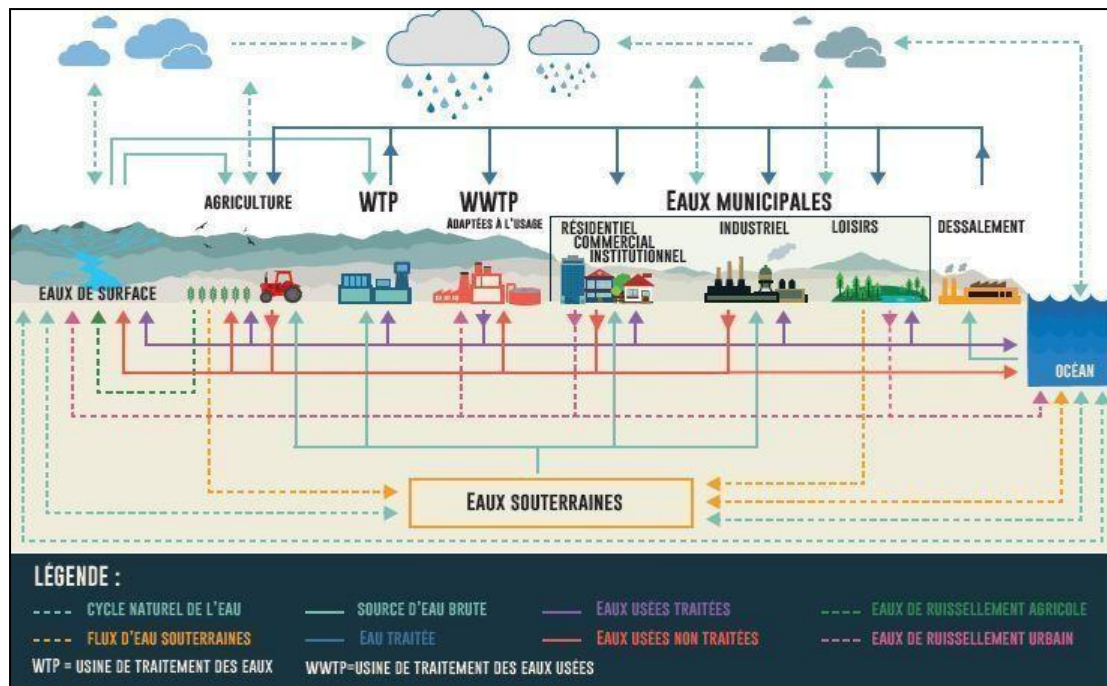


Figure 1.1: Les eaux résiduaires dans le cycle de l'eau (Un water, 2017)

1-2- Origines des eaux résiduaires : On distingue 5 origines des eaux résiduaires :

1-2-1- Les eaux usées domestiques :

Ce sont les eaux utilisées par l'homme pour des besoins domestiques (Chocat, 1997), elles constituent l'essentiel de la pollution et se composent :

- Des eaux de cuisine qui contiennent des matières minérales en suspension provenant du lavage des légumes, des substances alimentaires à base de matières organiques, (glucides, lipides, protides), et des produits détergents ;
- Des eaux de buanderie contenant principalement des détergents ;
- Des eaux de salle de bains chargées en produits pour l'hygiène corporelle. Généralement de matières grasses hydrocarbonées ;
- Des eaux de vannes qui proviennent des sanitaires (WC), très chargées en matières organiques hydrocarbonées, en composée azotés, phosphorés et en microorganismes

(Chocat, 1997 et Franck, 2002).

1-2-2- Les eaux résiduaires pluviales :

Ce sont les eaux de ruissellement qui se forment après une précipitation, elles peuvent être particulièrement polluées, surtout en début de la pluie, par deux mécanismes :

- Le lessivage de sols et des surfaces imperméabilisées
- La remise en suspension des dépôts des collecteurs.

Elles sont de même nature que les eaux résiduaires domestiques, avec de métaux lourds et des toxiques (Plomb, Zinc, Hydrocarbures) provenant essentiellement de la circulation automobile (Franck, 2002).

1-2-3- Les eaux résiduaires agricoles :

Le secteur agricole reste le plus grand consommateur des ressources en eau (Salem, 1990).

Les pollutions dues aux activités agricoles sont de plusieurs natures :

- Apport des eaux de surface de nitrate et de phosphate utilisés comme engrais.
- Apport de pesticides chlorés ou phosphorés, de dés herbants, d'insecticides.
- Apport de sulfate, de cuivre et de composés arsenicaux destinés à la protection de vignes en région viticole (Richard, 1996).

1-2-4- Les eaux résiduaires industrielles :

Elles sont représentées par les rejets des exploitations industrielles et semi-industrielles (station de lavage et graissage, station d'essences, des industries textiles. etc.) Qui sont caractérisés par une grande diversité de la composition chimique, présentant ainsi un risque potentiel de pollution (Khadraoui et Talab. 2008).

1-2-5- Les eaux de drainage :

C'est l'eau de lessivage récupérée après irrigation grâce à système de drainage. Les pollutions dues aux activités agricoles sont de plusieurs natures :

- Apport aux eaux de surface de nitrates et de phosphates utilisés comme engrais, par suite de lessivage de terre perméables. Ces composés minéraux favorisent la prolifération des algues (phénomène d'eutrophisation) qui en abaissent la teneur en oxygène des eaux courantes compromettent la vie des poissons et des animaux aquatiques.
- Apport des pesticides chlorés ou phosphorés, de dés herbants, d'insecticides.

- En région viticole, apport du sulfate de cuivre, de composés arsenicaux destinés à la protection des vignes (Richard, 1996).

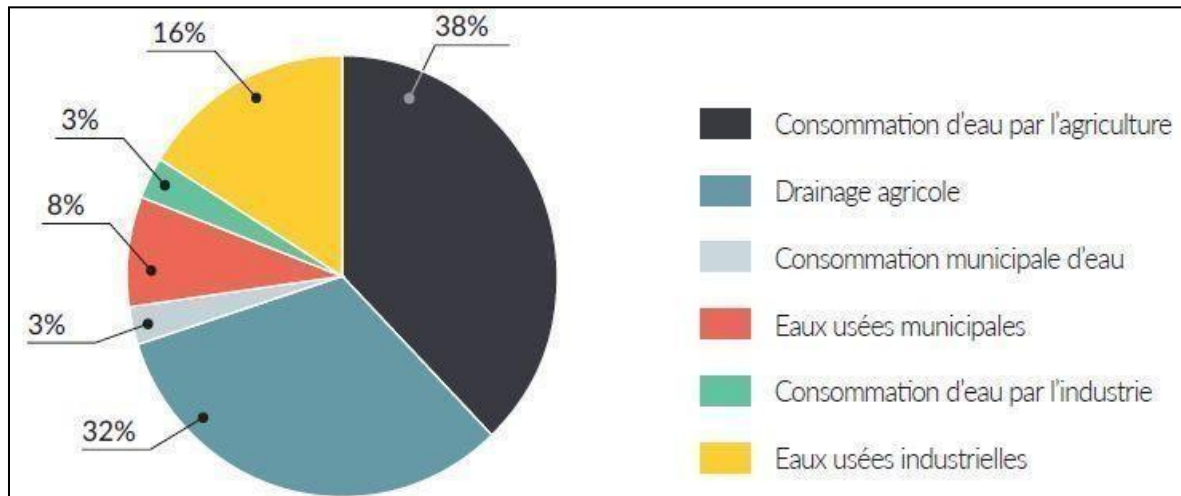


Figure 1.2 : Consommation d'eau et production d'eaux usées par les principaux secteurs (Un water, 2017)

1-3- Caractéristiques des eaux résiduaires :

Dans ce sous chapitre nous passerons en revue les principaux paramètres physico-chimiques analysés au cours de la partie expérimentale ainsi que les paramètres bactériologiques les plus rencontrés dans les eaux résiduaires.

1-3-1- Paramètres Physiques :

1-3-1-1-La température :

Il est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision. En effet, celle-ci joue un rôle dans la solubilité des sels et surtout des gaz, dans la dissociation des sels dissous donc sur la conductivité électrique, dans la détermination du pH, pour la connaissance de l'origine de l'eau et des mélanges éventuels,...etc. (Rodier et AL, 2005).

1-3-1-2- La matière en suspension (MES) :

Selon REJSEK (2002), la pollution particulaire est due à la présence de particules de grande taille, supérieure à $10\mu\text{m}$, en suspension dans l'eau, et que l'on peut assimiler aux matières en suspension (MES). En fait, les matières en suspension ne sont des particules solides véritablement en suspension que dans des conditions moyenne d'écoulement des effluents correspondant à une vitesse minimale de $0,5\text{ m/s}$. En fonction de la taille des particules, on distingue les matières grossières ou décantables (diamètre supérieur à $100\mu\text{m}$) et les matières en suspension. On peut également prendre en compte une partie des matières colloïdales, de dimension inférieure, qui constituent la limite entre la phase solide et la phase dissoute (entre 1 et $10^{-2}\mu\text{m}$).

1-3-2- Paramètres Organoleptiques :**1-3-2-1- La Turbidité :**

Selon REJSEK (2002), 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, comme les argiles, les limons, les grains de silice et les microorganismes. Une faible part de la turbidité peut être due également à la présence de matières colloïdales d'origine organique ou minérale. Les unités utilisées pour exprimer la turbidité proviennent de la normalisation ASTM (American Society for Testing Material) qui considère que les trois unités suivantes sont comparables :

Unité JTU (Jackson Turbidity Unit) = unité FTU (Formazine Turbidity Unit) unité NTU (Nephelometric Turbidity Unit).

1-3-2-2- La couleur :

Une eau pure observée sous une lumière transmise sur une profondeur de plusieurs mètres émet une couleur bleu clair car les longueurs d'ondes courtes sont peu absorbées alors que les grandes longueurs d'onde (rouge) sont absorbées très rapidement. (REJESK, 2002). La coloration d'une eau est dite vraie ou réelle lorsqu'elle est due aux seules substances en solution. Elle est dite apparente quand les substances en suspension y ajoutent leur propre coloration. (Rodier et Al, 2005).

1-3-3- Paramètres Chimiques :**1-3-3-1- Le potentiel Hydrogène (pH) :**

L'acidité, la neutralité ou l'alcalinité d'une solution aqueuse peut s'exprimer par la concentration en H_3O^+ (noté H^+ pour simplifier). De manière à faciliter cette expression ; on utilise le logarithme décimal de l'inverse de la concentration en ion H^+ : c'est le pH. (Mathieu et Pielain, 2003).

$$pH = \log 1/[H^+]$$

1-3-3-2- La Conductivité :

La conductivité est la propriété que possède une eau de favoriser le passage d'un courant électrique. Elle est due à la présence dans le milieu d'ions qui sont mobiles dans un champ électrique. Elle dépend de la nature de ces ions dissous et de leurs concentrations. (REJSEK, 2002). La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm^2 . L'unité de conductivité est le siemens par mètre (S/m).

$$1 \text{ S/m} = 10^4 \mu\text{S/cm} = 10^3 \text{ mS/m}.$$

1-3-3-3- L'oxygène dissous :

L'oxygène dissous est un composé essentiel de l'eau car il permet la vie de la faune et il conditionne les réactions biologiques qui ont lieu dans les écosystèmes aquatiques.

La solubilité de l'oxygène dans l'eau dépend de différents facteurs, dont la température, la pression et la force ionique du milieu. La concentration en oxygène dissous est exprimée en (mg /l). (REJSEK, 2002).

1-3-3-4- La Demande Chimique en Oxygène (DCO) :

La demande chimique en oxygène (DCO) est la quantité d'oxygène consommée par les matières existantes dans l'eau et oxydables dans des conditions opératoires définies. En fait la mesure correspond à une estimation des matières oxydables présentes dans l'eau quel que soit leur origines organique ou minérale.

La DCO étant fonction des caractéristiques des matières présentes, de leurs proportions respectives, des possibilités de l'oxydation. (Rodier, 2005).

La DCO est la concentration, exprimée en mg/L, d'oxygène équivalente à la quantité de dichromates consommée par les matières dissoutes et en suspension lorsqu'on traite un échantillon d'eau avec cet oxydant dans des conditions définies par la norme. (REJSEK, 2002).

1-3-3-5- La Demande Biochimique en Oxygène (DBO₅) :

Pratiquement, la demande biochimique en oxygène devrait permettre d'apprécier la charge du milieu considéré en substances putrescibles, son pouvoir auto-épurateur et d'en déduire la charge maximale acceptable, principalement au niveau des traitements primaires des stations d'épuration. (Rodier, 2005).

Selon **REJSEK (2002)**, la demande biochimique en oxygène après 5 jours (DBO₅) d'un échantillon est la quantité d'oxygène consommé par les microorganismes aérobies présents dans cet échantillon pour l'oxydation biochimique des composés organiques et/ou inorganiques.

1-3-3-6- L'azote :

L'azote présent dans l'eau peut avoir un caractère organique ou minéral. L'azote organique est principalement constitué par des composés tels que des protéines, des polypeptides, des acides aminés, de l'urée. Le plus souvent ces produits ne se trouvent qu'à de très faibles concentrations. Quant à l'azote minéral (ammoniaque, nitrate, nitrite), il constitue la majeure partie de l'azote total. (Rodier, 2005).

1-3-3-7- Les nitrates :

Les nitrates se trouvant naturellement dans les eaux provenant en grande partie de l'action de

l'écoulement des eaux sur le sol constituant le bassin versant. Leurs concentrations naturelles ne dépassent pas 3 mg /L dans les eaux superficielles et quelques mg/L dans les eaux souterraines. La nature des zones de drainage joue donc un rôle essentiel dans leur présence et l'activité humaine accélère le processus d'enrichissement des eaux en nitrates. La teneur en nitrates est en augmentation ces dernières années, de l'ordre de 0,5 à 1 mg/l/a n, voire 2 mg/l/an dans certaines régions. Cette augmentation a plusieurs origines :

- Agricole : agriculture intensive avec utilisation massive d'engrais azoté ainsi que rejets d'effluents d'élevage. Cette source représente les 2/3 de l'apport en nitrates dans le milieu naturel ;
- Urbaine : rejet des eaux épurées des stations d'épuration où l'élimination de l'azote n'est pas totale et qui peuvent rejeter des nitrates ou des ions ammonium qui se transformeront en nitrates dans le milieu naturel. Cette source représente les 2/9 des apports ;
- Industrielle : rejet des industries minérales, en particulier de fabrication des engrais azotés. Cette source représente 1/9 des apports. (REJSEK, 2002).

1-3-3-8- L'azote ammoniacal :

Pour désigner l'azote ammoniacal, on utilise souvent le terme d'ammoniaque qui correspond aux formes ionisées (NH_4^+) et non ionisées (NH_3) de cette forme d'azote.

L'ammoniaque constitue un des maillons du cycle de l'azote. Dans son état primitif, l'ammoniac (NH_3) est un gaz soluble dans l'eau, mais, suivant les conditions de pH, il se transforme soit en un composé non combiné, soit sous forme ionisée (NH_4^+). Les réactions réversibles avec l'eau sont fonction également de la température et sont les suivantes :



1-3-3-9- Le phosphore :

Le phosphore peut exister dans les eaux en solution ou en suspension, à l'état minéral ou organique. Les composés phosphorés qui, sans hydrolyse ou minéralisation, répondent au test spectrophotométrique sont considérés comme étant des ortho phosphates.

L'hydrolyse en milieu acide fait apparaître le phosphore hydrolysable et minéralisation, le phosphore organique. Chaque fraction (phosphore en solution ou en suspension) peut être séparé analytiquement en ortho phosphates, phosphore hydrolysable et phosphore organique. Suivant les cas, la teneur en phosphates peut être exprimée en mg/L de PO_4 ou de P_2O_5
 $1\text{mg/L } \text{PO}_4 = 0,747 \text{ mg/L } \text{P}_2\text{O}_5 = 0,326 \text{ mg/L P}$ (Rodier;2005).

1-3-3-10- Le sulfate :

La concentration en ion sulfate des eaux naturelles est très variable. Dans les terrains ne contenant pas une proportion importante de sulfates minéraux, elle peut atteindre 30 à 50 mg/L, mais ce chiffre peut être très largement dépassé (jusqu'à 300 mg/L) dans les zones contenant du gypse ou lorsque le temps de contact avec la roche est élevé. La teneur en sulfates des eaux doit être reliée aux éléments alcalins et alcalinoterreux de la minéralisation. Leur présence dans l'eau est généralement due à des rejets en provenance d'ateliers de blanchiment (laine, soie, etc.), d'usines de fabrication de cellulose (pâte à papier, etc.) et d'unités de décoloration. En cas de rejet dans l'environnement, les sulfites se combinent à l'oxygène en donnant des sulfates. (Rodier, 2005).

1-4-Paramètres bactériologiques :

Le principal indicateur bactérien pour suivre la pollution par excréments est constitué par l'ensemble des microorganismes pathogène du groupe coliformes, Exp : Salmonella, Giardia lamblia, Escherichia col...etc. (Meghzili, 2002 in Metahri, 2012).

L'irrigation directe à partir de ces eaux usées affecte la santé humaine, le cas échéant des maladies digestives (diarrhées aiguës, choléras,).

1-5- Les normes de rejet des eaux résiduaires :

Avant que les eaux résiduaires épurées soient rejetées dans le milieu naturel, elles doivent impérativement obéir à des normes. Dans la littérature, il existe plusieurs normes internationales comme les normes de la Fédération d'agriculture et de nourriture (FAO) établies en 1985 et celles de l'organisme mondiale de santé (OMS) en 1989. Et des normes algériennes.

1-5-1-Normes internationales :

La norme est représentée par un chiffre qui fixe une limite supérieure à ne pas dépasser ou une limite inférieure à respecter. Un critère donné est rempli lorsque la norme est respectée pour un paramètre donné. Une norme est fixée par une loi, une directive, un décret de loi. Les normes internationales selon l'organisation mondiale de la santé pour les eaux usées sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 1.1 : Normes de rejets internationales

Caractéristiques	Unité	Normes Utilisées (OMS)
pH	-	6,5-8,5
DBO5	mg/1	< 30
DCO	mg/1	< 90
MES	mg/1	< 20
NH ⁺ ₄	mg/1	< 0,5
NO ₂	mg/1	1
NO ₃	mg/1	< 1
P ₂ O ₅	mg/1	< 2
Température	°C	< 30
Couleur	-	Incolore
Odeur	-	Inodore

1-5-2-Normes Algériennes :

En Algérie, des normes nationales physico-chimiques et bactériologiques ont été établies selon le journal officiel délivré le 05/07/2012 relatives à la réutilisation des eaux usées épurées en irrigation. Ces normes sont récapitulées dans le tableau 1.2 ci-après.

Tableau I.2 : Normes de rejets dans un milieu récepteur
(Journal Officiel de la République Algérienne, 2006.)

Paramètres	Unités	Valeurs limites
Température	°C	30
pH	-	6,5 à 8,5
MES	mg/l	35
DBO5	mg/l	35
DCO	mg/l	120
Azote Kjeldahl	mg/l	30
Phosphates	mg/l	02
Phosphore total	mg/l	10
Cyanures	mg/l	0,1
Aluminium	mg/l	03
Cadmium	mg/l	0,2
Fer	mg/l	03
Manganèse	mg/l	01
Mercure total	mg/l	0,01
Nickel total	mg/l	0,5
Plomb total	mg/l	0,5
Cuivre total	mg/l	0,5

CHAPITRE 2

Généralités sur les pollutions des eaux résiduelles d'industriertextile

Introduction :

Polluer l'eau d'une réserve superficielle ou profonde, c'est modifier ses caractéristiques naturelles (physiques, chimiques et biologiques) par le rejet d'énergie, de substances à l'état dissous et/ou de matières en suspension susceptibles :

- De mettre en danger la santé humaine ;
- De nuire aux ressources vivantes et au système écologique aquatique ;
- De porter atteinte aux agréments ou de gêner d'autres utilisations légitimes de l'eau (par exemple, production d'eau destinée à la consommation humaine, usage industriel, etc.).

Ce chapitre expose tout d'abord les différentes causes et origines de la pollution des eaux résiduaires. Et ensuite présente la pollution due par l'industrie textile surtout les colorants cadre de notre travail.

2-1- Pollution des eaux résiduaires :**2-1-1-Définition :**

Ainsi, l'une des premières définitions, à la fois moderne et scientifique, de la pollution est celle donnée par "The Environmental Pollution Panel Présidents Science Advisory Committee (1965)" :

« La pollution est une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît en totalité ou en partie comme un sous-produit de l'action humaine, au travers d'effets directs ou indirect altérant les critères de répartition des flux de l'énergie, des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes. Ces modifications peuvent affecter l'Homme directement ou au travers des ressources agricoles, en eau ou autres produits biologiques. Elles peuvent aussi l'affecter en altérant les objets physiques qu'il possède, les possibilités récréatives du milieu ou encore en enlaidissant la nature »

Aussi, Ramande (2007) redéfinit :

« Constitue une pollution toute modification anthropogénique d'un écosystème se traduisant par un changement de concentration des constituants chimiques naturels, ou résultant de l'introduction de substances chimiques artificielles ; toute perturbation du flux de l'énergie, de l'intensité des rayonnements, de la circulation de la matière, ou encore toute altération d'une biocénose naturelle provoquée par l'introduction d'espèces exotiques invasives ».

2-1-2-Les différents types de pollution :

L'eau est une ressource indispensable aux activités humaines mais elle constitue également un lieu de vie privilégié. A cause du cycle de l'eau, les écosystèmes aquatiques (les eaux continentales ou océaniques) sont susceptibles d'être contaminés par des pollutions

accidentelles ou chroniques.

En rejetant des effluents contaminés dans le milieu aquatique, les activités humaines industrielles, agricoles ou urbaines polluent les eaux. On peut distinguer trois grandes familles de pollution, la pollution physique, chimique et biologique (Tableau 2.1).

Tableau 2.1 : Principaux types de pollution des eaux continentales, nature de produits polluants et leurs origines (Lévêque, 1996).

Type de pollution	Nature	Source
Physique : Pollution thermique	Rejets d'eau chaude	Centrales thermiques
Pollution radioactive	Radio-isotopes	Installations nucléaires
Pollution mécanique	Matières en suspension	Eaux résiduaires industrielles
Chimique: Fertilisants	Nitrates, phosphates	Agriculture, lessives
Métaux et métalloïdes	Mercure, cadmium, plomb Aluminium, arsenic	Industries, agriculture, pluies acides, combustion
Pesticides	Insecticides, herbicides, fongicides	Agriculture, industries
Organochlorés	PCB, solvants	Industries
Composés organiques de synthèse	Nombreuses molécules	Industries
Détergents	Agents tensio-actifs	Effluents domestiques
Hydrocarbures	Pétrole et dérivés	Industrie pétrolière, transports
Biologique: Matières fermentescibles	Glucides, lipides, protéines	Effluents domestiques, agricoles, agro
	Ammoniac, nitrates	Effluents domestiques, agricoles, agro
Espèces invasives	Espèces végétales, espèces animales, OGM	Jardins botaniques, laboratoires de recherche

2-2- Eaux résiduaires issues de l'industrie du textile :

Parmi les industries consommatrices d'eau en grande quantité, on trouve celle du textile avec celle de la tannerie en tête de la liste. Les secteurs de teintures, de l'impression ou du finissage de textile y occupent une place de choix. Ces activités génèrent une pollution importante en eaux résiduaires.

Les eaux résiduaires de l'industrie de textile présentent généralement des valeurs très élevées

de couleur, de température, de DBO₅, de DCO, de solides en suspension, de toxicité et de conductivité. Leurs caractéristiques peuvent être extrêmement variables en raison du large spectre de colorants, de pigments, de produits auxiliaires et de procédés utilisés (Photos 1.1).

2-3- Les activités de l'industrie textile :

L'industrie textile contient plusieurs activités, ils sont décrits dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Différentes activités d'une entreprise textile et les effluents associés.

Activités	Rejets associés
Préparation des fibres	Rejets liquides fortement chargés en suspension et matières organiques.
Filature	Aucun rejet liquide (exception pour la filature du lin dite mouillée qui permet d'obtenir des fils fins : rejets équivalents à ceux provenant de la préparation de la laine). Rejet gazeux constitués essentiellement de poussières.
Tissage/tricotage	Présence de poussières.Présence d'agents d'encollage. Mais faible consommation en eau, activité considérée comme peu polluante.
Ennoblissem ent : Prétraitement (désencollage, désensimage, débouillissage, mercerisage) Blanchim ent Teinture Impression Apprêts chimiques	Rejets contenant des huiles, des cires, de la soude, des détergents et des produits auxiliaires. Les prétraitements représentent 50% de la pollution organique liée à l'ennoblissement. 7% du volume des effluents liées à l'ennoblissement. Eaux de blanchiment (présence d'organochlorés) 69% du volume des effluents liés à l'ennoblissement. Essentiellement constitués d'eau, de colorants non fixés (colorants utilisés souvent insolubles dans l'eau). 12% du volume des effluents liés à l'ennoblissement. Eaux d'impression : colorants (même type qu'en teinture mais en concentrations plus importantes), liants, adjuvants (fixation des colorants),épaississant (pour éviter le couplage de la couleur). 10% du volume des effluents liés à l'ennoblissement. Eaux de vidange et de nettoyage des machines (produits chimiques). 2% du volume des effluents liés à l'ennoblissement. Rejets gazeux.



Photos 1.1 : Photos des rejets de textile

2-4- Les dangers des rejets textiles :

Les dangers évidents sont :

a) Eutrophisation

Sous l'action des microorganismes, les colorants libèrent des nitrates et des phosphates dans le milieu naturel. Ces ions minéraux introduits en quantité trop importante peuvent devenir toxiques pour la vie piscicole et altérer la production d'eau potable. Leur consommation par les plantes aquatiques accélère leur prolifération anarchique et conduit à l'appauvrissement en oxygène par inhibition de la photosynthèse dans les strates les plus profondes des cours d'eau et des eaux stagnantes.

b) Sous-oxygénation

Lorsque des charges importantes de matière organique sont apportées au milieu via des rejets ponctuels, les processus naturels de régulation ne peuvent plus compenser la consommation bactérienne d'oxygène, une dégradation de 7 à 8 mg de matière organique par des micro-organismes suffit pour consommer l'oxygène contenu dans un litre d'eau.

c) Couleur, turbidité, odeur

L'accumulation des matières organiques dans les cours d'eau induit l'apparition de mauvais goûts, prolifération bactérienne, odeurs pestilentielles et colorations anormales. Une

coloration pouvait être perçue par l'œil humain à partir de 5.10 g/L. En dehors de l'aspect inesthétique, les agents colorants ont la capacité d'interférer avec la transmission de la lumière dans l'eau, bloquant ainsi la photosynthèse des plantes aquatiques.

2-4-1- Les dangers à long terme :

a) La persistance

Les colorants organiques synthétiques sont des composés impossibles à épurer par dégradations biologiques naturelles. Cette persistance est due principalement à leur réactivité chimique :

- Les composés insaturés sont moins persistants que les saturés.
- Les alcanes sont moins persistants que les aromatiques.
- La persistance des aromatiques augmente avec le nombre de substituants.
- Les substituants halogènes augmentent plus la persistance des colorants que les groupements alkyles.

b) Bioaccumulation

Si un organisme ne dispose pas de mécanismes spécifiques, soit pour empêcher la résorption d'une substance, soit pour l'éliminer une fois qu'elle est absorbée, alors cette substance s'accumule. Les espèces qui se trouvent à l'extrémité supérieure de la chaîne alimentaire, y compris l'homme, se retrouvent exposées à des teneurs en substances toxiques pouvant aller jusqu'à cent mille fois plus élevées que les concentrations initiales dans l'eau (illustration du phénomène de bioaccumulation d'insecticides, Figure 2.1).

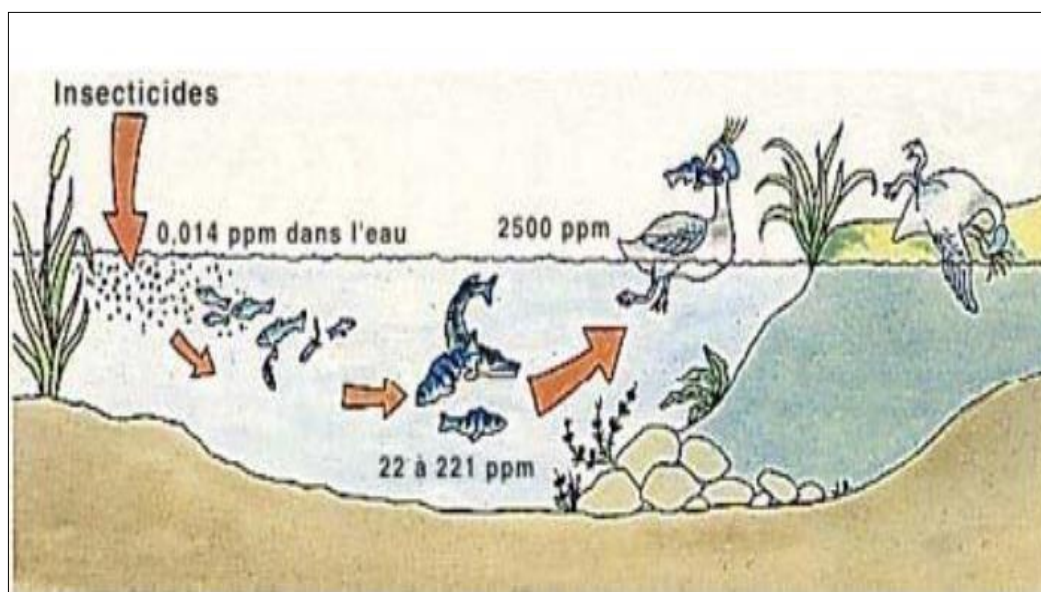


Figure 2.1 : Conséquences de la bioaccumulation après déversement de substances toxiques (insecticides) dans un cours d'eau (Abbas et Messaad, 2017).

c) Cancer :

Si la plupart des colorants ne sont pas toxiques directement, une portion significative de leurs métabolites l'est. Leurs effets mutagènes, tératogènes ou cancérigènes apparaissent après dégradation de la molécule initiale en sous-produits d'oxydation : amine cancérigène pour les azoïques, et leuco-dérivé pour les triphénylméthanés.

d) Sous-produits de chloration (SPD) :

Le chlore utilisé pour éliminer les microorganismes pathogènes réagit avec la matière organique pour former des trihalométhanés (THM) pouvant atteindre plusieurs centaines de mg/L. Les SPD sont responsables de développement de cancer du foie, des poumons, des reins et de la peau chez l'homme.

2-5- Législation sur l'environnement :

La protection de l'environnement est devenue ainsi un enjeu économique et politique majeur. Tous les pays du monde sont concernés par la sauvegarde des ressources en eau douce, soit parce qu'ils manquent d'eau, soit parce qu'ils la polluent. La législation sur les rejets d'eaux résiduaires devient de plus en plus stricte. L'Algérie est dotée d'une réglementation, Loi 06-141, sur les rejets d'effluents textiles dans le milieu hydrique. Le tableau 2.3 précise les limites réglementaires de ces rejets.

Mais malheureusement dans les pays africains et notamment en Algérie, les conventions qui nous permettent de définir les responsabilités de chacune des parties mise en cause lors du rejet restent une culture très loin à l'application en réalité.

Tableau 2.3 : Valeurs limites des paramètres de rejets d'effluents textiles.

Paramètres	Unité	Valeurs limites	Tolérance aux valeurs limites anciennes installations
Température	°C	30	35
pH	-	6.5 – 8.5	6 - 9
DBO5	mg/L	150	200
DCO	-	250	300
Matières décantables	-	0.4	0.5
Matières non dissoutes	-	30	40
Oxydabilité	-	100	120
permanganate	-	20	25

2-6- Les colorants de l'industrie textile :

Les colorants sont des substances responsables de la couleur, ce sont des composés chimiques colorés, naturels ou synthétiques, en général organiques ou organométalliques, qui ont la propriété de colorer durablement le support sur lequel ils sont appliqués dans certaines conditions. La première matière colorante synthétique fut découverte par William Henry Perkin en 1856 est la mauvéine. Les colorants synthétiques représentent aujourd'hui un groupe relativement large de composés chimiques organiques rencontrés dans de nombreux domaines de notre vie, ils jouent un rôle majeur dans la peinture, la teinture, la photographie, les cosmétiques, les feux d'artifice, l'imprimerie, l'agro-alimentation etc... la production mondiale est estimée à 800 000 t/an, dont environ 140 000 sont rejetées dans les effluents au cours des différentes étapes d'utilisation.

Les matières colorantes se divisent en deux grands groupes définis par la norme DIN 55944 (Nov. 1973. Matières colorantes ; classification)

- **Colorant** : matière colorante soluble dans les solvants et les substrats.
- **Pigment** : matière colorante insoluble dans les solvants et les substrats.

Un colorant doit posséder, outre sa couleur propre, la propriété de teindre. Cette propriété résultant d'une affinité particulière entre le colorant et la fibre est à l'origine des principales difficultés rencontrées lors des procédés de teinture. En effet, selon le type d'application et d'utilisation, les colorants synthétiques doivent répondre à un certain nombre de critères afin de prolonger la durée de vie des produits textiles sur lesquels ils sont appliqués : résistance à l'abrasion, stabilité photolytique des couleurs, résistance à l'oxydation chimique (notamment les détergents) et aux attaques microbiennes.

Les matières colorantes se caractérisent par leur capacité à absorber les rayonnements lumineux dans le spectre visible (de 380 à 750 nm). La transformation de la lumière blanche en lumière colorée par réflexion sur un corps ou par transmission ou diffusion, résulte de l'absorption sélective d'énergie par certains groupes d'atomes appelés chromophore, la molécule colorante étant le chromogène. Plus la facilité du groupe chromophore à donner un électron est grande plus la couleur sera intense (groupes chromophores classée par intensité décroissante dans le tableau 2.4). Les chromophores sont des groupes aromatiques, conjugués, comportant des électrons ou des complexes de métaux de transition. D'autres groupes d'atomes du chromogène peuvent intensifier ou changer la couleur due au chromophore : ce sont les groupes auxochromes.

Tableau 2.4 : Principaux groupes chromophores et auxochromes

Groupements chromophores	Groupements auxochromes
Azo (-N=N-)	Amino (-NH ₂)
Nitroso (-NO ou -N-OH)	Méthylamino (-NHCH ₃)
Carbonyl (=C=O)	Diméthylamino (-N(CH ₃) ₂)
Vinyl (-C=C-)	Hydroxyl (-HO)
Nitro (-NO ₂ ou =NO-OH)	Alkoxy (-OR)
Sulphure (> C=S)	Groupements donneurs d'électrons

De manière générale, les colorants consistent en un assemblage de groupes chromophores, auxochromes et de structures aromatiques conjuguées (cycles benzéniques, anthracène, perylène, etc.). Lorsque le nombre de noyau aromatique augmente, la conjugaison des doubles liaisons s'accroît et le système conjugué s'élargit. L'énergie des liaisons diminue tandis que l'activité des électrons augmente et produit un déplacement vers les grandes longueurs d'onde (effet bathochrome). De même, lorsqu'un groupe auxochromes donneur d'électrons (amino, hydroxy, alkoxy,...) est placé sur un système aromatique conjugué, ce groupe se joint à la conjugaison du système, la molécule absorbe dans les grandes longueurs d'onde et donne des couleurs plus foncées .

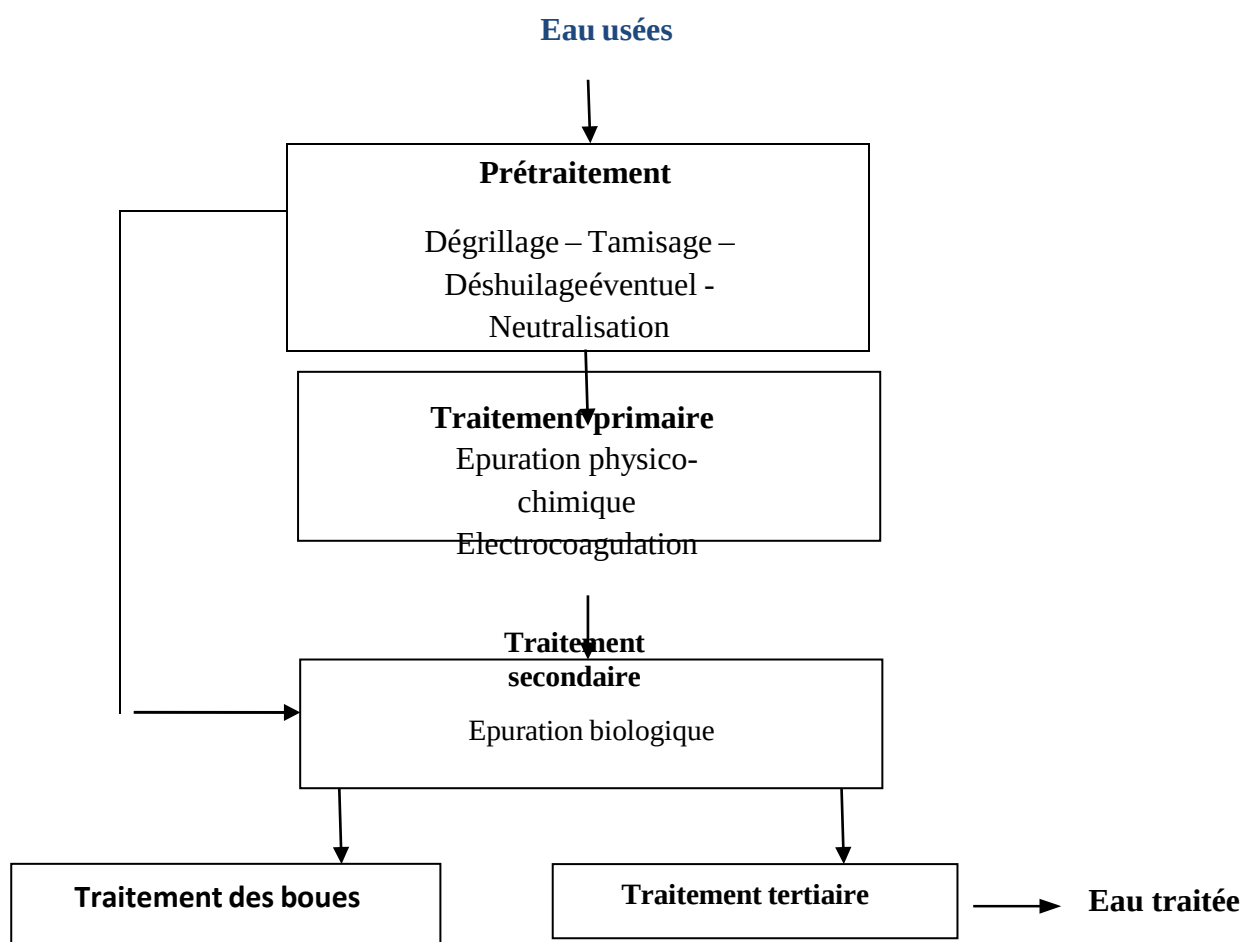
2-7- Traitement d'effluent des colorants :

Au cours de différentes étapes de teinture, des quantités plus ou moins importantes de colorants sont perdues par manque d'affinité avec les surfaces à teindre ou à colorer, comme nous avons pu le voir auparavant, ces rejets organiques sont toxiques et nécessitent une technique de dépollution adaptée (Tableau 2.5).

Tableau 2.5 : Taux de fixation sur textile pour les différentes classes de colorants.

Classe de colorant	Fixation (%)	Fibres Utilisées
Acide	80 - 93	Laine, nylon
Azoïque	90 – 95	Cellulose
Basique	97 – 98	Acrylique
De cuve	80 – 95	Cellulose
Direct	70 – 93	Cellulose
dispersé	80 – 92	Synthétique
Réactif	50 – 80	Cellulose
Soufré	60 – 70	Cellulose

Le traitement des rejets textiles, compte tenu de leur hétérogénéité de composition, conduira toujours à la composition d'une chaîne de traitement assurant l'élimination des différents polluants par étapes successives. La première étape consiste à éliminer la pollution insoluble par l'intermédiaire de prétraitements (dégrillage, dessablage, déshuilage...) et/ou de traitements physiques ou physico-chimiques assurant une séparation solide/liquide.

**Figure 2.2 :** Schéma du procédé de traitement classique d'un rejet textile.

2-7-1- Méthode biologique :

La présence dans les eaux ou dans le sol de polluants organiques a toujours existé. Leur élimination par des microorganismes constitue le moyen biologique que la nature a utilisé pour l'épuration des milieux naturels. Ces procédés biologiques se produisent selon deux modes : par traitements aérobies qui sont effectués en présence d'oxygène, et par traitements anaérobies, et dans ce cas les microorganismes dégradant la matière organique en absence d'oxygène.

2-7-1-1-Traitement aérobie :

Des réacteurs dits à lits bactériens sont utilisés pour cet effet. Ils sont constitués d'une unité de boues activée où les polluants sont décomposés par les bactéries aérobies et autres microorganismes. Après épuration, la boue est séparée des eaux usées par sédimentation dans un décanteur. Une partie est recyclée et le surplus est évacué après pressage ou centrifugation. Ce procédé est resté longtemps un moyen pour dégrader un grand nombre de polluants organiques. Il s'est avéré efficace pour une certaine catégorie de rejets textiles. Notons cependant que des colorants tels que les azoïques, les colorants acides et les colorants réactifs, se sont révélés et persistants et résistants à ce mode de traitement. La décoloration observée dans ces cas, n'est attribuée qu'à l'adsorption de ces polluants sur la boue activée et non à leur dégradation.

2-7-1-2-Traitement anaérobie :

En absence d'oxygène, la digestion anaérobie des composés organiques conduit à la formation du dioxyde de carbone, du méthane et de l'eau. Ce procédé présente une efficacité importante dans le traitement des effluents très chargés caractérisés par une DCO relativement élevée. Ce procédé utilisé dans les stations d'épurations des eaux, permet de produire des quantités importantes en méthane. Ce dernier est utilisé comme source d'énergie notamment pour le chauffage ou pour l'éclairage. Des études ont montré que la réduction, voire la disparition de la couleur, n'est pas accompagnée de la minéralisation des divers colorants. La formation de composés intermédiaires plus toxiques, notamment, les amines a été signalées dans la littérature ont estimé la réduction de la couleur par les procédés biologiques à seulement 10-20 %. Cette constatation laisse à présager d'autres techniques qui permettraient d'abaisser le degré de rétractabilité de la charge polluante en association avec les méthodes biologiques.

2-7-2- Méthodes physiques :**2-7-2-1- Adsorption sur charbon actif :**

Lors de l'adsorption, le polluant est transféré de la phase liquide vers la phase solide. Le charbon actif est le plus couramment utilisé en adsorption des molécules colorantes, toutefois un grand nombre d'autres matériaux peuvent être employés, mais cette technique n'est efficace que sur certaines catégories de colorants (cationique, à mordant, dispersés, de cuve et réactifs), pour un type donné de carbone, dans une certaine gamme de pH et pour une concentration en impuretés relativement constante afin de prévenir un relargage dans l'effluent. De plus le charbon actif pose des problèmes d'élimination après usage et de saturation rapide ce qui demande des étapes de régénération très coûteuses en énergie.

2-7-2-2- Filtration sur membrane :

La filtration sur membrane est une technique qui utilise une barrière physique, c'est à dire une membrane poreuse ou un filtre, pour séparer des particules dans un liquide. Les particules sont séparées selon leur taille et leur forme sous l'effet de la pression à travers des membranes munies de pores de différentes tailles. Bien qu'il existe différentes méthodes de filtration sur membrane (osmose inverse, nanofiltration, ultrafiltration et microfiltration, de manière à accroître la taille des pores), Parmi les quatre types de procédés, la nanofiltration et l'osmose inverse sont les plus adaptés à la réduction partielle de la couleur et des petites molécules organiques, mais l'osmose inverse reste la plus répandue. La nanofiltration s'applique surtout au traitement des bains de teinture de colorants réactifs en agissant comme un filtre moléculaire, tandis que la microfiltration retient les matériaux colloïdaux tels que les colorants dispersés ou de cuve grâce à une "membrane écran". L'ultrafiltration ne s'applique qu'à la réduction de la DCO et des solides en suspension, et ne se montre réellement efficace qu'en combinaison avec la coagulation/floculation. En effet, ces procédés restent très limités dans leurs applications car ils nécessitant des investissements importants à cause en grande partie du prix des matériaux utilisés et leur mise en œuvre.

2-7-3-Méthodes physico-chimiques :**2-7-3-1- Coagulation - floculation**

La coagulation – floculation (CF) est souvent appliquée pour le traitement des eaux usées de l'industrie de textile pour enlever davantage la demande chimique en oxygène et la couleur avant d'un traitement biologique. Elle peut aussi être utilisée comme procédé principal de traitement. Ce procédé est basé sur l'addition d'un coagulant qui va former des floccs avec les polluants organiques où ces floccs sont ensuite éliminés par décantation et filtration.

Les coagulants inorganiques tels que l'alun (sulfate d'aluminium), donnent les résultats les plus satisfaisants pour la décoloration des effluents textiles contenant des colorants dispersés, de cuve et au soufre mais sont totalement inefficaces pour les colorants réactifs, azoïques, acides et basiques. Par ailleurs, la coagulation/floculation ne peut être utilisée pour les colorants fortement solubles dans l'eau. D'importantes quantités de boue sont formées avec ce procédé : leur régénération ou réutilisation reste la seule issue mais demande des investissements supplémentaires.

2-7-4- Méthode chimique :

Dans la littérature, les techniques d'oxydation chimiques sont généralement appliquées pour :

- Le traitement des polluants organiques dangereux présents en faibles concentrations.
- En prétraitement avant les procédés biologiques pour diminuer la charge polluante.
- Le traitement des eaux usées chargées de constituants résistants aux méthodes de biodégradation.
- En post-traitement pour réduire la toxicité aquatique.

Les deux réactifs les plus souvent cités pour ce type de traitement sont l'eau oxygénée H_2O_2 et le chlore. Le peroxyde d'hydrogène est un oxydant fort et son application pour le traitement des polluants organiques et inorganiques est bien établie. Mais l'oxydation seule par H_2O_2 n'est pas suffisamment efficace pour de fortes concentrations en colorant. Ont proposé de traiter les colorants azoïques par l'hypochlorure de sodium. Cependant, si la molécule initiale est détruite, les halogènes sont susceptibles de former des trihalométhanes comme sous-produits de dégradation lesquels sont cancérogènes pour l'homme (tableau 2.6).

Tableau 2.6 : Traitements possibles pour les rejets textiles et leurs avantages et inconvénients associés.

Processus	Avantages	Inconvénients	Références
Biodégradation	Taux d'élimination par des substances oxydables environ 90%	Faible biodégradabilité des colorants	Pala and Tokat, 2002; Ledakowicz et al., 2001.
Coagulation-floculation	Élimination des colorants Insoluble	Production de boue bloque les filtres	Gaehr et al., 1994.
Adsorption sur charbon actif	Les solides suspendus et les substances organiques sont bien réduits	Coût du charbon actif	Arslan et al., 2000.
Traitement de l'ozone	Bonne décoloration	Pas de réduction de la DCO	Adams et al., 1995; Scott and Ollis, 1995.
Processus électrochimiques	Capacité d'adaptation aux différents volumes et charges Polluantes	Boues d'hydroxyde de fer	Lin and Peng, 1994; Lin and Chen, 1997.
Osmose inverse	Enlèvement de tous les sels minéraux, hydrolyse les colorants réactifs et les auxiliaires chimiques	Haute pression	Ghayeni et al., 1998.
Nanofiltration	Séparation des composés organiques des ions divalents de faible poids moléculaire et des sels monovalents.		Erswell et al., 1998; Xu et al., 1999; Akbari et al., 2002; Tang and Chen, 2002.

Ultrafiltration- microfiltration	Basse pression	Qualité insuffisante des eaux usées traitées	Watters et al., 1991; Rott and Mike, 1999; Ciardelli and Ranieri, 2001; Ghayeni et al., 1998.
---	----------------	---	---

CHAPITRE 3

Traitement des eaux résiduaire par le procédé d'électrocoagulation

Introduction :

Quand on veut parler sur le traitement des eaux résiduaires cela veut dire qu'il y a des technique et des méthodes pour cette opération, donc on se trouve le traitement biologique, filtration membrane et la procédé coagulation floculation qui se présente comme l'une des techniques efficaces pour l'élimination, mais elle nécessite l'ajout de produits chimiques, la méthode chimique contribue à la pollution de l'environnement les traitements électrochimiques sont de plus en plus développés dans le domaine des technologies environnementales. Ils sont reconnus pour leur efficacité de traitement et d'assainissement des eaux. Et Parmi les techniques électrolytiques on déclare le procédé qui se nomme par électrocoagulation (EC) et qui se caractérise par un aspect non polluant et une facilité d'automatisation et constituer l'une des méthodes visant à réduire l'emploi de réactifs. C'est ainsi que l'EC est utilisé dans l'élimination des matières organiques comme minérales, les métaux lourds, les hydrocarbures...etc. Globalement ce procédé a été utilisé pour les eaux souterraines et les eaux de surface dans diverses situations, et il a été appliqué à divers problèmes de traitement des eaux (Emamjomeh et Sivakumar, 2009).

De ce fait, l'objectif global de notre chapitre est de présenter le procédé de l'électrocoagulation avec quelques détails qui consacrent ce procédé.

3-1- Le procédé d'électrocoagulation (EC) :**3-1-1- Historique du procédé :**

L'électrocoagulation (EC) est une technique de traitement développée avant le 20^{ème} siècle.

Un pilote a été construit à Londres en 1889 pour traiter de l'eau de mer par électrolyse.

Une demande de licence a été déposée par A.E. Dietrich en 1906 pour le traitement des eaux résiduaires de manufactures.

En 1909, J.T. Harries (cité par Debillemont, 1996) reçut une licence des USA pour le traitement des eaux usées par des électrodes de fer et d'aluminium.

En 1940, Matteson et al (cité par Moreno *et al.* 2007a) décrivait un « coagulateur électronique » qui consistait à faire dissoudre une anode en aluminium pour ensuite former avec les hydroxydes produits à la cathode, des hydroxydes d'aluminium qui floculent et coagulent en entraînant les matières en suspensions et purifient l'eau.

Un procédé similaire a été développé en Grande Bretagne pour traiter les eaux de rivière par des électrodes de fer.

L'EC a été utilisée pendant toutes ces années sans véritablement connaître un succès et sans qu'elle ne soit acceptée par les populations et les industriels. Cependant, ces dernières années,

on constate un regain d'intérêt, et son utilisation s'est accrue et bon nombre d'industriels font appel à elle pour le traitement de leur effluent. La technologie a été optimisée pour minimiser la consommation énergétique et pour augmenter l'efficacité du traitement. Son efficacité a été démontrée sur divers polluants. Il est efficace dans le traitement des métaux lourds tels que Pb, Cd, Cr et As ; les métaux tels que Mn, Cu, Zn, Ni, Al, Fe, Sn, Mg, Se, Mo, Ca et Pt ; également des anions tels que CN^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NO_3^- , F^- et Cl^- ; les non métaux tels que le phosphore et des composés organiques, Hydrocarbures Totales de Pétrole (TPH), Toluène, Benzène et Xylène (TBX), Méthyle tert-butyl ether (MTBE), DBO, MES, Minéraux, colorants organiques, huiles et graisses tous des effluents industriels variés (Moreno *et al.* 2007a).

3-1-2- Définition du procédé (EC) :

L'électrocoagulation est une technique dérivée de la coagulation classique. Elle permet d'éliminer les particules colloïdales et la pollution dissoute grâce à la production in situ de floccs d'hydroxydes obtenus par dissolution anodique d'électrodes solubles (Fe, Al) . Les floccs d'hydroxydes générés par voie électrochimique sont plus compacts que ceux obtenus par la méthode chimique. En outre, l'électrocoagulation requiert moins de réactifs et permet de réduire le volume de boues générées comparativement à la coagulation chimique qui nécessite des concentrations élevées de réactifs, entraînant ainsi une augmentation considérable du volume des boues.

3-1-3- Théorie de l'électrocoagulation :

L'EC est un procédé complexe impliquant plusieurs phénomènes physiques et chimiques qui utilisent des électrodes consommables (sacrificielles) pour fournir des ions dans l'effluent d'eau. Trois étapes successives principales y sont impliquées :

- ✓ Formation de coagulant par oxydation électrolytique de l'anode sacrificielle.
- ✓ Destabilisation des contaminants, suspensions particulaires et rupture des émulsions.
- ✓ Agrégation des phases destabilisées formant des floccs.

Les mécanismes des étapes précédentes se font comme suit :

- ✓ Compression de la couche diffuse autour des espèces chargées par les interactions avec les ions générés par l'oxydation de l'anode sacrificielle.
- ✓ Neutralisation de la charge des espèces présentes dans le rejet aqueux au contact des ions produits par dissolution électrochimique de l'anode sacrificielle. Ces derniers réduisent la répulsion électrostatique entre les particules jusqu'à ce que les forces d'attraction de Van Der Waals prédominent causant leur coagulation.

- ✓ Formation de floccs suite à la coagulation qui créent des boues qui piègent et relient les particules colloïdales restantes dans le milieu aqueux.

L'EC se distingue de la coagulation chimique par, sa versatilité épuratoire, son faible cout, sa facilité d'automatisation et sa compatibilité environnementale. Plein d'autres avantages sont à retenir tels que : la rapidité de réaction, la compacité des équipements, la simplicité d'opération et d'entretien d'une cellule d'EC et une siccité plus grande de boues produites.

En plus avec l'EC, on peut se passer de plusieurs étapes dans une installation de traitement des eaux .

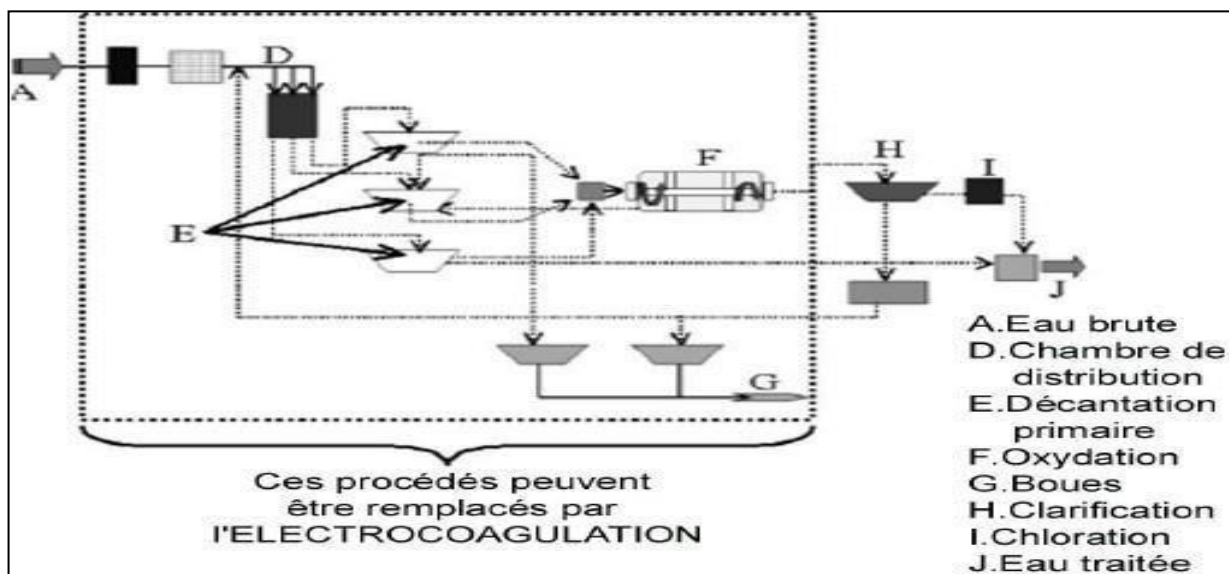


Figure- 3.1 : Représentation schématique d'une installation typique de traitement des eaux, etles procédés complexes qui peuvent être remplacés par l'électrocoagulation.

L'importance de l'EC s'est accrue du fait de son efficacité généralement supérieure aux autres techniques, pour éliminer les différentes formes de pollution, répertoriées par les indicateurs suivants :

- **DCO** : Demande chimique en oxygène,
- **DBO₅** : Demande biochimique en oxygène,
- **COT** : Carbone organique total,
- **MES** : Matières en suspensions,
- **TDS** : Taux de solides dissous,
- **TAC** : Taux alcalimétrique complet,
- **ABS** : Coloration liée à l'absorbance de l'effluent,
- Les métaux lourds.

3-1-4-Principe d'électrocoagulation (EC) :

Le procédé d'électrocoagulation (EC) est issu du procédé de coagulation chimique qui utilise des réactifs chimiques pour la coagulation des colloïdes présents dans les eaux. Pendant l'EC, les agents coagulants (Fe^{2+} et Al^{3+}) sont générés in situ de façon électrochimique en appliquant un courant électrique sur une anode sacrificielle en fer ou en aluminium. La figure 3.2 présente le principe du procédé avec des électrodes d'aluminium.

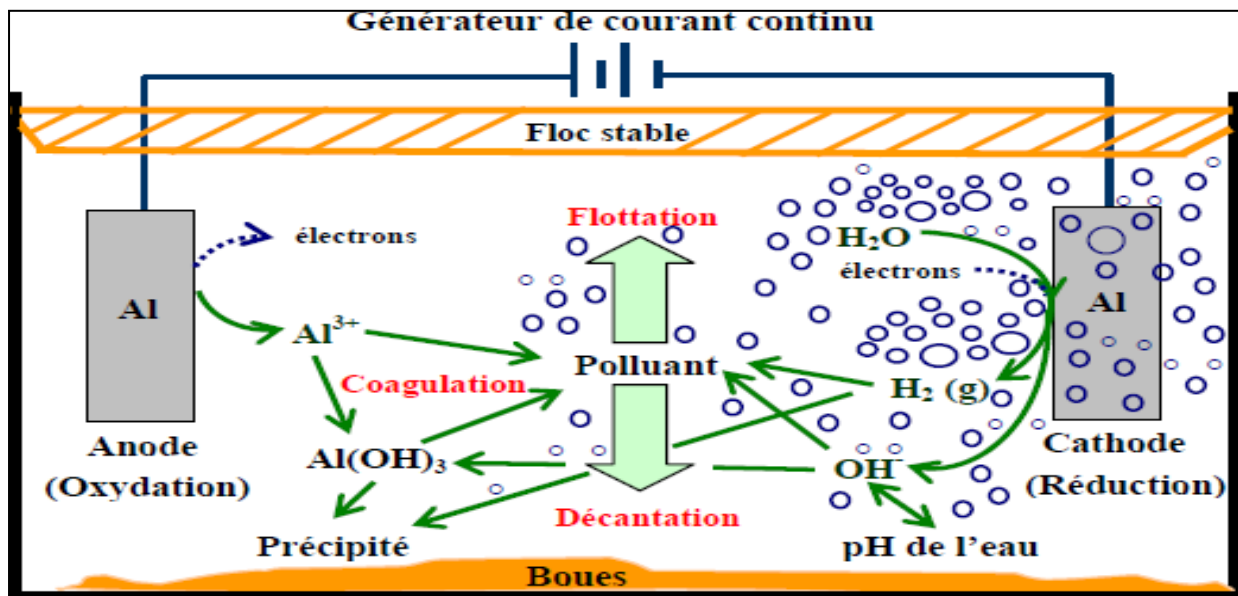


Figure 3.2 : Schéma du principe de l'électrocoagulation.

Le pH de la suspension à traiter doit être neutralisé entre 6 et 8 de manière à favoriser la formation d'hydroxydes métalliques. Les floccs d'hydroxydes métalliques-colloïdes obtenus sont ensuite séparés du liquide purifié par électroflottation (EF) ou sédimentation. L'EF est la conséquence de l'ascension des bulles de gaz qui entraînent les floccs par flottation. En effet, l'électrolyse de l'eau génère des microbulles d'hydrogène à la cathode et dans une moindre part d'oxygène à l'anode. Leur densité et leur géométrie est un facteur important. De manière générale, plus le rapport surface/volume des floccs est grand, plus ils pourront fixer les microbulles (tableau 3.1).

L'EC est une technique qui inclut des phénomènes physiques et chimiques et produit in-situ des ions coagulants. En effet, au cours d'un processus d'EC, trois principales étapes successives peuvent se produire :

- 1- La formation des coagulants par une dissolution électrochimique de l'électrode.
- 2- La déstabilisation des contaminants et des particules en suspension.
- 3- L'agrégation de la phase déstabilisée et la formation de floccs.

Tableau 3.1 : Exemples d'applications du procédé d'électrocoagulation.

Effluents traités	Efficacité	Référence
Eaux riches en substances humiques.	Decoloration de l'ordre de 95%.	Vik et al (1984).
Eaux résiduaires urbaines.	Abattement de la turbidité de 89%, et de MES 60%.	Pouct et al (1992).
Suspension de kaolite et de tonite.	Abattement de la turbidité entre 20 et 60%.	Szynkarezuk et al (1994).
Huiles minérales	Abattement de DCO $\geq 80\%$.	Tanguy et al (2001).
Lixiviat	Abattement de DCO $\geq 80\%$.	Tanguy et al (2001).
Eaux encrées	Decoloration de l'ordre de 40%.	Tanguy et al (2001).
Bain photographique	Abattement de la DCO $\geq 80\%$ et coloration 30%.	Tanguy et al (2001).
Eaux phénolées	Abattement de DCO et COT $\geq 30\%$	Tanguy et al (2001).
Effluents Cosmétiques	Abattement de DCO $\geq 40\%$.	Tanguy et al (2001).
Effluents Pharmaceutiques	Abattement de DCO, COT, MES $\geq 80\%$.	Tanguy et al (2001).
Eaux colorées et eaux de rivière.	Efficacité de l'ordre de 90% pour la décoloration.	Jiang et al (2002).
Effluent réel réactif de bain.	Décoloration de 20 à 100% et un DCO $> 75\%$.	Arslan-Alaton et al (2008)
Traitement de solution contenant des ions indium	Rendement d'élimination 78%	Chou et al (2009).

3-1-5- Les différents matériaux utilisés pour les électrodes :

Les électrodes les plus couramment utilisées sont celles en fer et en aluminium. Cependant des essais ont été conduits sur d'autres types d'électrode. Le tableau suivant illustre quelques couples d'anode/cathode qui sont utilisés en électrocoagulation.

Tableau 3.2 : Matériaux d'électrodes utilisés en EC :

Electrodes Utilisées	Referenc es
Anode en plomb et cathode en acier inox	Vik et al. (1984)
Titane /Platine et Ti/Pt/Ir	Garrote et al. (1995)
Al et Mn	EDF GDF Services et partenaires (1995)
Fe/Fe	Ibanez et al. (1995), Ögütveren and Koparal (1997), Ibanez et al. (1998), Hansen et al. (2006), Lai et al. (2006), Mrozowski et al. (1983), Golder et al. (2005), Wilcock et al. (1996), Christoskova et al. (1988), Do et Chen (1994), Zaroual et al. (2006), Golder et Samanta (2006), Meneses et al. (2005), Ün et al. (2006), Daneshvar et al. (2006).
Fe/Al ou Al/Fe	Gao et al. (2005), Mollah et al. (2004), Holger (1995), Damien et al. (1992), Mrozowski et Zielinski (1983), Kobya et al. (2006), Can et al. (2006).
Ti/acier	Jordao et al. (1997).
Comparaison Al et Fe	Golder et al. (2006), Kobya et al.(2006).
Al/Al	Murell, Wilfried Anthony (1987), Donini et al. (1994), Groterud et Smoczynski (1992), Biotys (1995), Lu et al. (1999), Rubach et Saur (Octobre 1997), Michel (1996), Khemis et al. (2006), Kobya et al. (2006), Ögütveren et Koparal (1997), Lai et Lin (2006), Mrozowski et Zielinski (1983), Do et Chen (1994).
Al/Cu et Fe/Cu	Tsai et al. (1997)
Al/Sn	Kliskic et al. (1998).
Zn/Ni	Rojev et Gudin (1996)

3-2- Réactions aux électrodes :

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

- A l'anode : le métal est oxydé suivant la réaction :



M : Matériel de l'anode

n : Nombre d'électrons mis en jeu

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



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



Ces hydroxydes de métal sont insolubles et jouent le rôle de coagulant et réagissent avec les matières en suspension et/ou les colloïdes, d'où élimination des polluants.

Généralement, pour la dépollution des eaux usées, on utilise des électrodes en aluminium ou en fer.

3-2-1- Cas d'électrodes en aluminium :

L'oxydation de l'aluminium à l'anode donne tout d'abord des ions Al^{3+} lesquels ensuite forment des hydroxydes d'aluminium $Al(OH)_3$

La formation du coagulant $Al(OH)_3$ passe par la formation et la transformation de diverses espèces monomériques, telles que $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)^+$, $Al(OH)^-$ et polymériques. Les cations issus de l'anode réagissent systématiquement avec l'eau pour donner des complexes hydroxylés polymérisés solubles suivant le pH du milieu ces espèces jouent le rôle de coagulant permettant tout d'abord la déstabilisation des particules colloïdales à éliminer par compression de la double couche électrochimique, puis la floculation ou l'agrégation de celles-ci en floccs, on parle dans ce cas d'électrocoagulation. Les floccs formés pourront être ainsi transportés par le gaz lors de l'électrolyse par électro flottation. Si l'électrolyse se poursuit vers des pH basiques, les floccs pourront s'absorber sur les hydroxydes formés par précipitation des polymères hydroxylés solubles, on parlera alors d'électro précipitation.

3-3- Principale loi de l'électrolyse :**→ Loi de FARADAY :**

Si l'on considère que les seules réactions chimiques qui se déroulent dans le réacteur

d'électrocoagulation sont :

- **À l'anode** : Oxydation du métal.
- **À la cathode** : Réduction de l'eau.

Il sera donc possible de déterminer la masse du métal **m** dissoute et l'hydrogène formé pendant une durée **t** de l'électrolyse à un courant **i**, en utilisant la loi de Faraday.

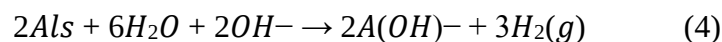
$$m = I \cdot t \cdot M / n \cdot F$$

Avec :

- m : Masse du métal dissous ou du gaz formé
- I : Intensité du courant imposé (A).
- t : Durée de l'électrolyse (s).
- M : Poids moléculaire de l'espèce considérée (g/mol).
- F : Constante de Faraday (96487 C.mol⁻¹).
- n : Nombre d'électrons mis en jeu dans la réaction considérée.

Toutefois, lorsqu'il s'agit d'utiliser des électrodes d'aluminium, la quantité d'aluminium mise en solution par électro-dissolution semble supérieure à celle estimée à l'aide de la loi de Faraday. Des rendements sont de 10 à 20 % supérieurs aux calculs théoriques. Certains chercheurs ont établi que les électrodes d'aluminium sont attaquées par les ions hydroxydes produits par réduction, ce qui contribue à leur piquuration de l'aluminium et sa mise en solution dans le milieu aqueux.

Cette corrosion chimique prend la forme suivante :



Le mécanisme de corrosion par piquure d'un alliage d'aluminium est parfaitement illustré dans la figure 3.3 qui suit :

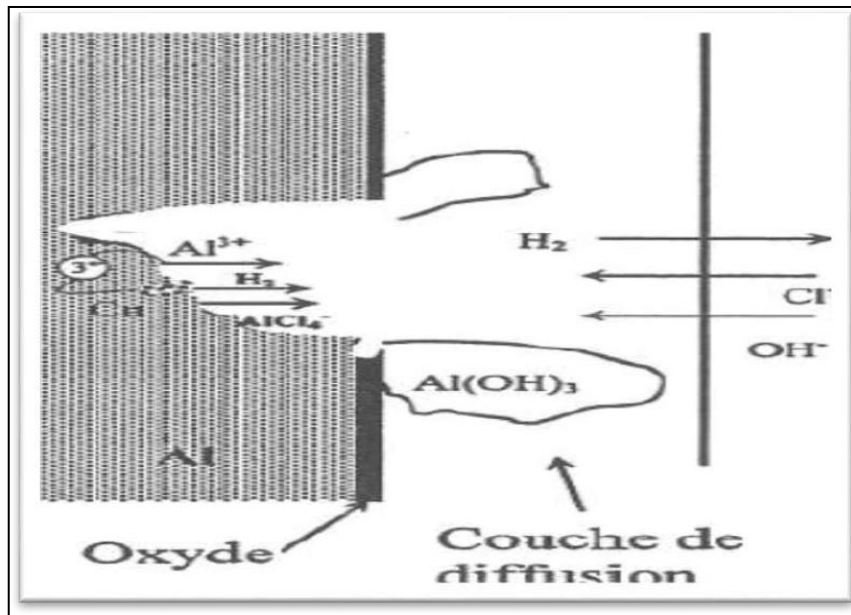


Figure 3.3 : Mécanisme de corrosion par les ions chlorures et hydroxydes par piqure sur un allié d'aluminium.

3-4- Paramètres influençant l'EC :

3-4-1- Le pH :

Le pH est un facteur important influençant la performance du processus d'électrocoagulation, Le pH de la solution détermine la spécification des ions métalliques. Le pH influence l'état des espèces en solution et la solubilité des produits formés. Ainsi le pH de la solution affecte le rendement global et l'efficacité de l'électrocoagulation. Le pH de la solution peut être aisément change. Un pH optimal semble exister pour un polluant donné [Ularbi et Maharzi, 2016], les zones de prédominance des hydroxydes d'aluminium sont présentées dans figure 3.4.

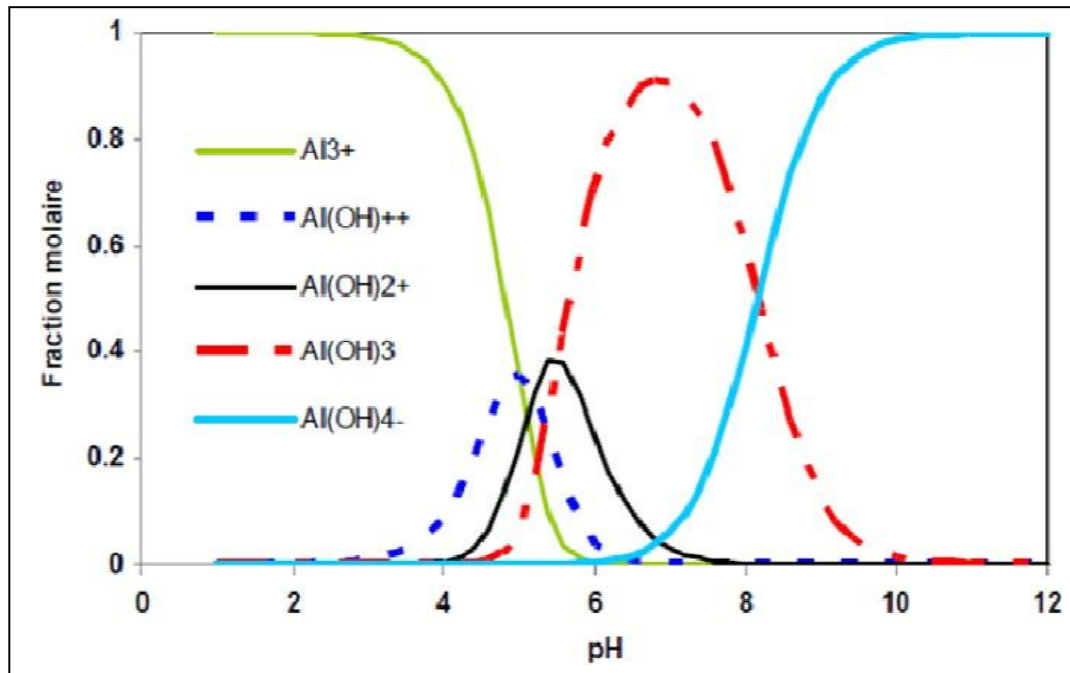


Figure 3.4 : Diagramme de prédominance des espèces aluminium en fonction du pH.

- A $\text{pH} < 3$, l'aluminium est principalement sous la forme trivalente Al^{3+} , cette forme de monomère devient négligeable en milieu moins acide ($\text{pH} > 6$).
- La forme ionique $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ apparaît vers des pH de l'ordre de 3 pour atteindre un maximum de concentration (20% de l'aluminium présent) vers un $\text{pH} = 5$.
- Dans la zone de pH compris entre 5 et 8, l'espèce la plus répandue en solution est l'hydroxyde d'aluminium $\text{Al}(\text{OH})_3$ avec un maximum de 95% vers $\text{pH} = 6.5$.

La solubilité de l'aluminium trivalent est quasiment nulle dans une gamme de pH entre 5 et 8, cependant sa réaction avec les OH^- en solution, permet la formation de composés solubles tel que les cations. il existe également les cations $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ et $\text{Al}(\text{OH})_2^+$.

- L'ion $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ commence à se former vers un $\text{pH} = 6$ et atteint son maximum de 90% de l'aluminium présent dans la solution vers un pH de 9.5, le reste de l'aluminium étant sous la forme d'hydroxyde d'aluminium $\text{Al}(\text{OH})_3$ et de $\text{Al}(\text{OH})_5^{2-}$.

- En milieu alcalin ($\text{pH} > 11$), on trouve deux complexe anioniques $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ et $\text{Al}(\text{OH})_5^{2-}$ qui deviennent majoritaires à $\text{pH} > 12$ (Aidaoui D et Kouadri A, 2018).

3-4-2- La conductivité :

La conductivité de l'électrolyte a aussi un impact sur le procédé d'EC ; si elle est trop faible, la résistance de l'eau au passage de courant est forte, la consommation énergétique est très importante ; et sa température peut alors fortement augmenter. Pour ces différentes raisons, par analogie avec les exploitations d'installation d'électrocoagulation d'effluents industriels, l'ajout de chlorure de sodium est utilisé pour accroître la conductivité de la solution. L'ajout d'ions chlorure permet aussi d'éviter la passivation des électrodes. Le problème de conductivité constitue un inconvénient majeur au fonctionnement d'un procédé d'électrocoagulation (Aidaoui D et Kouadri A, 2018).

3-4-3- L'intensité du courant :

L'intensité du courant imposée au système est un paramètre déterminant de l'efficacité de la technique à éliminer les polluants des eaux usées. En effet, cette intensité de courant appliquée permet d'une part, de contrôler la cinétique électrochimique de dissolution des électrodes anodiques et, d'autre part, de contrôler le dégagement de bulles d'hydrogène sur la cathode. L'intensité de courant appliquée dans un système d'EC détermine la quantité des ions Al_3^+ libérée des électrodes.

L'application d'un courant de faible intensité entraîne la production d'une faible quantité d'ions hydroxyde et le dégagement d'une faible quantité d'ions hydrogène au niveau de la cathode. Par contre, un courant plus élevé provoque une augmentation de la vitesse de la réaction d'où une consommation rapide des électrodes et une dépense énergétique plus importante (Ularbi et Maharzi, 2016).

3-4-4- La distance entre électrodes :

La distance inter-électrode peut également influencer la qualité du traitement. Cette distance peut varier selon le type d'eau à traiter et surtout selon sa conductivité. De plus, la distance entre les électrodes doit également tenir compte de l'encrassement possible et de la facilité à nettoyer le système. Ce facteur est important lors de la mise à l'échelle industrielle d'une unité de traitement par électrocoagulation.

La chute ohmique (liée à la résistance électrique) dans la solution électrolytique est directement liée à la distance qui sépare les électrodes et à la conductivité de la solution. Elle est en grande partie responsable de la baisse de rendement énergétique des procédés électrolytiques. Il est possible de la diminuer en augmentant la concentration en électrolyte ou en rapprochant les électrodes (Aidaoui D et Kouadri A, 2018).

➔ Autres facteurs influençant l'électrocoagulation :

Plusieurs autres facteurs peuvent influencer la qualité du traitement des eaux par électrocoagulation. Le premier est naturellement la composition chimique de l'effluent à traiter. En effet, les différents composés organiques ne réagissent pas tous de la même façon au passage du courant et peuvent entraîner de grandes variations dans les résultats obtenus. Le meilleur exemple est celui des composés chimiques de type phénolique dont l'élimination dépend de l'emplacement des groupements phénoliques sur la molécule de base. Cette même observation peut se faire concernant d'autres composés, huiles ou pigments et ce phénomène doit être pris en compte dans l'analyse des résultats obtenus (Alem, 2016).

3-5- Avantages et inconvénients de l'électrocoagulation :

Le procédé d'EC présente aussi bien des avantages que des inconvénients comparativement aux procédés physico-chimiques :

3-5-1- Avantages :

- ☐ L'EC ne nécessite qu'un équipement simple avec un mode opératoire très maniable.
- ☐ L'EC évite l'utilisation de réactifs chimiques, de telle sorte qu'il n'y a aucun problème de neutralisation des réactifs en excès et aucune possibilité de pollution secondaire par les

substances chimiques ajoutées comme dans le cas des traitements chimiques des eaux usées. Cette absence de réactif chimique rajouté permet d'assurer avec succès un traitement biologique réalisé en aval.

- L'importance de champ électrique entre les électrodes qui conduit à la destruction de certaines souches de bactérie (Abbas et Messaad, 2017).
- Une production minimale des boues plus denses et moins hydrophiles rend leur séparation (décantation, flottation ou filtration) plus aisée et permettre de réduire le temps et les coûts de traitements de ces boues.
- L'efficacité des procédés d'EC à déstabiliser les polluants colloïdaux très fins grâce au champ électrique qui les met en mouvement, comparé aux procédés chimiques qui nécessitent des étapes de traitement plus lentes et des quantités de coagulant plus élevées.
- Les bulles d'air produites entrainer les polluants à la surface de la solution à traiter ou ils peuvent être facilement concentrés, rassemblés et éliminés.
- L'EC offre la possibilité de traité les effluents par oxydation et réduction de plusieurs composés dissous tel que les nitrites, les sulfures, les cyanures, les chromates et les ions fluor (Tir, 2008).
- L'utilisation de l'EC permet de réduire le temps de traitement ; ce procédé permet aussi un grand gain en compacité des installations et une possibilité d'automatisation.
- L'EC peut être utilisée avec d'autres techniques de traitement (Ammouche et Slimani, 2017).
- Les procédés complexes de traitement des eaux peuvent être remplacés par L'EC.
- Les floccs formé par l'EC sont semblable aux floccs obtenus par floculation chimique, sauf que les floccs d'EC tendent à être beaucoup plus large, plus stable et peut donc être séparé plus rapidement par filtration.

3-5-2- Inconvénients :

Les inconvénients majeurs de l'EC concernant principalement

- La conductivité souvent faible de l'eau polluée et la formation des dépôts sur les électrodes. La présence importante d'ions calcium et hydrogénocarbonates provoque l'apparition d'un dépôt de tartre au niveau de la cathode, augmente ainsi, la résistance de la cellule. Pour faire face à ce problème, la manière la plus simple est de réaliser une inversion périodique de la polarité
- Il est important de prévoir un nettoyage mécanique périodique des électrodes à l'aide de solution acides
- L'utilisation de l'électricité peut revenir chère voire difficile dans certaines régions.

Conclusion de cette première partie :

Les eaux résiduaires de différentes compositions et de diverses origines constituent un problème pour la nature lors du rejet sans subir de traitements au préalable. Afin de montrer l'intérêt de leur épuration, nous avons présenté dans ce chapitre, les origines et les caractéristiques des eaux résiduaires. Est ensuite présenté le cadre réglementaire qui régit les rejets des eaux résiduaires. Nous avons présenté dans ce chapitre le procédé d'électrocoagulation (EC) comme procédé de traitement des eaux par dissolution in-situ des électrodes sous l'effet d'un courant électrique.

Les domaines d'application de ce procédé sont très larges, allant du traitement global jusqu'au traitement très ciblé avec des effluents organiques ou minéraux pour lesquels, la séparation des matières polluantes est difficile à effectuer de manière classique.

En fin du chapitre, nous avons présenté un rappel sur les paramètres qui influencent l'EC, ainsi que nous avons cité les avantages et les inconvénients de l'EC.

PARTIE II

PARTIE

EXPERIMENTALE

CHAPITRE 1

Matériels et méthodes

Introduction :

Ce travail a été réalisé au niveau de laboratoire d'Hydraulique, Faculté de la technologie, Université d'El-Oued.

Dans le but de la dégradation d'un colorant textile, cas du Méthylorange, ce chapitre est consacré à la présentation du riel et les méthodes d'analyse utilisés pour réaliser l'étude du procédé d'EC.

Dans notre travail nous avons utilisé le procédé de l'électrocoagulation comme système de traitement d'eau pollué par colorant textiles à savoir (le Méthylorange).

Ce système présente l'avantage d'une utilisation très réduite des produits chimiques qui sont souvent compliqués à maintenir, notamment dans certains pays en voie de développement ou non développés. Ce procédé nécessite un équipement simple avec un mode opératoire facile, un temps de traitement réduit, produit une faible quantité de boues (flocs) comparée aux traitements chimiques.

L'objectif de ce travail est de traiter des solutions synthétiques de ce colorant au laboratoire par électrocoagulation en utilisant une anode en aluminium et une cathode en aluminium.

Le travail consiste à étudier un système simple ou nous avons étudié les paramètres influençant l'élimination de colorant, à savoir le pH, la densité de courant et la concentration initiale en colorant.

La méthodologie de travail adoptée consiste à examiner l'influence d'un paramètre en fixant les autres et en faisant à chaque fois varier le paramètre à étudier, aussi à présenter les résultats avec leur interprétation.

Choix de polluant organique :

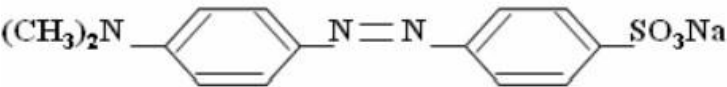
Dans notre étude un colorant basiques a été choisi comme polluant organique. Il s'agit du Méthylorange.

Le Méthylorange (MO), orangé III ou encore orangé de méthyle, est un indicateur coloré utilisé en chimie pour marquer la présence d'un milieu acide (il vire en rose-rouge) ou d'un milieu basique (il vire en jaune-orangé).

Les principales caractéristiques de ce colorant ainsi que leur formule semi – développées est regroupée dans le tableau 1.1.

□

Tableau 1.1: Propriétés chimiques et physiques de MO. (Belouettar L, 2020)

Structure chimique	
Formule moléculaire	$C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$
Masse moléculaire	327,34 g / mol
Solubilité en eau	~ 5 g / l (20 ° C)
Longueur d'onde	A pH acide $\lambda_{\text{max}} = 505 \text{ nm}$ A pH basique $\lambda_{\text{max}} = 464 \text{ nm}$

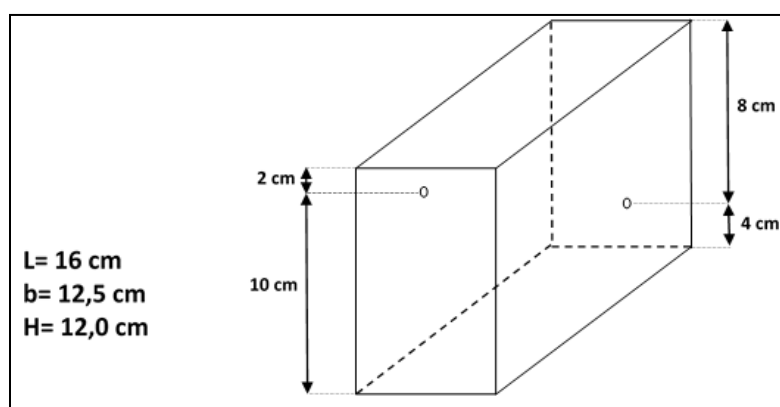
Toutes les solutions de méthylorange sont obtenues par dilutions à partir de solutions mères à 1 g./l. Cette concentration est inférieure aux limites de solubilités généralement admises pour le colorant. Ces solutions mères sont préparées, par dissolution sous agitation magnétique de 1g de soluté dans 1 L d'eau minéral, stockées dans des bouteilles sombres.

1-2- Dispositif expérimental de procédé d'électrocoagulation :

Le dispositif a été monté au laboratoire. Il est constitué de :

➔ **Un réacteur :** Un réacteur est une enceinte ou récipient apte à la réalisation et

l'optimisation de réactions chimiques. Dans notre cas le réacteur est construit de plexiglas avec les dimensions de la photo 1.1.



□ **Photo 1.1 :** Réacteur de 2 L.

➔ **Agitateur magnétique** : Un agitateur magnétique est un appareil électrique. Celui-ci est constitué d'un bloc qui contient un aimant, surmonté d'une plaque. Grâce à un moteur, l'aimant est mis en rotation. Une molette située sur le devant de l'agitateur permet d'ajuster manuellement la vitesse de rotation de l'aimant. Voir la photo 1.2.



Photo 1.2 : Agitateur magnétique

➔ **Une pompe à eau** : Les pompes sont les générateurs de débit à la base de tout systèmes hydrauliques. Dans un circuit hydraulique, leur rôle est de faire circuler un fluide qui va permettre de déplacer des charges grâce à d'autres composants tels que des vérins ou des moteurs. (Photo 1.3).



Photo 1.3 : Une pompe à eau de la marque kamoer

➔ **Générateur de courant électrique** : Sont des dispositifs permettant de produire de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie. Par opposition, un appareil qui consomme de l'énergie électrique s'appelle un récepteur électrique (Photo 1.4).

Un fil électrique est le composant électrotechnique servant au transport de l'électricité, afin de transmettre de l'énergie ou de l'information

□



Photo 1.4 : Générateur de courant électrique avec des fils électriques

➔ **Un barreau magnétique** : Il est utilisé dans un ballon, un bécher ou un erlenmeyer placé sur un agitateur magnétique, il sert à mélanger les milieux réactionnels organiques ou les solutions aqueuses. (Photo 1.5).



Photo 1.5 : Un barreau magnétique

➔ **Électrode en aluminium** : Un conducteur métallique qui amène le courant électrique dans les liquides et dans les gaz raréfiés. L'anode est l'électrode positive ; la cathode est l'électrode négative. Voir la figure 1.1.

L'anode et la cathode sont en aluminium, les électrodes sont placées parallèlement l'une par rapport à l'autre séparées par une distance de 2 cm qui reste constant pour tous les essais.

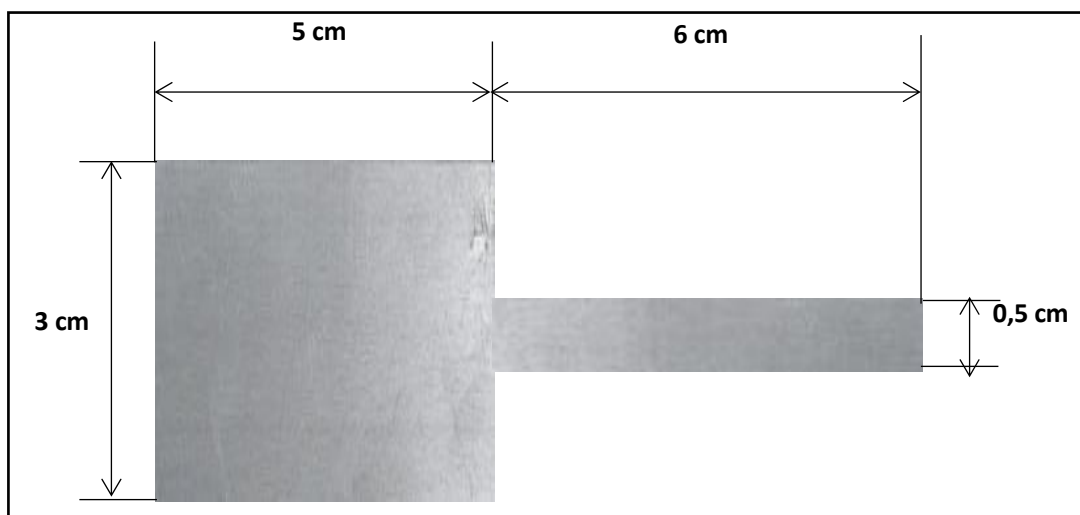


Figure 1.1 : Électrode en aluminium

- **Matériaux d'électrodes :**

Nous avons utilisé dans cette étude un seul type d'électrodes : Electrode en aluminium, et il est construit à partir de la plaque de matriculation de voiture).

- **Préparation des électrodes :**

L'un des facteurs qui influent sur l'efficacité du procédé est la qualité de surface des électrodes. Donc, avant chaque essai, il faut les nettoyer afin d'éviter toutes sortes d'impuretés.

➔ **L'eau minérale Saïda** : Est une eau minérale naturelle pure et équilibrée en minéraux essentiels à l'organisme.

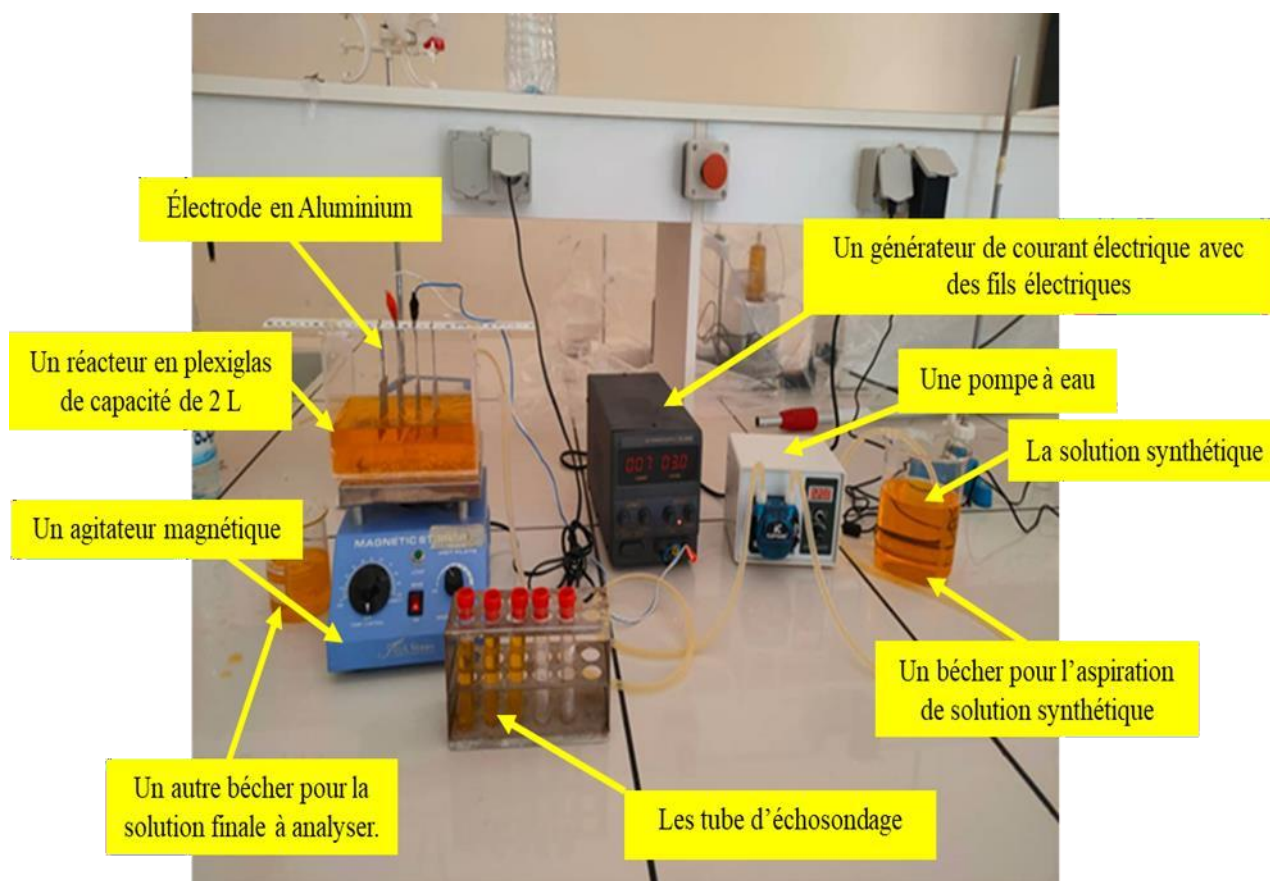


Figure 1.2 : Dispositif expérimental final de procédé d'électrocoagulation

1-3- Méthodologie expérimentale :**1-3-1- Préparation des solutions :**

La solution mère de méthylorange (1g/l) a été préparée par dissolution de 1g dans 5 L d'eau minérale (Saida).

Les solutions filles devant servir à l'analyse, ont été obtenues par des dilutions successive jusqu'aux concentrations désirées.

1-3-2- Déroulement d'expérience :

□ Dans un réacteur de forme parallélépipédique de volume 2L, contenant la solution à traiter, a concentration 200 mg/l et avec une agitation mécanique.

□ Après avoir nettoyé les électrodes, les électrodes sont plongées dans le réacteur. Elles sont fixées l'un à côté de l'autre à une distance bien fixe pour tous les essais, et on garde toujours la même surface d'électrodes immergée pour tous les essais, ensuite elles sont reliées au générateur de courant à l'aide des fils électriques. Une fois le courant est appliqué, l'agitateur est mis en marche à une vitesse moyenne et constante.

□ Après avoir réglé l'intensité du courant choisie, on déclenche l'expérience qui est suivie pendant une durée de temps d'électrolyse. La pompe aspire la solution synthétique du béccher avec un débit de 20 ml/min, et la refoule vers le réacteur où se déroule le procédé d'électrocoagulation.

□ L'échantillonnage est réalisé en cours de manipulation à chaque 5 min à l'aide d'une seringue. On prélève un échantillon pendant les 20 premières minutes après on opère des prélèvements après chaque 20 min.

□ On laisse l'échantillon prélevé se décanter dans des tubes d'échosondage pendant 20 min.

□ La détermination de la concentration des colorants est effectuée par dosage spectre-photométrique dans le domaine du visible aux longueurs d'ondes appropriées $\lambda_{\max}$, tout en mesurant le pH de chaque prélèvement.

A l'aide du spectrophotomètre UV-Visible, on mesure l'absorbance à $\lambda_{\max}(\text{Mo}) = 464\text{nm}$. Nous avons procédé à l'établissement des courbes d'étalonnage afin de pouvoir estimer leurs concentrations en solution traitée.

□ L'expérience se déroule à température ambiante.

1-4- Méthodes d'analyse :

Les différentes analyses effectuées au cours des essais expérimentaux sont les suivantes :

1-4-1- La mesure d'absorbance :

Les mesures d'absorbance (464 nm) furent effectuées en utilisant un spectrophotomètre UV-Visible. Ce dernier est un photomètre conçu pour effectuer une spectrophotométrie ; cela permet de mesurer l'intensité en fonction de la longueur d'onde de la source lumineuse. Les principales caractéristiques de spectrophotomètres sont largeur de bande spectrale et gamme linéaire de l'absorption ou la mesure de la réflectance. Voir la photo 1.7.



Photo 1.6 : Le spectrophotomètre UV-Visible utilisé

L'efficacité de décoloration a été calculée en pourcentage (%) selon la relation suivante

: Avec :

C_0 : Concentration initiale de la solution colorée

C : Concentration finale des phosphates

$$R(\%) = \left(\frac{C_0 - C}{C_0} \right) * 100$$

1-4-2- La mesure de pH :

La mesure du pH est effectuée à l'aide d'un appareil de type HANNA., muni d'une électrode en verre contenant une solution de KCl de concentration 4M. La tension aux bornes des électrodes est enregistrée en continu. (Photo 1.7)

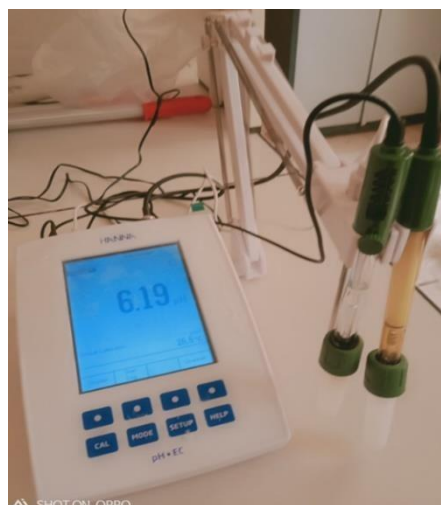


Photo 1.7 : Le pH mètre de type Hanna utilisé

1-5- La courbe d'étalonnage :

L'établissement de la courbe d'étalonnage du colorant MO par spectrophotométrie à $\lambda_{\max}=464$ nm se fait par la préparation d'une solution mère de concentration donnée, à partir de laquelle des dilutions successives sont préparés pour avoir différentes concentrations de solutions filles. La courbe d'étalonnage a été établie afin d'estimer la concentration de colorant en solution.

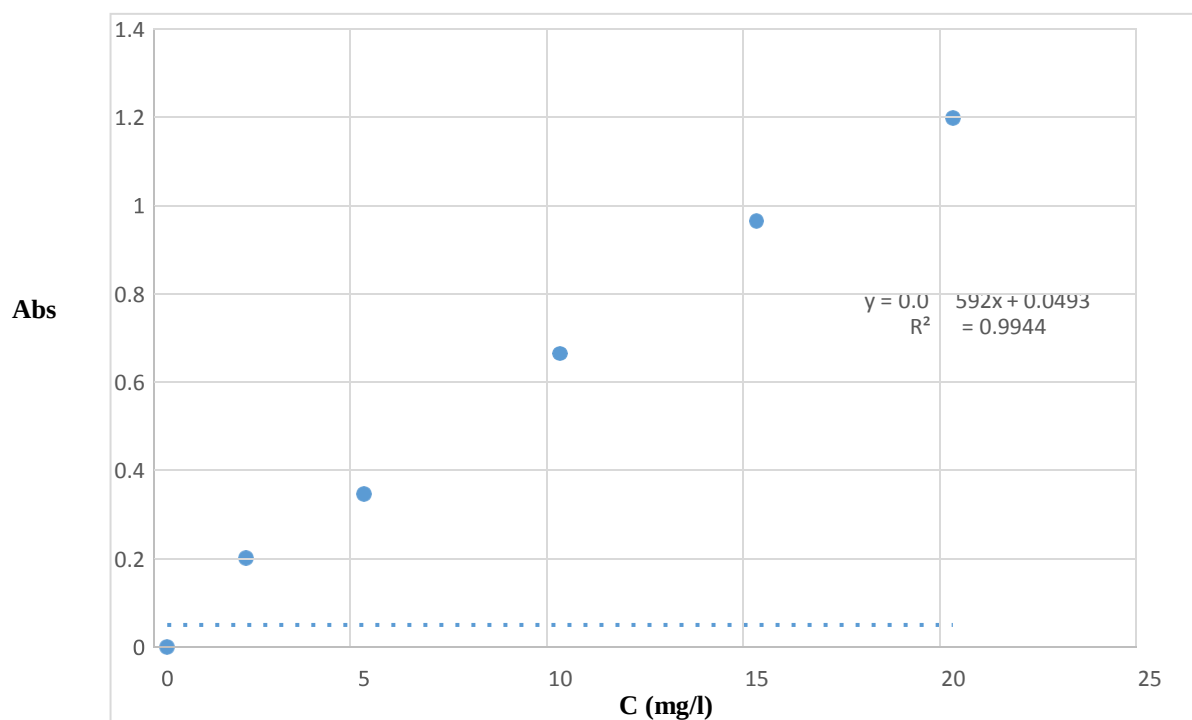


Figure 1.3 : Courbe d'étalonnage de colorant Méthylorange.

La courbe de la densité optique en fonction de la concentration en colorant suit bien la loi de Beer Lambert avec un coefficient de corrélation R^2 de 0.9944 dans le domaine des concentrations de 2 à 20 mg/L, ce qui représente un très bon ajustement linéaire.

La régression linéaire a donné $y = 0,0592x + 0,0493$, cette équation est utilisée pour calculer les concentrations inconnues.

CHAPITRE 2

Résultats et interprétations

Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'évaluation des performances du procédé d'EC pour le traitement d'un effluent simulé de l'industrie de textile le MO.

Les expériences ont été réalisées pour examiner les effets des paramètres de fonctionnement du procédé tels que l'intensité de courant, le temps de traitement, le pH et la concentration en colorant.

2-1- Essai avec 2 électrodes :

Pour suivre la cinétique de dégradation du colorant, nous avons opté pour un seul type d'électrode celle en aluminium et pour une seule configuration de 2 électrodes.

Le tableau suivant 2.1 représente les résultats obtenus.

Tableau 2.1 : Les résultats des 3 essais. I=66mv ,I=86mv,I=118mv

Intensité de courant	Temps (min)	Ab s	Concentrati on	R (%)	pH
66 mV	5	0,8 06	12,78	36,09	8,02
	10	0,7 84	12,41	37,95	7,97
	15	0,7 98	12,65	36,77	7,94
	20	0,8 14	12,92	35,41	7,93
	40	0,7 71	12,19	39,05	7,91
	60	0,7 73	12,22	38,88	7,88
86 mV	5	1,0 98	17,71	11,43	8,08
	10	0,9 65	15,47	22,66	8,02
	15	0,9 67	15,50	22,49	7,86
	20	0,9 78	15,69	21,56	7,84
	40	0,9 54	15,28	23,59	7,83
	60	0,9 47	15,16	24,18	7,67
118 mV	5	0,9 84	15,79	21,06	7,9
	10	0,9 68	15,52	22,41	7,92
	15	0,9	15,70	21,48	7,89

		79			
	20	0,9 84	15,79	21,06	7,96
	40	0,9 75	15,64	21,82	7,99
	60	0,9 74	15,62	21,90	7,95

2-1-1- Effet de temps d'électrolyse :

Le temps requis pour l'électrocoagulation est le facteur le plus important dans ce processus, en d'autres termes, est le temps nécessaire pour se débarrasser au maximum des polluants.

Le procédé d'électrocoagulation a été étudié en variant la durée d'électrolyse cela veut dire pour suivre la cinétique de décoloration de la solution synthétique, des prélèvements, ont été effectués à des intervalles de temps bien déterminés : quatre prélèvements pour chaque 5 min et ensuite deux prélèvements après 20 min.

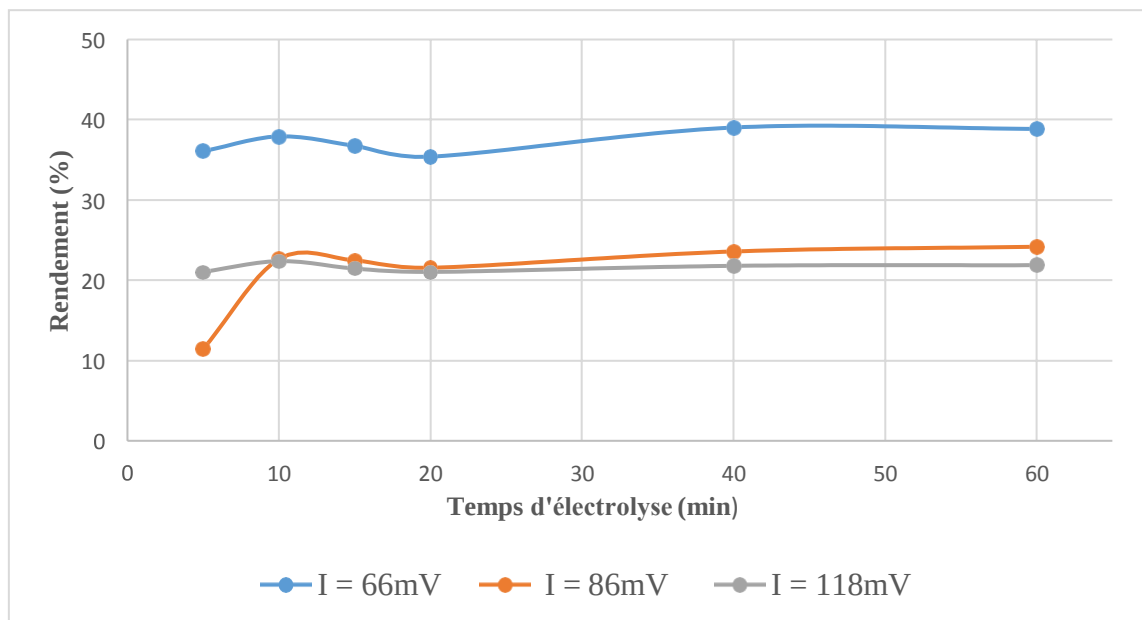


Figure 2.1 : Effet de temps d'électrolyse sur l'élimination du colorant MO.

Les résultats obtenus montrent que le taux d'élimination du couleur augmente avec l'élévation du temps d'électrolyse pour chaque voltage appliqué. Ces résultats peuvent s'expliquer par l'augmentation de la concentration d'ions métalliques produits sur les électrodes et également la vitesse de génération de bulles d'hydrogène et par conséquent la croissance des floccs d'hydroxyde d'aluminium qui va améliorer le taux de décoloration de la solution, et le suivi du rendement de décoloration en fonction de temps sur la figure 2.1 nous constatons que l'allure des courbes présente un comportement similaire pour les trois intensités de courant.

2-1-2- Effet d'intensité de courant :

L'intensité du courant est considérée comme un paramètre clé dans l'électrocoagulation. Le courant imposé pendant le traitement joue un rôle déterminant pour la cinétique d'abattement du polluant et le temps du traitement. Il est responsable de la vitesse des réactions qui se déroulent au niveau des électrodes.

Lors de l'étude de ce paramètre, nous avons effectué une série d'essais en appliquant les intensités de courant suivantes : 66 mV, 86 mV et 118 mV. Les autres conditions opératoires ont été maintenues constantes. Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures 2.2a, 2.2b, 2.2c.

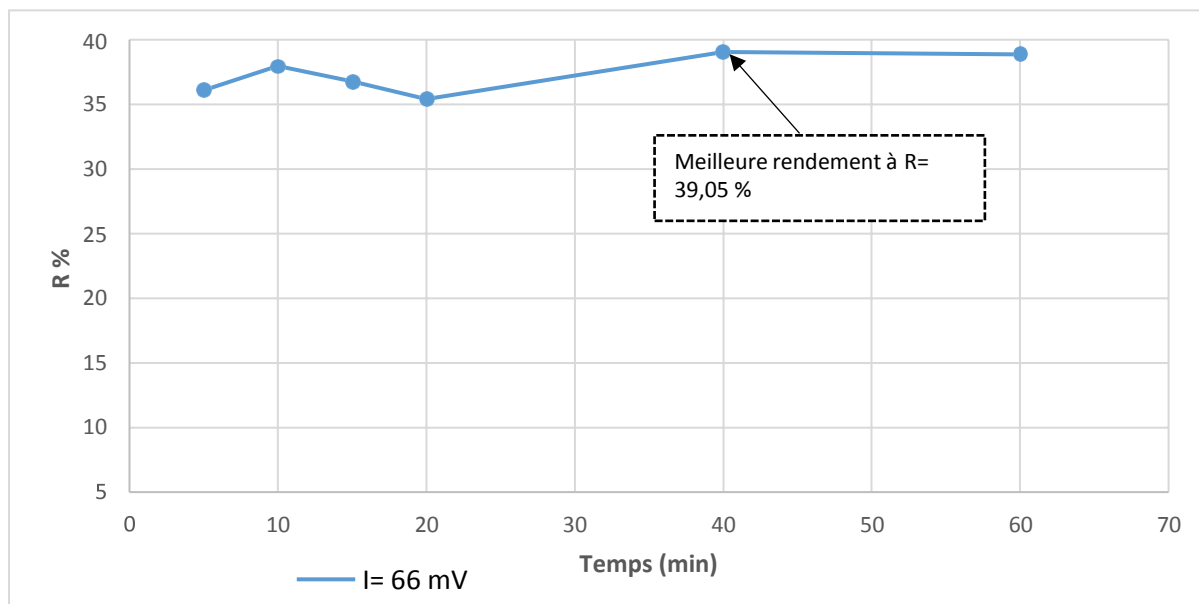


Figure 2.2a : Effet de l'intensité de courant sur le rendement du colorant MO.

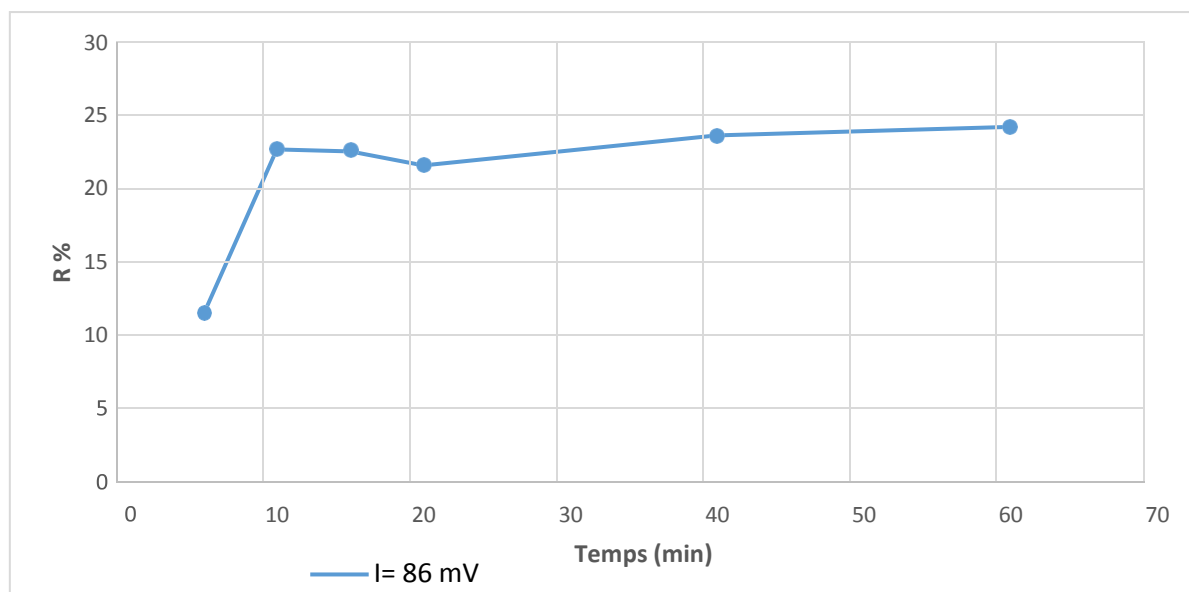


Figure 2.2b : Effet de l'intensité de courant sur le rendement du colorant MO.

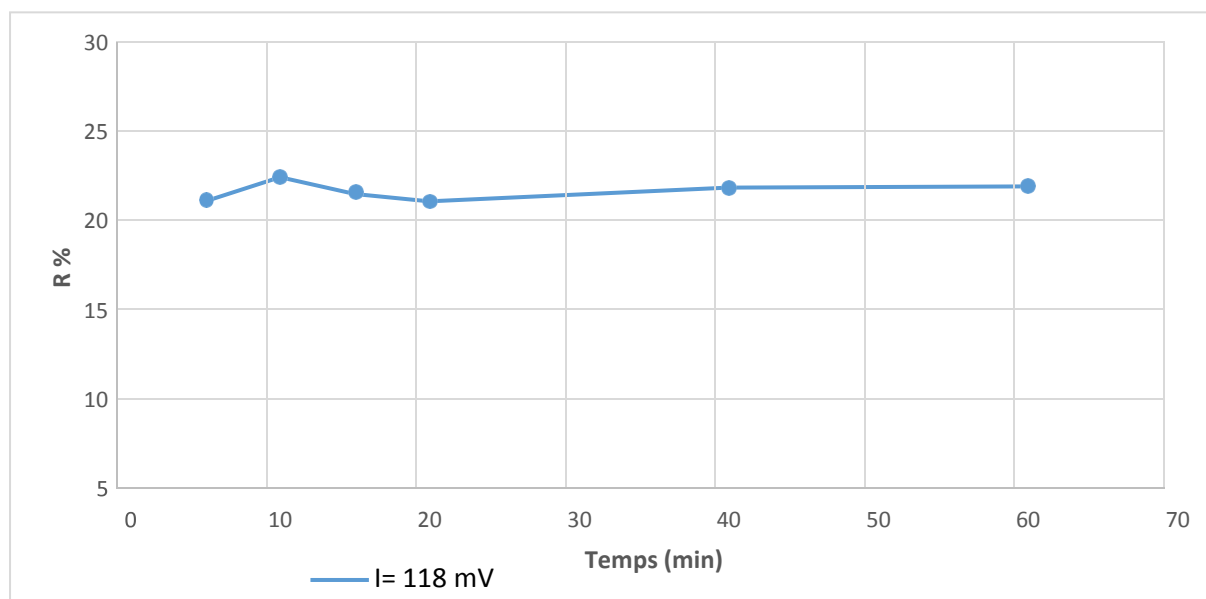


Figure 2.2c : Effet de l'intensité de courant sur le rendement du colorant MO.

On remarque que pour les trois intensités du courant appliquée que l'abattement est faible, et dans nos conditions opératoires, l'intensité de courant appliquée de $I = 66\text{mV}$ impose une cinétique d'abattement de colorant plus rapide dans notre réacteur, et présente une élimination de MO plus importante par rapport aux autres intensités.

Etant donné que la quantité du coagulant est proportionnelle à l'intensité du courant appliqué selon la loi de Faraday, donc la diminution de rendement avec l'augmentation de l'intensité de courant peut être expliqué par le fait que la quantité d'espèces coagulantes produites est insuffisante pour l'adsorption de colorant présents.

2-1-3- Evolution de la concentration du colorant :

Dans le but d'évaluer la concentration du colorant lors du traitement par l'EC, nous avons réalisé des expériences en gardant tous les autres paramètres constants.

Le suivi de l'évolution de la concentration des colorants en fonction du temps d'électrocoagulation pour les différentes intensités de courant est représenté sur les figures 2.3.

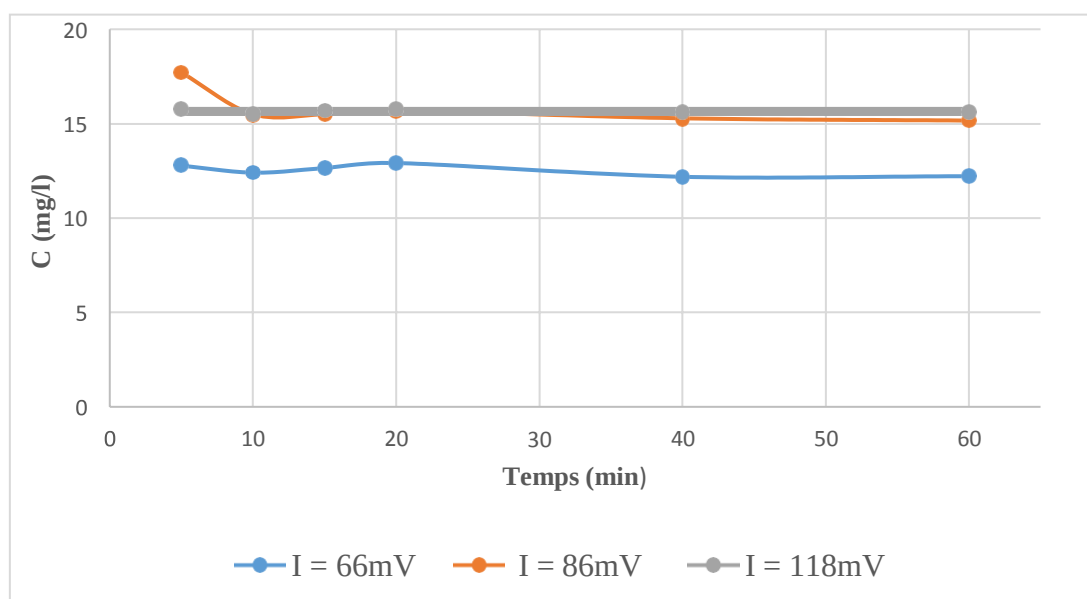


Figure 2.3 : Evolution de la concentration du colorant en fonction du temps pour le 3 intensités de courant.

D'après les résultats obtenus on remarque presque une superposition des deux courbes, pour les intensités de 86 mV et 118 mV après premiers 10 minutes, Par contre nous enregistrons une légère hausse pour l'intensité 66 mV. Et la grande valeur d'absorption est marquée dans l'intensité de courant 66 mV est estimé par 0,771.

2-1-4- Effet de pH :

L'importance de l'influence du pH sur la performance des procédés électrochimiques a été mise en évidence et peut s'expliquer par la nature des espèces hydroxylées formés, qui permettent d'adsorber les colorants pour des valeurs de pH déterminées (Lemlikchi, 2012).

La figure 2.3 donne l'évolution du pH de la solution de MO avec une concentration initiale de 20 mg /L et un pH initial de 7,5. Les résultats obtenus indiquent une augmentation perceptible du pH initial, pour les trois intensités de courant pour atteindre un pH=8.02 pour $I=66\text{ mV}$, et un pH de 8.05 pour $I=86\text{ mV}$, et un pH = 7.97 pour $I=118\text{ mV}$.

Les résultats montre qu'un meilleur rendement de la décoloration est obtenu pour un pH = 7.91, il est de l'ordre de 39.05 %.

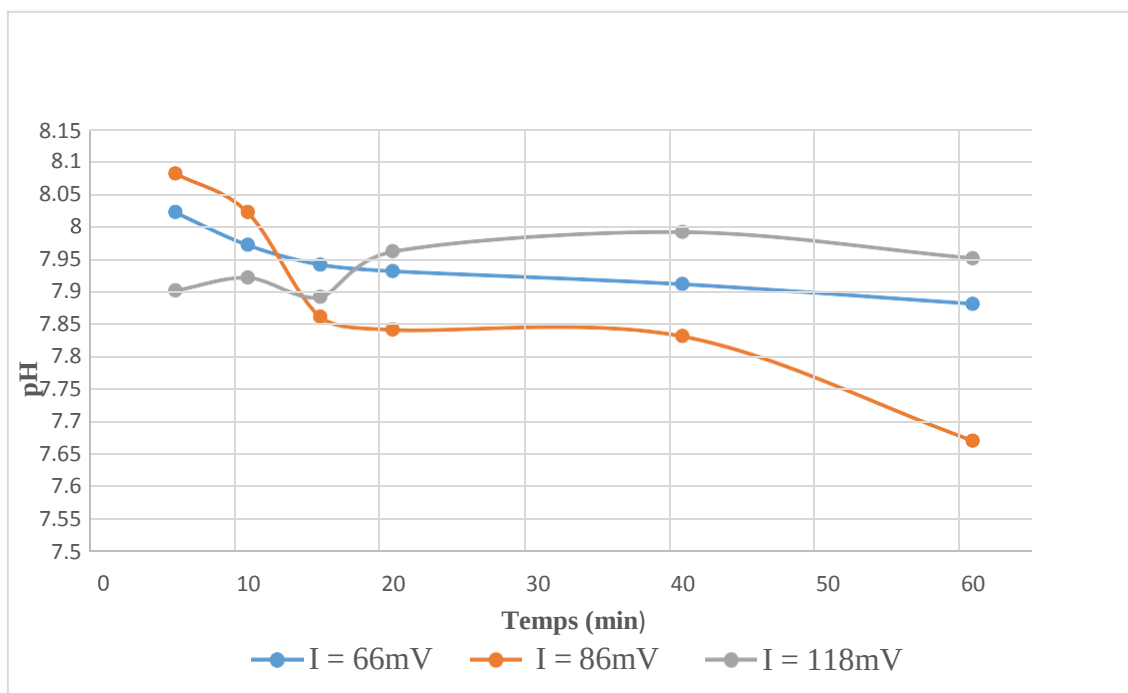


Figure 2.4 : Variation du pH en fonction du temps.

Le mécanisme d'EC dépend fortement de la nature chimique du milieu, Le pH de la solution détermine la spécification des ions métalliques. Il influence l'état des espèces en solution et la solubilité des produits formés.

La présence des hydroxydes d'aluminium est favorisée entre $\text{pH} = 4$ et $\text{pH} = 7$, elle est maximale à $\text{pH} = 8$, alors qu'une chute du rendement à un $\text{pH} = 10$ peut être expliquée par l'atteinte d'équilibre (Chenna, 2016).

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a pour objectif principal d'étudier la performance de procédé électrocoagulation pour le traitement des eaux résiduaires par l'utilisation d'un réacteur d'électrocoagulation muni de deux électrodes en aluminium pour l'élimination d'un polluant organique qui est un colorant : le méthylorange présent dans les effluents des industries textile.

Dans la première partie de la présente étude, nous avons appliqué le procédé d'électrocoagulation pour le traitement de solution synthétique de colorant méthylorange.

Au cours de cette étape, nous avons étudié l'influence de différents paramètres sur le procédé de décoloration des solutions par traitement d'électrocoagulation, nous avons déduit que les paramètres tels que l'intensité de courant, le pH de la solution et la concentration en colorants influencent l'efficacité du traitement.

Nous pouvons aussi conclure que :

- L'utilisation des électrodes en aluminium et une intensité de courant modérée sont bénéfiques puisque on arrive à éliminer une quantité de colorant.
- Les intensités de courant élevées provoquent une dissolution anodique importante ce qui nécessite une consommation élevée de l'énergie électrique, il serait donc intéressant de travailler à des intensités de courant modérées.
- Une augmentation de pH est notée lors de l'augmentation de l'intensité de courant ce qui est expliqué par l'augmentation de la libération des ions OH^- due à la réduction de l'eau.
- L'étude de l'effet de la concentration en colorant nous a permis de conclure que l'électrocoagulation est un procédé beaucoup plus efficace pour les faibles concentrations en polluants organiques.
- Après optimisation de ces paramètres, nous avons évalué la performance efficacité du procédé pour l'élimination de colorant dans la solution synthétique.
- Les inconvénients de procédé d'électrocoagulation, se limitent au fait que les électrodes se dissolvent dans l'eau usée après oxydation, ce qui nécessite leur remplacement régulier et conduit à une perte d'efficacité de la cellule ; de même que l'utilisation de l'énergie électrique peut revenir cher pour certain pays.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **Abbas M, Messaad A** : Utilisation de l'électrocoagulation pour l'élimination de colorants des eaux usées de l'industrie textile, Université Mohamed Boudiaf - M'SILA (2019).
- **Agoungbome D** : Élimination de la matière organique par le procédé d'électrocoagulation : comparaison à la coagulation chimique (2016).
- **Alem S** : Etude comparative entre coagulation-floculation et électrocoagulation électroflottation -mémoire de master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia (2016).
- **Ammouche A** : Déphosphatation des eaux usées par le procédé d'électrocoagulation (2017).
- **Aidaoui D et Kouadri** : Dégradation d'un colorant le Gentiane violet par la technique de L'électrocoagulation, Université A. M. Oulhadj – Bouira (2018).
- **Benmenni F** : Étude de l'électrocoagulation de deux colorants (vert de méthyle et jaune basique 28) en mélange binaire, Université Saad Dahlab, Blida (2016).
- **Belyachi A** : Elimination d'un colorant anionique par adsorption, électrocoagulation, fenton, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem (2017).
- **Beloudah M** : Etude des propriétés de l'électrocoagulation d'un acide organique (2020)
- **Baha, S et Bensari, F** : Epuration des eaux usées domestiques par les boues activées : étude de la performance de la STEP d'Ain el-Houtz (2014).
- **Belouettar L** : Etude de décoloration du méthylorange en milieu hétérogène, Université Badji Mokhtar – Annaba (2020).
- **Belhadj H et Ouassini M** : Etude des performances épuratoires d'une station d'épuration des eaux usées de l'industrie textile : Cas de la STEP de Sebdou (2016).
- **Houari B, Touil A, Nani M** : La réutilisation des eaux usées en agriculture à partir de la station d'épuration (step 03) de la wilaya d'El-Oued (2020/2021).
- **Hamadou H** : Analyse physico-chimique et bactériologique des eaux usées de STEP Boumerdes (W. Boumerdes) (2019/2020)
- **Ishaka O** : Optimisation du traitement du phosphore des eaux usées par électrocoagulation (2019).
- **Inoussa Z** : Étude expérimentale et théorique du procédé d'électrocoagulation : application au traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie (2009/2010)
- **Kesbi R** : Etude des performances épuratoires d'une STEP de l'ouest Algérien Cas de la nouvelle STEP d'Ain Témouchent (2016).

- Lemlikchi W** : Elimination de la pollution des eaux industrielles par différents procédés d'oxydation et de Co- précipitation, thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, (2012).
- **T Mohammed** : Traitement des eaux résiduaires d'industrie de textile par électrocoagulation en réacteur continu (2019).
- **Ularbi et Maharzi O** : Traitement des eaux usées urbaines de la ville d'Ain Defla par électrocoagulation, mémoire de master, Université Djilali Bounaama, (2016).