



Mémoire

Présenté par

M^{elle} **AIDAOUI Dounia**
M^{elle} **KOUADRI Abla**

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière: SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT

Spécialité : GENIE DE L'ENVIRONNEMENT

DEGRADATION D'UN COLORANT LE GENTIANE VIOLET PAR LA TECHNIQUE DE L'ELECTROCOAGULATION

Soutenu le 06/10/2018

Devant le jury composé de :

Mme	A. ZAABAR	MCB	UAMO, Bouira	Présidente
Mr.	R. KERNANI	MAA	UAMO, Bouira	Examinateur
Mme	L. MANSOURI	MAA	UAMO, Bouira	Examinatrice
Mr.	H. LOUNICI	Pr.	UAMO, Bouira	Promoteur
Mlle	A.A. Fakir	Doct.	UAMO, Bouira	Co-promoteur

2017/2018

Remerciements

Toute gratitude et nos remerciements à ALLAH le tout puissant, qui nous a donné la force, la volonté et le courage d'élaborer ce travail,

C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulières, que nous remercions nos promoteurs, Mr Hakim LOUNICI et Mlle Ahlem Aicha FAKIR, pour leur aide, remarques et conseils, qui nous ont permis d'accomplir notre modeste travail de fin d'études,

Notre reconnaissance et nos remerciements s'adressent aussi à Mme ZAABAR Aida en étant présidente de jury ainsi que les membres du jury qui ont accepté de juger ce modeste travail, Mme MANSOURI Lynda et Mr KERNANI Redha,

Nous saisissons également cette opportunité pour remercier l'ensemble des enseignantes, des enseignants qui ont contribué à notre formation,

A Mme Belhadj Wahiba, et Mr Hammid Hakim pour leurs aides et orientations,

À l'équipe des techniciennes du laboratoire pour l'aide qu'elle nous a accordée,

À toutes et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce travail, nous leurs disons :

« Merci, Dieu vous bénisse et vous récompensera ».

DOUNIA ET ABLA.

Dédicaces :

Je dédie ce modeste travail :

À la mémoire de mon défunt père « Abdelkader » que je n'ai pas connu. Je suis très fière de toi cher papa, tu es tombé au champ d'honneur « chahid du devoir national » ma mère et moi te demandons de continuer à veiller sur nous de la haut, tout comme tu le faisais si bien sur cette terre. En attendant de te revoir, profite du repos éternel que tu as tant mérité.

**Repose en paix. Puisse Dieu tout puissant t'accorder Sa sainte miséricorde et t'accueillir en son vaste paradis. Allah yarahmek ya abi*

À la mémoire de ma tante feu « Fahima »

À mes prunelles des yeux, ma tendre mère qui a assumé les rôles de mère et père, et a souffert tout au long de sa vie pour subvenir à mes besoins tout en restant fidèle et loyale à mon défunt père.

À mes grands-parents, ceux qui m'ont enfantée dans la douleur, mes symboles d'affection et d'amour ceux qui se sont sacrifiés pour m'offrir leur aide et dévouement.

À mes oncles « Ghanou, Hamoud, Chawki, Rochdi, Bilel, Hamza » et mes tantes « Bouchra, Imen », ainsi que les familles « Aidaoui, Boussaidi, Habis, Heddab, Hammid »

À la princesse de la famille « Amira Wijdene » et à « Ahmed el-Amine » le chouchou de la famille.

À ma binôme « Abla » et tous mes camarades de promotion,

À mes chères amies « Asma, Amina, Akila, Mimi, Wahiba, Jahida, Imen, Najet, Meriem, Kahina, Sabrina, Soraya,

À tous ceux qui sont proches de mon cœur et dont je n'ai pas cité le nom.

Dounia

Dédicaces

Merci à Dieux qui nous a octroyé le bon état d'esprit pour étudier

Et le bienfait du cœur pour aimer et espérer

Et le bienfait de parler pour le remercier

Je le supplie pour répondre à mes prières parce qu'il est mon

Espoir de satisfaction

Et pour éclairer mon chemin pour le respect des autres

Avec beaucoup d'amour, j'offre mon modeste travail à :

Qui son cœur m'a vu avant ses yeux

Et ces entrailles m'ont embrassé avant ses mais

La source de la tendresse :

Ma mère, ma mère et puis ma mère

Que Dieu prolonge son âge

A la source de la puissance et du sérieux. Celui qui m'a donné

L'amour, le respect et le bon caractère

Mon père que Dieux prolonge sa vie avec une bonne santé et du Bonheur

A la fleur de ma vie et de paradis in chaa Allah Aicha et à son Amie Zahiya

A la fleur de mon cœur Fatima et son époux Ismail, et à Baha Eddine le joyau

De mon cœur et Mohamed amine la senteur de mon esprit et

Ahmed Islam la lumière de mes jours

Et mon amour Souad

Et l'accompagnante de mon chemin Dounia et mon intime Kahina

Et mon promoteur Lounici Hakim

Et mes frères du grand au petit

Et à tous mes amis

Abla

TABLE DES MATIERES

Liste des abréviations	i
Liste des figures.....	iii
Liste des tableaux.....	vi
Introduction générale	1

CHAPITRE I : GENERALITES

I.1 Introduction.....	3
I.2.Pollution des eaux résiduaires.....	4
I.2.1.Définition des eaux usées.....	4
I.2.2.Origine et nature des eaux usées	4
I.2.2.1.Origine domestique.....	4
I.2.2.2.Origine agricole.....	4
I.2.2.3.Origine naturelle.....	5
I.2.2.4.Origine industrielle.....	5
I.2.3.Les paramètres de pollution.....	6
I.2.3.1.Paramètres physicochimiques.....	6
I.2.3.2.Paramètres organoleptiques.....	7
I.2.3.3.Paramètres biologiques.....	8
I.3.Les eaux résiduaires industrielles	8
I.3.1.Présentation de l'industrie textile	8
I.3.2.Activité de l'industrie textile.....	9

I.3.3. Les rejets de l'industrie textile.....	9
I.4. les colorants.....	11
I.4.1. Définition.....	12
I.4.2. Utilisation des colorants.....	12
I.4.3. Classification des colorants.....	13
I.4.3.1. Classification chimique.....	13
I.4.3.2. Classification tinctoriale.....	16
I.4.4. Le Gentiane Violet	18
I.5. Problèmes environnementaux et méthodes de traitement.....	21
I.5.1. Problèmes environnementaux.....	21
I.5.1.1. Les dangers évidents.....	21
I.5.1.2. Les dangers à long terme	22
I.5.2. Nécessité de traiter les effluents textiles.....	23
I.5.3. Législation sur l'environnement	24
I.5.4. Le traitement des rejets textiles.....	25
I.5.4.1. Traitement Physicochimique	25
- Adsorption sur charbon actif et autres matériaux.....	25
- Filtration sur membrane.....	26
- Coagulation–floculation.....	26
- Oxydation chimique.....	26
I.5.4.2. Biologique.....	27

CHAPITRE II : ELECTROCOAGULATION

II.1.Historique.....	28
II.2.Définition de l'EC.....	31
II.3.Principe.....	31
II.4.Principales lois d'électrolyse.....	32
II.5.Configuration des électrodes.....	34
II.5.1.Les différents matériaux utilisés pour les électrodes.....	34
II.5.2.Electrodes en aluminium.....	35
II.5.3.Réactions aux électrodes.....	35
II.5.4.Cellule électrolytique à deux électrodes.....	36
Connexion monopolaire en parallèle.....	37
Connexion monopolaire en série.....	37
Connexion bipolaire.....	38
II.5.5.Paramètres influençant le processus d'EC.....	39
L'intensité du courant.....	39
Le pH.....	39
La conductivité.....	40
La distance entre électrodes.....	40
Autres facteurs influençant l'électrocoagulation.....	41
II.5.6.Avantage et inconvénient de l'électrocoagulation.....	41
II.5.6.1Avantages.....	41
II.5.6.2Inconvénient.....	42

CHAPITRE III: MATERIELS ET METHODES

III.1.Produits et réactifs.....	43
III.2.Matériel.....	44
III.3 Méthodologie expérimentale.....	44
III.3.1.Préparation des solutions.....	44
III.3.2. La courbe d'étalonnage.....	44
III.4.Dispositif expérimental de procédé d'électrocoagulation.....	45
III.4.1.Description de montage expérimental.....	45
III.4.2.Déroulement d'expérience.....	46
III.4.3.Méthodes d'analyse.....	47
a) la mesure d'absorbance.....	47
b) La mesure de pH.....	47

CHAPITRE IV: RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1.Introduction.....	48
IV.2.Balayage λ_{\max}	48
IV.3.La courbe d'étalonnage.....	49
IV.4.Essai avec 2 électrodes.....	51
IV.4.1.Effet d'intensité de courant.....	51
IV.4.2. Effet de conductivité.....	52
IV.4.3. Effet de pH.....	53
IV.4.4. Effet de la concentration en colorant.....	55
IV.5. Essai avec 4 électrodes.....	56

IV.5.1.Effet d'intensité de courant.....	57
IV.5.2.Effet de conductivité.....	59
IV.5.3. Effet de pH.....	60
IV.5.4. Effet de concentration en colorant.....	62
Conclusion général	65

Liste des abréviations :

ABS	Coloration liée à l'absorbance de l'effluent.
C	Débit massique de métal dissous (kg/h).
C/C0	Variation de la concentration résiduelle.
COT	Carbone organique total (mg/l).
DBO	Demande biologique en oxygène (mg/l).
DBO₅	Demande biologique en oxygène mesuré après 5 jours d'incubation (mg/l).
DCO	Demande Chimique en Oxygène (mg/l).
EC	Electrocoagulation.
ECM	Electrocoagulation monopolaire.
ECB	Electrocoagulation bipolaire.
E	Energie consommée (KW.h).
F	Constante de Faraday (96500 C.mol ⁻¹).
GV	Gentiane Violet.
H₂SO₄	L'acide sulfurique.
I	Intensité du courant imposé (A).
MES	Matières en suspension (UTN).
MVS	Matières volatiles en suspension.
m	Masse du métal dissous ou de gaz formé (g).
m₁	La masse de l'anode avant l'essai d'électrocoagulation (g).
m₂	La masse de l'anode après l'essai d'électrocoagulation (g)
m_{exp}	Masse expérimentale (g).

Norme DIN (Deutsches Institut für Normung) Classification des colorants selon les aspects coloristiques et chimiques

NaCl	Chlorure de sodium.
NaOH	La soude.
n	Nombre d'électrons mis en jeu dans la réaction considérée.
pH	Potentiel d'hydrogène.
p	Nombre d'électrodes.
Qe	Débit d'alimentation de la cellule (m ³ /h).
R_{anode}	Rendement anodique (%).
S	Surface des électrodes (cm ²).
SPC	Sous-produit de chloration.
TAC	Taux alcalimétrique complet (F°).
TDS	Taux de solides dissous (ppm).
THM	Trihalomethanes.
t	Durée d'électrolyse(s).
U	Tension d'électrolyse (volt).
V	Volume de l'eau usée traitée (m ³).
λ	Longueur d'onde (nm).
[]	Concentration (mg/l).

Liste des figures :

N° de la figure	titre	page
Figure I.1	La formule chimique des colorants azoïques	13
Figure I.2	La formule chimique de triphénylméthane	14
Figure I.3	La formule chimique des colorants indigoïdes	14
Figure I.4	La formule chimique des colorant xanthènes	14
Figure I.5	La formule chimique des colorants anthraquinoniques	15
Figure I.6	La formule chimique des phtalocyanines	15
Figure I.7	La formule chimique des colorants nitrés et nitrosés	15
Figure I.8	La formule chimique des colorants développés	17
Figure I.9	La formule chimique des colorants de cuve	17
Figure I.10	La formule chimique des colorants directs	18
Figure I.11	La formule chimique des colorants à mordants	18
Figure I.12	Structure chimique du colorant triphénylméthane "GV"	20
Figure I.13	Dégradation du cristal violet par la bactérie «N. Corallina»	20
Figure I.14	Présentation d'un procédé d'ennoblissement textile	21
Figure I.15	Conséquences de la bio-accumulation après déversement de substances toxiques (insecticides) dans un cours d'eau.	23
Figure II.1	Diagramme de Venn des principaux processus formant le procédé d'électrocoagulation.	29
Figure.II.2	Représentation schématique d'une installation typique de traitement des eaux, et les procédés complexes qui peuvent être remplacés par l'électrocoagulation	30
Figure II.3	Schéma du principe de l'électrocoagulation	31
Figure II.4	Le processus d'élimination de colorant par le procédé d'électrocoagulation	32

Figure II.5	Cellule électrolytique à deux électrodes	36
Figure II.6	Connexion en parallèle d'électrodes monopolaires	37
Figure II.7	Connexion en série d'électrodes monopolaires	38
Figure II.8	Connexion des électrodes bipolaires	38
Figure II.9	Diagramme de prédominance des espèces aluminium en fonction du pH	39
Figure III.1	Les solutions fille dilués à partir de la solution mère à 1 g/l.	45
Figure III.2	Montage expérimentale du procédé d'électrocoagulation	46
Figure IV.1	Balayage de la longueur d'onde à différentes pH	50
Figure IV.2	Balayage de la longueur d'onde à différentes concentrations en colorant	49
Figure IV.3	Courbe d'étalonnage	49
Figure IV.4	Influence de l'intensité du courant sur le taux de décoloration (pH=8.6, C= 50 mg/l, [NaCl]=1g/l,)	51
Figure IV.5	Influence de la conductivité sur le taux de décoloration (pH=8.6, C= 50 mg/l, I=2.5A)	53
Figure IV.6	Influence de pH sur le taux de décoloration ([NaCl]=1g/l, C= 50 mg/l, I=2.5A)	54
Figure IV.7	Evolution de pH en fonction du temps	55
Figure IV.8	Influence de concentration du colorant sur le taux de décoloration ([NaCl]=1g/l, pH =8.6, I=2.5A)	56
Figure IV.9	Influence du nombre d'électrodes sur le taux de décoloration (a) I = 1.5 A, (b) I =2.5 A, (c) I =3.15 A (pH=8.6, C= 50 mg/l, [NaCl]=1g/l)	58
Figure IV.10	Influence du nombre d'électrodes sur le taux de décoloration (a) [NaCl] = 0.5 g/l, (b) [NaCl] =1 g/l, (c) [NaCl]= 1.5 g/l (pH=8.6, C= 50 mg/l, I=2.5A)	60

Figure IV.11	Influence du nombre d'électrodes sur le taux de décoloration (a) pH = 6, (b) pH =8, (c) pH= 10. ([NaCl]=1g/l, C= 50 mg/l, I=2.5A)	61
Figure IV.12	Influence du nombre d'électrodes sur le taux de décoloration (a) C = 10mg/l, (b) C =30mg/l, C=50mg/l. ([NaCl]=1g/l, pH =8.6, I=2.5A)	63
Figure IV.13	Résultat final du traitement d'eau colorée par électrocoagulation	64

Liste des tableaux :

N° du tableau	Titre	Page
Tableau I.1	Présentation des différentes activités d'une entreprise textile et les effluents associés	10
Tableau I.2	Principaux groupements chromophores et auxochromes, classés par intensité croissante	12
Tableau I.3	Taux de fixation sur textile pour les différentes classes de colorants	24
Tableau I.4	Valeurs limites de quelques paramètres pour les effluents textile	24
Tableau III.1	Les propriétés chimiques et physiques de violet de gentiane	43
Tableau III.2	Concentration de colorant à différents volumes de dilution	44
Tableau IV.1	Les paramètres influençant le procédé d'électrocoagulation	50
Tableau IV.2	Conditions opératoires pour les essais de l'influence de l'intensité de courant	51
Tableau IV.3	Conditions opératoires pour les essais de l'influence de la conductivité	52
Tableau IV.4	Conditions opératoires pour les essais de l'influence de pH	54
Tableau IV.5	Conditions opératoires pour les essais de l'influence de concentration du colorant	55

L'eau est l'élément central de tous les processus socio-économiques, quel soit le degré de développement de la société, l'eau n'est donc pas uniquement un espace vital, un vecteur énergétique ou un moyen de transport, mais également un élément essentiel pour tout genre de production [Chenna, 2016]. L'économie de l'eau pour sauver la planète et pour faire l'avenir d'humanité est ce que nous avons besoin maintenant. Depuis le début de l'industrialisations, le volume d'eaux usées industrielles à traiter a considérablement augmenté, tout comme la demande en eaux provenant des besoins de la population.

La contamination du l'eau par diverses substances organiques engendre un changement dans ses propriété. Ces eaux dites polluées contiennent de nombreuses substance organiques et inorganiques susceptibles de nuire gravement à l'environnement.

Les facteurs organoleptiques regroupent la couleur, la turbidité, l'odeur et la saveur. Plutôt subjectifs, ils constituent souvent les facteurs d'alerte pour une pollution sans pour autant présenter à coup sûr un risque pour la santé, la turbidité est liée à la présence de matières en suspension, elle gêne l'efficacité des traitements de désinfection

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 peut 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].

Une des méthodes physico chimiques les plus utilisées en guise de remède pour les problèmes engendré par les matières en suspension (paramètre responsable à la couleur des eaux) est la coagulation. C'est un processus qui permet l'élimination des particules colloïdales grâce à leur déstabilisation chimique, par addition d'électrolytes. Elle est suivie de leur agrégation en particules plus grosses ou floccs (floculation), puis de leur précipitation sous forme d'hydroxydes [Ammouche et Slimani, 2017].

La coagulation peut, d'autres parts, être induite par l'action d'un champ électrique, dans une cellule électrochimique donnant lieu à l'électrocoagulation [Ammouche et Slimani, 2017]. Le champ électrique régnant dans la cellule d'électrolyse entraîne la migration des

particules colloïdales vers l'anode, ce qui a pour effet d'accroître leur probabilité de rencontre, donc de favoriser la coagulation et la floculation [Lemlikchi, 2012]. Des particules facilitant ainsi leur élimination par des processus physiques tels que la filtration, la décantation ou la sédimentation. L'électrolyse de l'eau entraîne aussi la formation de petites bulles d'oxygène et d'hydrogène (dont la taille moyenne est inférieure à 100 micromètres). Ces microbulles s'adsorbent alors sur les matières floculées et conduit à la flottation.

L'objectif de notre travail, consiste à l'application d'un procédé d'EC en vue de l'élimination d'un colorant textile, cas du Gentiane Violet en utilisant des électrodes en aluminium.

- Le chapitre I est l'étude bibliographique de la pollution des eaux résiduaires avec une présentation de l'industrie textile et les rejets qu'elles génèrent ainsi que une vue général sur les traitements possible.
- Le chapitre II est une synthèse sur le procédés d'électrocoagulation, son principes, ces applications, les différentes lois qui les réagissent ainsi que ces avantages et inconvénients.
- Le chapitre III décrit, les matériels et les méthodes utilisé pour le traitement ainsi que le dispositif expérimental mis au point,
- Le chapitre IV présente l'ensemble des résultats obtenus, 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 d'intensité de courant,
- L'effet de conductivité,
- L'effet de pH,
- L'effet de la concentration en colorant.

Une conclusion générale viendra clore ce manuscrit.

CHAPITRE 1

GENERALITES

I.1.Introduction :

Les eaux usées urbaines sont des eaux altérées principalement par l'activité humaine et par le ruissellement des eaux pluviales. Ces eaux dites polluées contiennent de nombreuses substances organiques et inorganiques susceptibles de nuire gravement à l'environnement [Zaviska, 2011]. Ces eaux sont considérées comme polluées et ne peuvent être rejetées dans les eaux réceptrices sans traitement préalable. En effet, les cours d'eau ont une capacité naturelle d'épuration, mais cette capacité a pour effet de consommer l'oxygène de la rivière et n'est pas sans conséquences sur la faune et la flore aquatique. Lorsque l'importance du rejet excède la capacité d'autoépuration de la rivière, la détérioration de l'environnement peut être durable [Zaviska, 2011].

Pour protéger la santé publique et l'environnement, il est nécessaire de connaître :

- les constituants qui composent les eaux usées,
- les impacts de ces constituants quand les eaux usées sont dispersées dans l'environnement,
- la transformation et le cheminement (la destination) à long terme de ces constituants dans les processus de traitement,
- les méthodes de traitement qui peuvent être utilisées pour enlever ou modifier les constituants trouvés dans les eaux usées.

De nombreux procédés sont mis en œuvre, tels que la coagulation-floculation, l'osmose inverse, l'oxydation chimique...etc. Cependant, du fait de la composition très variable de ces eaux et à cause de la complexité de la manipulation des produits chimiques, la plupart de ces méthodes conventionnelles commencent à s'avérer insuffisantes pour un traitement simple et efficace et nécessitant une consommation minimale en réactifs [Abbas et Messaad, 2017].

Dans ce chapitre, nous allons présenter une synthèse bibliographique, regroupant des généralités sur la pollution des eaux, leurs origines ainsi que leurs paramètres. Nous exposerons également les différents types de colorants appartenant au domaine du textile. Un intérêt a été donné ensuite pour les méthodes de traitements qui s'y rapportent.

I.2.Pollution des eaux résiduaires :

I.2.1.Définition des eaux usées:

La pollution de l'eau s'entend comme, une modification défavorable ou nocive des propriétés physico-chimique et biologique, et le rende impropre à l'utilisation normale établit [Ularbi et Maharzi, 2016].

I.2.2.Origine et nature des eaux usées :

Les charges polluantes contenues dans les eaux résiduaires ont des origines diverses. Le rejet de ces eaux dans le milieu naturel est la principale pollution qui affecte nos cours d'eaux et plus généralement tout le milieu naturel. Ces substances polluantes peuvent avoir différentes origines [Alem, 2016] :

I.2.2.1.Origine domestique :

Ce sont les eaux qui proviennent généralement des habitations «eaux ménagères et eaux vannes» qui sont présentées comme un mélange de matières non dissoutes dans une solution aqueuse de matières organiques et minérales [Alem, 2016].

En général, ces eaux sont chargées en matières organiques, graisses et des produits d'entretiens ménagers. Elles présentent une bonne biodégradabilité [Salmi et Slimani, 2014].

I.2.2.2.Origine agricole :

L'agriculture constitue la première cause de pollutions diffuses. Lorsque l'on considère les pollutions d'origine agricole, il faut englober à la fois celles qui ont trait aux cultures et à l'élevage. Les causes des différentes formes de pollution agricole sont multiples :

- De fortes teneurs en sels minéraux « azote, phosphore, potassium» provenant des engrais, des purins et lisiers (élevage) ;
- La présence de produits chimiques de traitement (pesticides, herbicides... etc.) ;
- Les déjections animales qui accompagnent les élevages intensifs et les résidus d'antibiotiques utilisés contre les infections animales ou pour favoriser leur croissance [Alem, 2016].

Ce sont des eaux de drainage et des rejets de fermes [Zaviska, 2011].Elles ont une valeur fertilisante très importante [Zaviska, 2011].

I.2.2.3.Origine naturelle :

Les eaux de pluie ruissellent dans les rues où sont accumulées polluants atmosphériques, poussières, détritrus, suies de combustion et hydrocarbures rejetés par les véhicules. Les eaux de pluie, collectées normalement à la fois avec les eaux usées puis déversées dans la canalisation d'assainissement et acheminées vers une station d'épuration, sont souvent drainées directement dans les rivières entraînant ainsi une pollution intense du milieu aquatique [Ularbi et Maharzi, 2016].

I.2.2.4.Origine industrielle :

Les eaux résiduaires proviennent principalement de l'eau consommée dans de nombreuses opérations de fabrication par voie humide, comme par exemple: la précipitation, le lavage, le nettoyage des appareils, les ateliers, les filtrations, les distillations, etc. [Abbas et Messaad, 2017].

Leurs caractéristiques varient d'une industrie à l'autre. En plus des matières organiques, azotées ou phosphorées, elles sont chargées en différentes substances chimiques organiques et métalliques. Selon leur origine industrielle elles peuvent également contenir:

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

Avant d'être rejetées dans les réseaux de collecte, les eaux usées industrielles doivent faire l'objet d'un traitement. Elles ne sont mélangées aux eaux domestiques que lorsqu'elles ne présentent plus de danger pour les réseaux de collecte et ne perturbent pas le fonctionnement des stations d'épurations [Ularbi et Maharzi, 2016].

I.2.3. Les paramètres de pollution :

Il existe plusieurs manières de classer la pollution. Selon le type de polluant, on peut classer les paramètres de pollution en quatre catégories : paramètres physicochimique, paramètres organoleptique et paramètres biologique.

I.2.3.1. Paramètres physicochimiques :

a) MES (Matières en suspension) : On appelle matières en suspension les très fines particules en suspension (sable, argile, produits organiques, particules de produits polluant, micro-organismes,...) qui donnent un aspect trouble à l'eau.

b) Température : La température a un impact sur tous les processus physico-chimiques et biologiques dans la nature. Elle intervient aussi dans l'efficacité de certains traitements tels que la décantation, la coagulation-floculation et la désinfection.

c) MVS (Matières volatiles en suspension) : Les matières volatiles en suspension représentent la fraction organique dite volatile de MES parce qu'elle est calcinée à 550 °C. Le rapport MVS/MES indiquera l'organicité de l'effluent.

d) Conductivité : La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes. La plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement. La mesure de la conductivité permet donc d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau. Elle est mesurée à l'aide d'un conductimètre, et l'unité utilisée est le milli-siemens/cm (mS/cm) ou le micro-siemens/cm (µS/cm).

e) Potentiel d'hydrogène (pH) : Ce paramètre donne le degré d'acidité ou d'alcalinité d'une eau. L'eau des cours d'eaux avoisine en général la neutralité représentée par un pH de 7. Le pH doit être compris entre 6,5 et 8,5 pour permettre la vie aquatique.

f) Oxygène dissous : La concentration en oxygène dissous est un paramètre utilisé pour mesurer la qualité du milieu aqueux. Sa concentration est liée aux paramètres physico-chimiques et à l'activité biologique. L'oxygène dissous provient de :

- La diffusion de l'oxygène en surface.
- L'aération (mouvement de l'eau).
- La photosynthèse.

g) salinité : La salinité, S , définie comme la concentration en sel, également exprimée en g/kg d'eau de mer ou ‰. La salinité moyenne de l'eau de mer est de 34.5 ‰.

h) La demande biologique en oxygène (DBO) : C'est un paramètre global qui exprime la quantité d'oxygène qu'une biomasse épuratrice va consommer pour décomposer les matières organiques contenues dans l'effluent avec le concours des microorganismes (bactéries) présents dans celui-ci. Elle est généralement mesurée en 5 jours (DBO_5) en mg/L d'oxygène consommé à 20 °C.

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

j) L'azote (N) : L'azote peut se trouver sous forme minérale (ammoniacal, nitrate) ou organique. On a :

- Les nitrates (NO_3^-) qui constituent le stade final de l'oxydation de l'azote.
- Les nitrites (NO_2^-) qui constituent une étape importante dans le cycle de l'azote, ils s'insèrent entre l'ammoniaque et les nitrates.
- L'ammoniaque (NH_4^+) qui constitue la forme réduite de l'azote.

k) Le phosphore (P) : Il se trouve sous forme minérale ou organique. Élément indispensable à la vie des algues, la présence de phosphore entraîne un risque d'eutrophisation des cours d'eau ou des lacs, c'est -à- dire, que celui-ci peut se voir envahi par un développement excessif de la population algale.

l) Les métaux lourds : Ce sont les métaux dont le poids atomique est supérieur à celui du fer (55,845 g/mole). Ils sont pour certains très dangereux parce que potentiellement toxiques, non-biodégradables et bio-a cumulables dans les chaînes alimentaires. Ils sont principalement d'origine industrielle.

I.2.3.2. Paramètres organoleptiques [Abbas et Messaad, 2017]:

a) La coloration : La couleur de l'eau peut provenir de substances minérales comme le fer ou le manganèse et/ou de substances organiques colloïdales. Les substances organiques comprennent généralement des déchets végétaux et animaux.

b) Odeur – Saveur : Dans l'eau, diverses molécules sont responsables des odeurs. Elles proviennent des composés azotés ou soufrés : (amines, ammoniacque...). Mais la molécule qui pose le plus de problème est l'hydrogène sulfuré (H₂S), qui possède une odeur caractéristique d'œuf pourri. La saveur de l'eau est due à de nombreuses molécules (fer, manganèse, le chlore actif...) et ne révèle pas si l'eau est polluée ou non. Des eaux peuvent avoir une saveur salée.

c) Turbidité : C'est un paramètre, qui varie en fonction des composés colloïdaux (argiles) ou aux acides humiques (dégradation des végétaux) mais aussi pollutions qui troublent l'eau. On mesure la résistance qu'elle oppose par l'eau au passage de la lumière pour lui donner une valeur. La turbidité se mesure à l'aide d'un turbidimètre, et l'unité principale est le NTU (Néphélométric Turbidity Unit).

I.2.3.3. Paramètres biologiques :

La pollution est liée au surdéveloppement de micro-organismes (bactéries, virus...) ou de végétaux micro ou macroscopiques (champignons) qui provoquent un déséquilibre du milieu environnant.

I.3. Les eaux résiduaires industrielles :

Les eaux résiduaires industrielles sont celles en provenance des diverses usines, qui sont des déchets liquides obtenues lors de l'extraction et de la transformation de matières premières en produits industriels. Elles contiennent les substances plus diverses, pouvant être acides ou alcalines, corrosives ou entartrantes, à températures très élevées, souvent odorantes et colorées [Alem, 2016].

I.3.1. Présentation de l'industrie textile :

L'industrie textile rassemble de très nombreux métiers tout au long d'une chaîne de transformations partant de matières premières fibreuses jusqu'à des produits semi-ouvrés ou entièrement manufacturés.

La première étape consiste en la transformation de matières premières issues de fibres naturelles, artificielles ou synthétiques en fils. Les métiers associés sont la filature, le guipage, le moulinage ou encore la texturation. A partir des fils unidimensionnels, les techniques de tissage et de tricotage permettent d'obtenir des surfaces textiles bidimensionnelles (voire tridimensionnelles). Ces surfaces sont alors très souvent ennoblies pour leur donner de la

couleur (teinture, impression) ou des propriétés particulières (apprêts chimiques, apprêts mécaniques, enduction, contre-collage, etc. [Salmi et Slimani, 2014].

I.3.2. Activité de l'industrie textile :

L'industrie textile comprend essentiellement deux types d'activité: activité mécanique et activité d'ennoblissement.

A/ L'activité mécanique : Elle regroupe les opérations de filature et de tissage. Ces opérations peuvent être définies comme suit :

- **Filature :** on désigne sous le nom de filature, l'ensemble des opérations industrielles qui transforment la matière textile en fil.
- **Tissage :** c'est l'opération qui consiste à entrecroiser les fibres perpendiculairement les unes aux autres pour en former des tissus.

B/ La finition textile (ou ennoblissement) : Elle regroupe les opérations de blanchiment, de teinture, d'impression et d'apprêts :

- **Le blanchiment :** c'est une opération ou un ensemble d'opérations industrielles qui ont pour but de décolorer les fibres textiles.
- **La teinture :** elle est destinée à donner à une fibre, un fil ou un tissu dans toute sa longueur et dans toute son épaisseur, une teinte uniforme, différente de sa teinte habituelle. Elle s'obtient en fixant un colorant sur la fibre d'une manière durable.
- **L'impression :** a pour but d'obtenir des dessins blancs ou colorés à la surface des tissus.
- **Les apprêts :** on donne le nom d'apprêts aux divers traitements mécaniques ou chimiques que l'on fait subir aux fils et aux tissus avant ou après les opérations de blanchiment, teinture et impression [Abbas et Messaad, 2017].

I.3.3. Les rejets de l'industrie textile :

Les eaux usées industrielles issues de la fabrication des textiles sont généralement alcalines et ont des charges en DBO et DCO très élevées. Les polluants présents dans les effluents de l'industrie textile englobent des solides en suspension, des huiles minérales (des agents anti-moussants, de la graisse, des huiles d'ensimage) et des composés organiques. Ainsi les flots d'effluents produits par les processus de teinture sont généralement chauds, colorés et peuvent

renfermer des concentrations importantes de métaux lourds et des produits toxiques [Alem, 2016]. Les différentes étapes d'une entreprise textile et les effluents associés sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau I.1 : Présentation des différentes activités d'une entreprise textile et les effluents associés [Alem, 2016].

Activités	Rejets associés
Préparation de la laine.	Rejets liquides fortement chargés en matières en suspension et matières organiques.
Filature.	<ul style="list-style-type: none"> • 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). • Rejets gazeux constitués essentiellement de poussières.
Tissage/Tricotage.	<ul style="list-style-type: none"> • Présence de poussières ; • Présence d'agents d'encollage. <p>Mais faible consommation en eau, activité considérée comme peu polluante.</p>
Ennoblement: Prétraitement (désencollage, désensimage, débouillissage, mercerisage)	<ul style="list-style-type: none"> • 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 (surtout au niveau du désencollage). • 7% du volume des effluents liés à l'ennoblissement.
Le blanchiment	<ul style="list-style-type: none"> • Eaux de blanchiment (présence d'organochlorés). • 69% du volume des effluents liés à l'ennoblissement.
Teinture	<ul style="list-style-type: none"> • Essentiellement constitués d'eau, de colorants non fixés (colorants utilisés souvent insolubles dans l'eau). • 12% du volume des effluents liés à l'ennoblissement.
Impression	<ul style="list-style-type: none"> • Eaux d'impression : colorants (même type qu'en teinture mais en concentrations plus importantes), liants, adjuvants (fixation des colorants), épaississant (pour éviter le coulage de la couleur). • 10% du volume des effluents liés à l'ennoblissement.
Apprêts chimiques	<ul style="list-style-type: none"> • Eaux de vidange et de nettoyage des machines (produits chimique). • 2% du volume des effluents liés à l'ennoblissement. • Rejets gazeux.

I.4. les colorants :

De tout temps, l'homme a utilisé les colorants pour ses vêtements, pour sa nourriture et pour la décoration de son habitation. Ainsi, dès l'antiquité, il a su extraire les matières colorantes à partir de végétaux comme l'indigo et d'animaux comme le carmin extrait de la cochenille. Ceci a permis le développement du commerce entre les différentes peuplades de l'époque. L'utilisation de ces colorants naturels s'est prolongée jusqu'à la première moitié du XIX^{ème} siècle. Ils furent ensuite progressivement remplacés par des colorants synthétiques, lesquels sont mieux adaptés à de nombreux usages particuliers. On sait que la couleur résulte d'une part, de l'interaction entre le rayonnement du spectre visible et de la matière et d'autre part, elle est le complément de la radiation absorbée (c'est-à-dire que la couleur observée résulte de la superposition des radiations non absorbées). Ceci se traduit par des transitions électroniques des orbitales moléculaires de l'état fondamental vers celles de l'état excité [Aliouche,2007].

Les matières colorantes se divisent en deux grands groupes définis par la norme DIN 55944 [Lecomte].

- ❖ Colorant : matière colorante soluble dans les solvants et les substrats.
- ❖ Pigment : matière colorante insoluble dans les solvants et les substrats [Merouani, 2011].

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 traitements [Merouani, 2011]. 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. L'affinité du colorant pour la fibre est particulièrement développée pour les colorants qui possèdent un caractère acide ou basique accentué. Ces caractéristiques propres aux colorants organiques accroissent leur persistance dans l'environnement et les rendent peu disposés à la biodégradation [Chebli, 2012].

I.4.1.Définition :

Un colorant est défini comme étant un produit capable de teindre une substance d’une manière durable. Il possède des groupements qui lui confèrent la couleur: appelés chromophores et des groupements qui permettent sa fixation auxochromes [Lamri, 2010].

Les colorants sont des composés non dégradables par les micro-organismes, ces rejets toxiques et nocifs pour les eaux superficielles et de profondeur, présentent un danger certain pour l’homme et l’animal. Les colorants synthétiques ont presque complètement supplantés les colorants naturels. Les colorants azoïques constituent la famille la plus importante sur le plan de l'application, puisqu'ils représentent plus de 50% de la production mondiale de matières colorantes [Anouar et al, 2014].

Tableau I.2: Principaux groupements chromophores et auxochromes, classés par intensité croissante [Hammami, 2008].

Groupements chromophores	Groupements auxochromes
Azo (-N=N-)	Amino (-NH ₂)
Nitroso (-NO ou -N-OH)	Méthylamino (-NHCH ₃)
Carbonyle (=C=O)	Diméthylamino (-N(CH ₃) ₂)
Vinyle (-C=C-)	Hydroxyle (-HO)
Nitro (-NO ₂ ou =NO-OH)	Alkoxy (-OR)
Sulfure (>C=S)	Groupements donneurs d’électrons

I.4.2.Utilisation des colorants :

L’industrie des colorants constitue un marché économique considérable car de nombreux produits industriels peuvent être colorés, principalement:

- pigments (industrie des matières plastiques);
- encre, papier (imprimerie);
- colorants alimentaires (industrie agro-alimentaire);
- pigments des peintures, matériaux de construction, céramiques (industrie du bâtiment);
- colorants capillaires (industrie des cosmétiques);
- colorants et conservateurs (industrie pharmaceutique);
- carburants et huiles (industrie automobile etc.,...);

- colorants textiles à usage vestimentaire, de décoration, du bâtiment, du transport, colorants textiles à usage médical etc. [Salmi et Slimani, 2014].

I.4.3. Classification des colorants :

Les colorants textiles peuvent être classés selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'application aux différents substrats (textiles, papier, cuir, matières plastiques, etc.) [Guitouni, 2017].

I.4.3.1. Classification chimique :

Le classement des colorants selon leur structure chimique repose sur la nature du groupement chromophore [Benamraoui, 2014].

➤ Les colorants azoïques :

La spécificité des colorants azoïques est caractérisés par l'unissant de deux noyaux benzéniques formants un groupement fonctionnel azo (-N=N-) [Guitouni, 2017].

Les colorants azoïques se répartissent en plusieurs catégories: les colorants basiques, acides, directs et réactifs solubles dans l'eau, et les azoïques dispersés et à mordant non-ioniques insolubles dans l'eau. Or ces composés organiques cancérigènes sont réfractaires aux procédés de traitements habituellement mis en œuvre et sont très résistants à la biodégradation [Lamri, 2010].

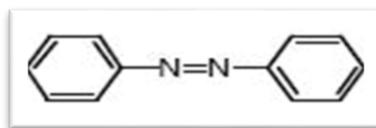


Figure I.1 : la formule chimique des colorants azoïques

➤ Les colorants triphénylméthanes :

Les colorants triphénylméthanes dérivent du triphénylméthane, qui est un hydrocarbure possédant trois cycles phényle liés à un carbone central.

Les triphénylméthanes sont utilisés intensivement dans les industries papetières et textiles pour teindre le nylon, la laine, la soie et le coton. Leur utilisation ne se limite pas à l'industrie. On les retrouve également dans le domaine médical comme marqueur biologique et comme agent antifongique chez les poissons et la volaille [Lamri, 2010].

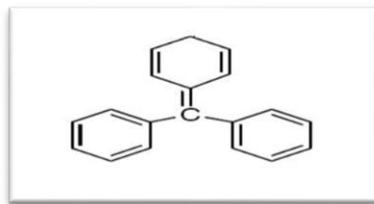


Figure I.2 : la formule chimique de triphénylméthane

➤ **Les colorants indigoïdes :**

Les colorants indigoïdes tirent leur appellation de l'indigo dont ils dérivent. Ainsi, les homologues séléniés, soufrés et oxygénés du bleu indigo provoquent d'importants effets hypochromes avec des coloris pouvant aller de l'orange au turquoise. Les colorants indigoïdes sont utilisés comme colorant en textile, comme additifs en produits pharmaceutiques, la confiserie, ainsi que dans des diagnostics médicaux [Lamri, 2010].

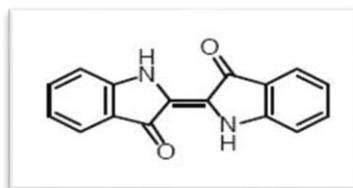


Figure I.3 : la formule chimique des colorants indigoïdes

➤ **Les colorants xanthènes :**

Les colorants xanthènes sont des composés qui constituent les dérivés de la fluorescéine halogénée. Ils sont dotés d'une intense fluorescence. Leur propriété de marqueurs lors d'accident maritime ou de traceurs d'écoulement pour des rivières souterraines est malgré tout bien établie. Ils sont aussi utilisés comme colorant en alimentaire, cosmétique, textile et impression [Lamri, 2010].

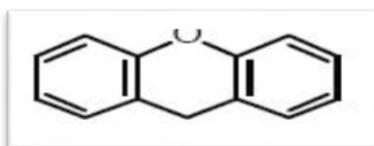


Figure I.4 : la formule chimique des colorant xanthènes

➤ **Les colorants anthraquinoniques :**

Leur formule générale dérivée de l'anthracène, montre que le chromophore est un noyau quinonique sur lequel peuvent s'attacher des groupes hydroxyles ou amino. Ces produits sont utilisés pour la coloration des fibres polyester, acétate et triacétate de Cellulose.

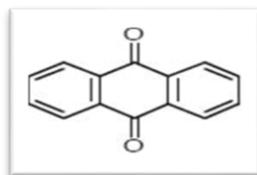


Figure I.5 : la formule chimique des colorants anthraquinoniques

➤ **Les phtalocyanines :**

Les phtalocyanines ont une structure complexe possédant un atome métallique central. Les colorants de ce groupe sont obtenus par réaction du dicyanobenzène en présence d'un halogénure métallique (Cu, Ni, Co, Pt, etc.).

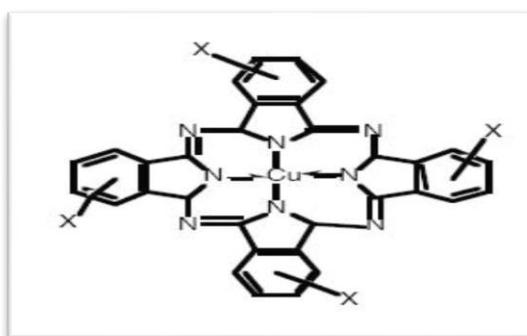


Figure I.6 : la formule chimique des phtalocyanines

➤ **Les colorants nitrés et nitrosés :**

Les colorants nitrés et nitrosés forment une classe de colorants très limitée en nombre et relativement ancienne. Ils sont actuellement encore utilisés, du fait de leur prix très modéré lié à la simplicité de leur structure moléculaire caractérisée par la présence d'un groupe nitro (-NO₂) en position ortho d'un groupement électrodonneur (hydroxyle ou groupes aminés).

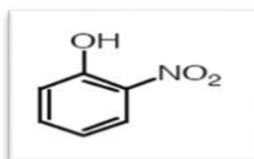


Figure I.7 : la formule chimique des colorants nitrés et nitrosés

I.4.3.2. Classification tinctoriale :

Si la classification chimique présente un intérêt pour le fabricant de matières colorantes, le teinturier préfère le classement par domaines d'application. Ainsi, il est renseigné sur la solubilité du colorant dans le bain de teinture, son affinité pour les diverses fibres et sur la nature de la fixation [Benamraoui, 2014].

➤ **Les colorants acides ou anioniques :**

Solubles dans l'eau grâce à leurs groupements sulfonates ou carboxylates, ils sont ainsi dénommés parce qu'ils permettent de teindre les fibres animales (laine et soie) et quelques fibres acryliques modifiées (nylon, polyamide) en bain légèrement acide. L'affinité colorant-fibre est le résultat de liaisons ioniques entre la partie acide sulfonique du colorant et les groupements amino des fibres textiles [Lamri, 2010].

➤ **Les colorants basiques ou cationiques :**

Les colorants basiques ou cationiques sont des sels d'amines organiques, ce qui leur confère une bonne solubilité dans l'eau. Les liaisons se font entre les sites cationiques des colorants et les sites anioniques des fibres. En phase de disparaître dans la teinture de la laine et de la soie, ces colorants ont bénéficié d'un regain d'intérêt avec l'apparition des fibres acryliques, sur lesquelles ils permettent des nuances très vives et résistantes [Lamri, 2010].

➤ **Les colorants réactifs :**

Les colorants réactifs font partie des groupes de colorants largement utilisés pour colorer les fibres cellulosiques, en particulier les tissus en coton. En raison de leur plus grande tendance à réagir avec l'eau par rapport aux hydroxyles présents dans les fibres de coton, la stabilisation des colorants sur les fibres est faible, alors que de grandes quantités pénètrent librement dans les eaux usées [Anushiravani, 2014].

➤ **Les colorants développés ou azoïques insolubles :**

Les colorants développés ou azoïques insolubles sont formés directement sur la fibre. Au cours d'une première étape, le support textile est imprégné d'une solution de naphтол (copulant). Les précurseurs de la molécule suffisamment petits pour diffuser dans les pores et les fibres sont ensuite traités avec une solution de sel de diazonium qui, par réaction de copulation entraîne le développement immédiat du colorant azoïque [Lamri, 2010].

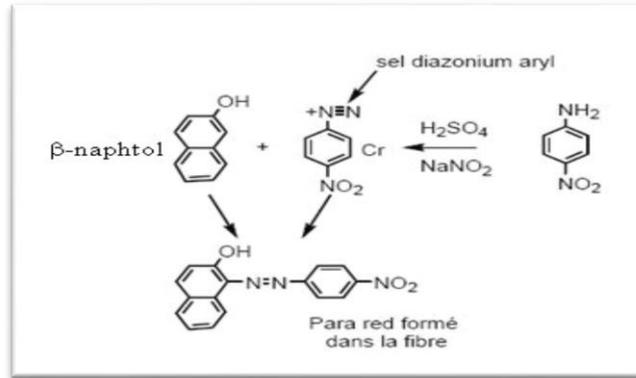


Figure I.8 : la formule chimique des colorants développés

➤ **Les colorants de cuve :**

Les colorants de cuve sont insolubles et doivent être transformés en leucodérivés par réduction alcaline. La teinture se termine par la réoxydation in situ du colorant sous sa forme insoluble initiale. Réputés pour leur bonne résistance aux agents de dégradation, les colorants de cuve sont encore utilisés, à l'image de l'indigo pour la teinture des articles jean ou denim [Lamri, 2010].

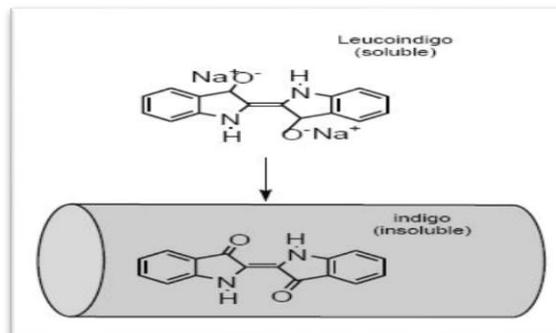


Figure I.9 : la formule chimique des colorants de cuve

➤ **les colorants directs :**

Les colorants directs contiennent ou sont capables de former des charges positives ou négatives électrostatiquement attirées par les charges des fibres, ils n'adhèrent pas chimiquement mais physiquement à la fibre [Benaissa, 2012]. Ils se distinguent par leur affinité pour les fibres cellulosiques sans application de mordant, liée à la structure plane de leur molécule [Lamri, 2010].

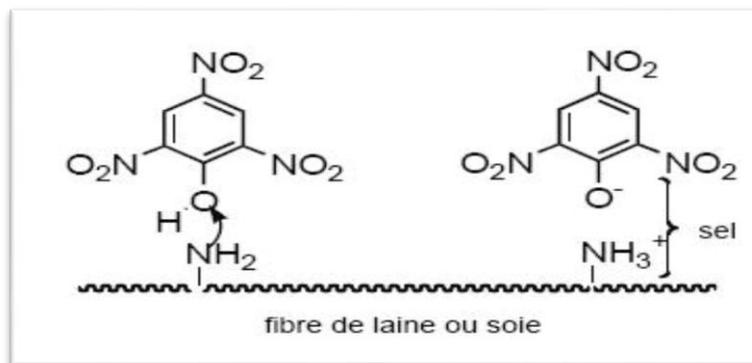


Figure I.10 : la formule chimique des colorants directs

➤ **Les colorants à mordants :**

Les colorants à mordants contiennent généralement un ligand fonctionnel capable de réagir fortement avec un sel d'aluminium, de chrome, de cobalt, de cuivre, de nickel ou de fer pour donner différents complexes colorés avec le textile [Lamri, 2010].

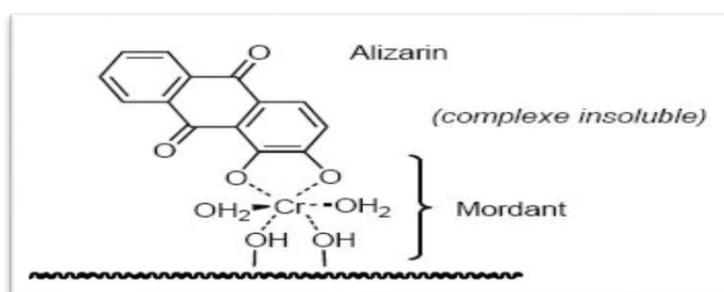


Figure I.11 : la formule chimique des colorants à mordants

• **Les colorants dispersés :**

Les colorants dispersés sont très peu solubles dans l'eau et sont appliqués sous forme d'une fine poudre dispersée dans le bain de teinture. Ils sont en mesure, lors d'une teinture à haute température, de diffuser dans les fibres synthétiques puis de s'y fixer [Lamri, 2010].

I.4.4. Le Gentiane Violet :

Le colorant que nous avons utilisé dans cette étude appartient à la classe des triphénylméthanes et porte le nom du « **Gentiane Violet** ».

➤ **Définition :**

Le triphénylméthane et ses homologues constituent les carbures fondamentaux d'où dérivent toute une série de matières colorantes, essentiellement des colorants basiques (vert

malachite, cristal violet,...etc.) Et des colorants acides. Les triarylméthanés sont des dérivés du méthane pour lesquels les atomes d'hydrogène sont remplacés par des groupes phényles substitués dont au moins un, est porteur d'un atome d'oxygène ou d'azote en para vis-à-vis du carbone méthanique. Un exemple de structure chimique est représenté dans la Figure I.12 [Ala, 2009].

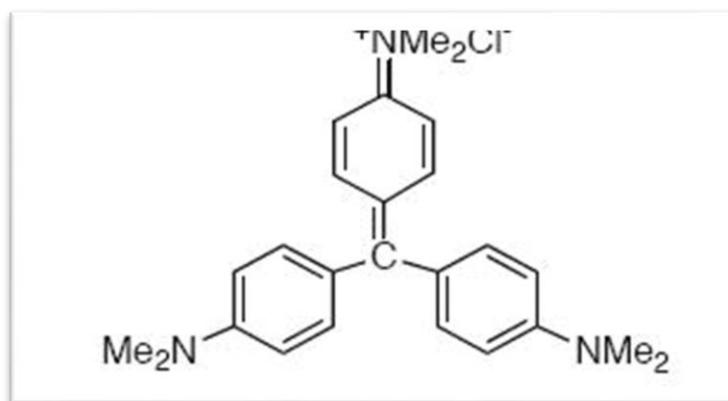


Figure I.12 : Structure chimique du colorant triphénylméthane "Gentian Violet" [Ala, 2009].

Le Violet de Gentiane fait partie des Violetes de méthyle, qui constituent un groupe de colorants basiques. C'est un mélange de chlorhydrates de violets 5- et 6-méthylés. (pentaméthylpa-rarosanine et violet hexaméthylé, appelé Cristal violet [Lecomte]. C'est une molécule complètement symétrique dans laquelle chaque groupe amino contient 2 groupes méthyle. Étant donné que le GV est un trimère de diméthylaniline stabilisé par résonance pour donner un composé très coloré, il y a six groupes méthyles [Maley et al, 2013].

La coloration intense des triphénylméthanés provient du large système conjugué de l'ion cationique. Le carbocation central est en conjugaison avec les trois noyaux benzéniques, lesquels la charge positive est fortement délocalisée [Ala, 2009].

Il possède des propriétés anti-bactériennes, antifongiques, anti-helminthiques, anti-trypanosomiennes, anti-angiogéniques et anti-tumorales. Le GV a une longue histoire et a été utilisé avec succès comme monothérapie et comme adjuvant au traitement dans une variété de maladies.

La synthèse de GV fut attribuée au chimiste français Charles Lauth en 1861 sous le nom de «Violet de Paris» et fut popularisée par George Grubler, un pharmacien allemand en 1880. Grubler commercialisait son colorant uniquement chez les biologistes et il n'était pas utilisé dans les textiles. 1884 Hans Gram note la fixation irréversible de GV par des bactéries Gram

positives, qui devient la base de la coloration de Gram pour catégoriser les bactéries. GV a été introduit comme antiseptique par Stilling en 1891, qu'il a commercialisé sous le nom de pyocyanine [Maley et al, 2013].

➤ **Toxicité :**

Les composés de la famille des triphénylméthanés sont des composés reconnus comme étant génotoxiques pour les cellules bactériennes et mammifères. le malachite green, colorant couramment utilisé en industrie et comme antifongique, est un composé fortement cytotoxique pour les mammifères [Ala, 2009].

La nature cancérigène des triphénylméthanés se manifeste principalement par leurs métabolites leuco dont les dérivés N-déméthylé sont obtenus par voie bactérienne, ou levure. Ces composés peuvent subir une activation métabolique semblable à celle observée avec les amines aromatiques, avant de réagir directement sur l'ADN. Dans le cas de la malachite green, c'est suite à l'exposition à son métabolite, le leuco malachite green, que le nombre de cancer chez les rats et les souris augment. Son homologue, le cristal violet, est dégradé par digestion bactérienne en une cétone de Michler et p-diméthylaminophenol (Figure I.13). Or ces composés sont facilement convertis par biodégradation en amines cancérigènes et mutagènes. Par conséquent, le traitement par voie biologique de tels composés est susceptible de rendre la solution plus toxique que celle du départ [Ala, 2009].

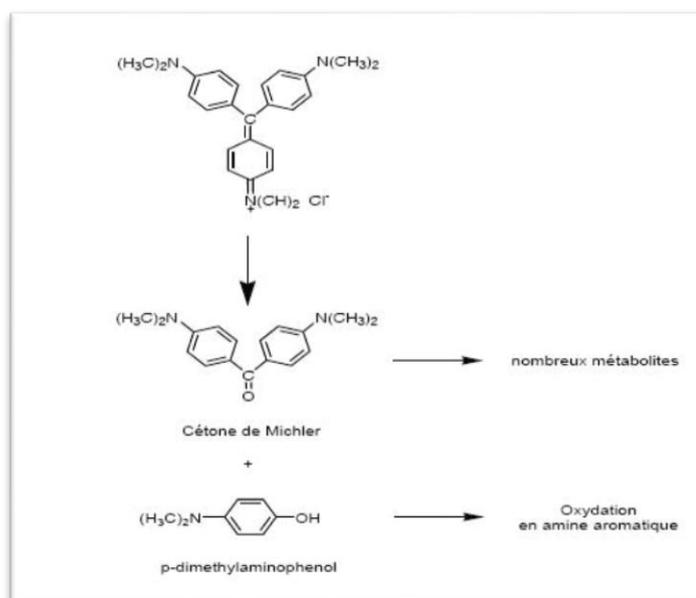


Figure I.13 : Dégradation du Cristal Violet par la bactérie «N. Corallina» [Ala, 2009]

I.5.Problèmes environnementaux et méthodes de traitement :

I.5.1. Problèmes environnementaux :

Les principales questions environnementales soulevées par les activités de l'industrie textile concernant essentiellement les rejets dans l'eau, les émissions dans l'air ainsi que la consommation d'énergie. La charge de pollution (en colorants) produite par les activités de l'industrie textile pose un problème pour l'environnement même à de très faible concentration inférieure à 1mg/l car ces polluants sont la plus part du temps toxiques, non biodégradable et résiste au traitement physicochimiques classique. Le problème majeur réside de la quantité considérable d'eau usée contenant des colorants résiduels qui sont rejetés en suite sous forme d'effluents aqueux qui est une source de pollution dramatique pour l'environnement [Chenna, 2016].

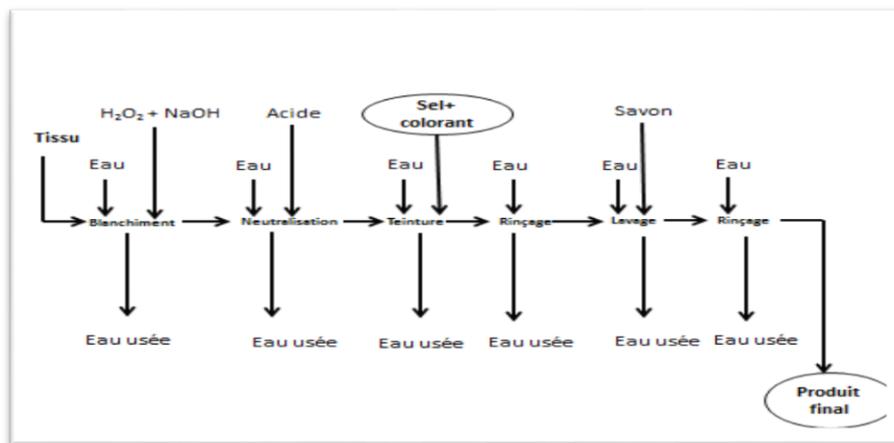


Figure I.14: Présentation d'un procédé d'ennoblissement textile [Ben Mansour et al, 2011].

I.5.1.1.Les dangers évidents :

- **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.

- **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.

- **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. 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.

I.5.1.2. Les dangers à long terme :

- **La persistance:**

Les colorants organiques synthétiques sont des composés impossibles à épurer par dégradations biologiques naturelles. Cette persistance est en étroite relation avec 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 [Merouani, 2011].

- **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 de pesticides, figure I.15)

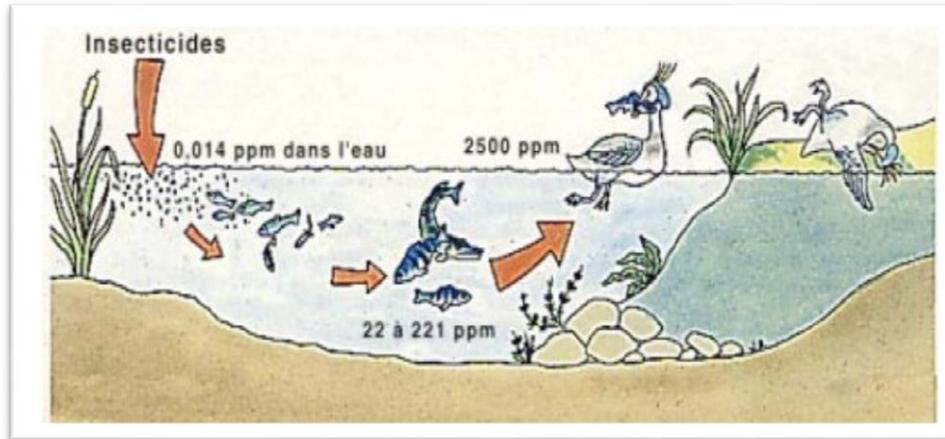


Figure I.15 : Conséquences de la bio-accumulation après déversement de substances toxiques (insecticides) dans un cours d'eau [Abbas et Messaad, 2017].

➤ **Cancer :**

Si la plupart des colorants ne sont pas toxiques directement, une portion significative de leurs métabolites l'est. Leurs effets mutagènes, tératogène ou cancérigène apparaissent après dégradation de la molécule initiale en sous-produits d'oxydation : amine cancérigène pour les azoïques, leuco-dérivé pour les triphénylméthanés [Merouani, 2011].

➤ **Sous-produits de chloration (SPC):**

Le chlore utilisé pour éliminer les microorganismes pathogènes réagit avec la matière organique pour former des trihalométhanes (THM) pouvant atteindre plusieurs centaines de mg/L. Les SPC sont responsables de développement de cancer du foie, des poumons, des reins et de la peau chez l'homme [Merouani, 2011].

I.5.2. Nécessité de traiter les effluents textiles :

Au cours des 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 (Tableau I.3). Ces rejets organiques sont toxiques et nécessitent une technique de dépollution adaptée [Lemlikchi, 2012].

L'affinité entre le textile et les colorants varie selon la structure chimique des colorants et le type des fibres sur lesquelles ils sont appliqués.

Tableau I.3 : Taux de fixation sur textile pour les différentes classes de colorants [Lemlikchi, 2012].

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	70-95	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 conception d'une chaîne de traitement assurant l'élimination des différents polluants par étapes successives [Lemlikchi, 2012].

I.5.3.Législation sur l'environnement :

Vus le grand danger que pose l'industrie textile et l'utilisation des colorants dans notre vie quotidienne sur l'environnement et notre santé, l'Algérie est comme tous les pays européens a mis une réglementation stricte N°06-141 sur les rejets des effluents textiles dans le milieu hydrique (Tableau I.4) [Salmi et Slimani, 2014].

Tableau I.4 : Valeurs limites de quelques paramètres pour les effluents textile [Salmi et Slimani, 2014].

Paramètres	Valeur limite
T (C°)	30
pH	6.5-8.5
DBO ₅ (mg/l)	150
DCO (mg/l)	250
Matières décantables (mg/l)	0.4
Matières non dissoutes (mg/l)	30
Oxydabilité (mg/l)	100
Permanganate (mg/l)	20

I.5.4. Le traitement des rejets textiles :

Le traitement des rejets textiles, compte tenu de leur hétérogénéité de composition, conduira toujours à la conception 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... etc.) et/ou de traitements physiques ou physico-chimiques assurant une séparation solide -liquide [Ala, 2009].

Les techniques de dépollution intervenant le plus couramment en deuxième étape dans les industries textiles se divisent en deux catégories [Benaïssa, 2012]:

I.5.4.1. Traitement Physicochimique :

Qui comprend :

- les méthodes de précipitation (coagulation, floculation, sédimentation),
- l'adsorption,
- l'osmose inverse, filtration,
- l'incinération.
- L'oxydation classique (oxygène, ozone, oxydants tels que NaOCl, H₂O₂),
- La réduction par (Na₂S₂O₄),
- La méthode complexométrique,
- L'échangeuse d'ions,
- Les procédés d'oxydation avancée (POA) (H₂O₂/UV, O₃/UV, TiO₂/UV, H₂O₂/Fe²⁺ (Fe³⁺)/UV, H₂O₂/Fe²⁺) [Benaïssa, 2012].
- **Adsorption sur charbon actif et autres matériaux :**

L'adsorption est un procédé d'élimination des polluants organiques ou minéraux présents dans des effluents aussi bien liquides que gazeux. Plusieurs modèles théoriques ont été élaborés pour décrire les mécanismes de ces phénomènes. Par ce procédé, le polluant est transféré de la phase fluide vers la surface du solide. Même avec le charbon actif considéré comme l'un des adsorbants les plus efficaces, ce mode de traitement reste très limité pour l'élimination de tous les colorants du fait de la cherté du charbon actif. Seuls les cationiques, colorant à mordant, dispersés ou dits de cuve et réactifs sont éliminés par cette technique [Lemlikchi, 2012].

➤ **Filtration sur membrane :**

Dans ce procédé, les polluants sont retenus par une membrane semi-perméable dont le diamètre des pores est inférieur à celui des molécules à éliminer. Cette technique est largement utilisée dans le dessalement de l'eau de mer. Selon la qualité de l'eau désirée, on distingue la microfiltration, l'ultrafiltration ou la nanofiltration ou encore l'osmose inverse [Lemlikchi, 2012].

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 [Nait Merzoug, 2014].

➤ **coagulation–floculation :**

Sous le terme de coagulation floculation, on entend tous les processus physicochimiques par les quels des particules colloïdales ou des solides en fine suspension sont transformés par des floculants chimiques en espèces plus visibles et séparables (les floccs). Les floccs formés sont ensuite séparés par décantation et filtration puis évacués. 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 soufrés, 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 et d'importantes quantités de boue sont formées avec ce procédé: leur régénération ou réutilisation reste la seule issue mais demande des investissements supplémentaires [Nait Merzoug, 2014]. Plusieurs travaux relatifs au traitement des rejets liquides des teintureries textiles contenant des colorants azoïques sulfonés ont été publiés. Les procédés employés pour leur élimination font généralement appel aux techniques de floculation, coagulation [Lemlikchi, 2012].

➤ **Oxydation chimique :**

Les techniques d'oxydation chimiques sont généralement appliquées pour le traitement des composés organiques dangereux présents en faibles concentrations, en prétraitement avant les

procédés biologiques pour diminuer la charge polluante, pour le traitement d'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. Hamada et al 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 cancérigènes pour l'homme [Lemlikchi, 2012].

I.5.4.2. Biologique :

Et qui compte:

- Le traitement aérobique,
- Le traitement anaérobique [Ala, 2009].

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 utilise pour l'épuration des milieux naturels. Ces procédés biologiques se produisent selon deux modes: traitements en aérobie (ils sont effectués en présence de l'oxygène) et traitement en anaérobie (dans ce cas les microorganismes dégradent la matière organique en absence de l'oxygène) [Lemlikchi, 2012].

CHAPITRE II

Electrocoagulation

II.1.Historique:

Le premier document rapportant l'utilisation de l'EC pour le traitement des effluents est un brevet américain déposé en 1880 par Webster qui utilisait des électrodes en fer. La même année, une station d'épuration fut construite sur la base de ce brevet, à Salford (Grande-Bretagne) pour traiter les eaux polluées urbaines [Ularbi et Maharzi, 2016].

En 1909, Harries dépose un nouveau brevet sur ce procédé : les anodes étaient alors constituées par des plaques de fer et d'aluminium. En 1912, deux autres stations de traitements des eaux usées furent construites sur ce principe, aux Etats-Unis. Cependant, leur fonctionnement fut stoppé, quelques années plus tard (1930), en raison du coût qui étaient deux fois plus élevé que celui d'un traitement classique

Le traitement de l'eau potable par électrocoagulation est appliqué, à grande échelle, pour la première fois aux Etats-Unis en 1946, ainsi qu'en 1956, HOLDEN a traité l'eau de rivière en Bretagne utilisant des électrodes en 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 [Inoussa, 2009].

L'électrochimie environnementale implique des techniques ou des méthodes électrochimiques pour éliminer ou réduire ou minimum la pollution environnementale [Ularbi et Maharzi, 2016].L'aspect non polluant et les facilités d'automatisation que l'électricité apporte, devraient permettre un développement significatif des techniques électrochimique de traitement dans les prochaines années [Bennajah, 2007].

Le procédé d'EC peut être utilisé seul ou en série avec d'autres procédés dans une chaîne de traitement des eaux. Il est possible d'identifier trois processus : le processus électrochimique, la coagulation et la phase de séparation (par flottation ou décantation).La

contribution de ces différents processus peut être conceptualisée grâce à un diagramme de Venn (Figure II.1) [Zodi, 2012].

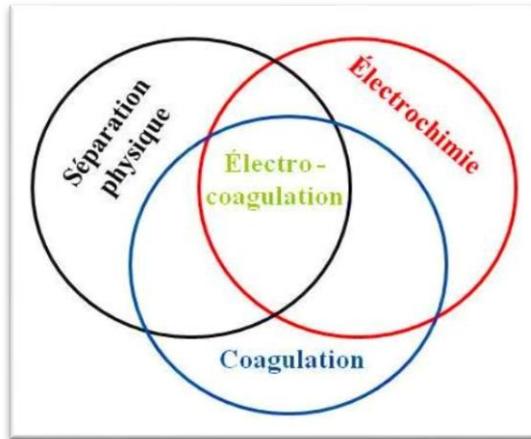


Figure II.1 : Diagramme de Venn des principaux processus formant le procédé d'électrocoagulation [Zodi, 2012].

➤ **Type de polluant à traiter (les solutions colloïdales) :**

Les solutions colloïdales présentent des propriétés intermédiaires entre celles d'une solution moléculaire ou ionique et celles d'un système solide. Elles diffèrent par leur taille, les plus fines étant les plus difficiles à éliminer, c'est-à-dire que ces dispersions colloïdales dépendent de la dispersion granulométrique et de la forme des particules mais aussi des forces d'interactions entre ces particules, ce qui se traduit par des collisions générées par un mouvement brownien important du fait de leur infime dimension.

L'efficacité de ces collisions entraîne une stabilité ainsi que d'autres propriétés de dispersions menant à l'agrégation. La dispersion est infiniment stable si toutes les collisions sont inefficaces. Ces phénomènes se présentent dans une très grande partie des eaux naturelles et surtout des eaux usées qui contiennent des particules affectant leur consommation ou leur réutilisation. Ces dernières sont soit des impuretés dissoutes ou des sels minéraux, des molécules organiques, des colloïdes ou des solides en suspension [Bensaid, 2009].

➤ **Classification granulométrique des colloïdes :**

La classification par taille, est une étape importante, dans l'étude des colloïdes. Elle est considérée comme base dans le choix de la technique adéquate pour chaque classe de taille

concernée. Quatre familles de particules sont généralement utilisées pour distinguer les différents contaminants des eaux usées urbaines :

- ✓ La fraction soluble composée de particules de tailles inférieures à $0,001 \mu\text{m}$.
- ✓ La fraction colloïdale composée de particules de taille comprise entre $0,001$ et $1 \mu\text{m}$;
- ✓ La fraction sédimentable ou décantable composée de particules de taille supérieure à $100 \mu\text{m}$ [Bensaid, 2009].

L'importance de l'EC est accrue du fait de son efficacité généralement supérieur aux autres techniques,

Il a été prouvé que cette technique offre la simplicité, l'efficacité, la compatibilité environnementale, la sécurité, la sélectivité, pour un faible coût en particulier lorsque l'électrocoagulation est comparée au traitement biologique [Bennajah, 2007]. En plus avec l'EC, on peut se passer de plusieurs étapes dans une installation de traitement des eaux [Ammouche et Slimani, 2017].

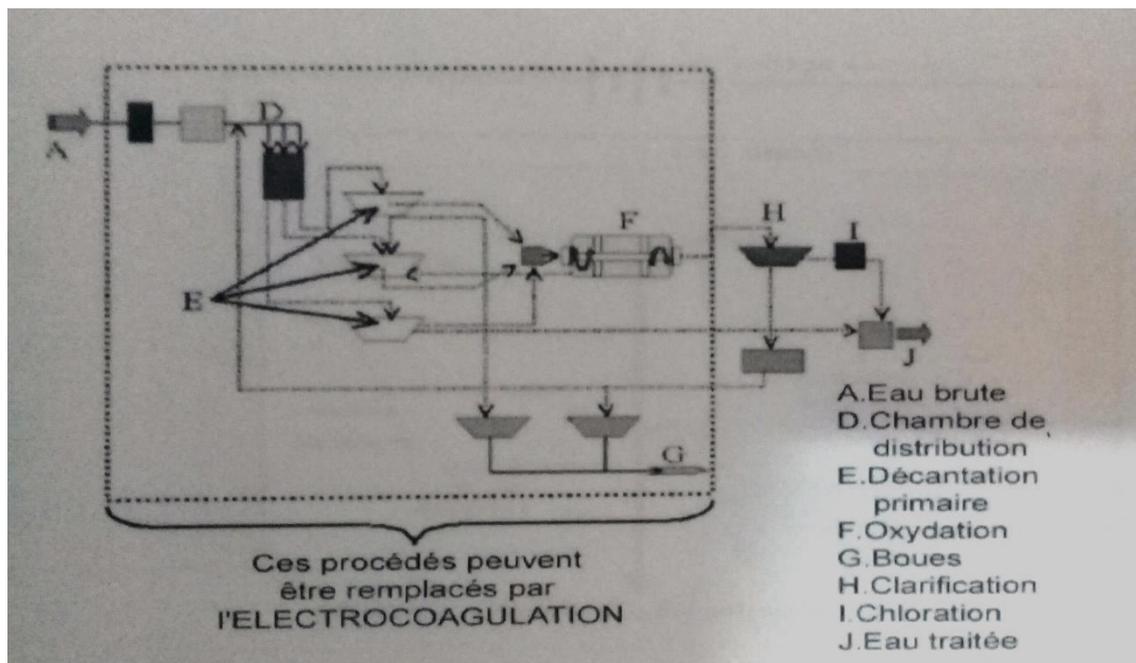


Figure II.2 : représentation schématique d'une installation typique de traitement des eaux, et les procédés complexes qui peuvent être remplacés par l'EC [Ammouche et Slimani, 2017].

II.2.Définition de l'EC :

L'électrocoagulation est une technique électrochimique, au cours de laquelle les matières dissoutes et en suspension peuvent être efficacement éliminées d'une solution par électrolyse [Ularbi et Maharzi, 2016].

II.3.Principe :

L'électrocoagulation est une technique dont le principe est le même que celui de la coagulation mais ajoute l'effet du champ électrique [Chenna, 2016]. Elle consiste à générer in situ dans la cellule d'électrolyse des ions (coagulants) susceptible de provoquer la coagulation des particules colloïdales par dissolution électrochimique d'un métal sacrificiel [Ammouche et Slimani, 2017].

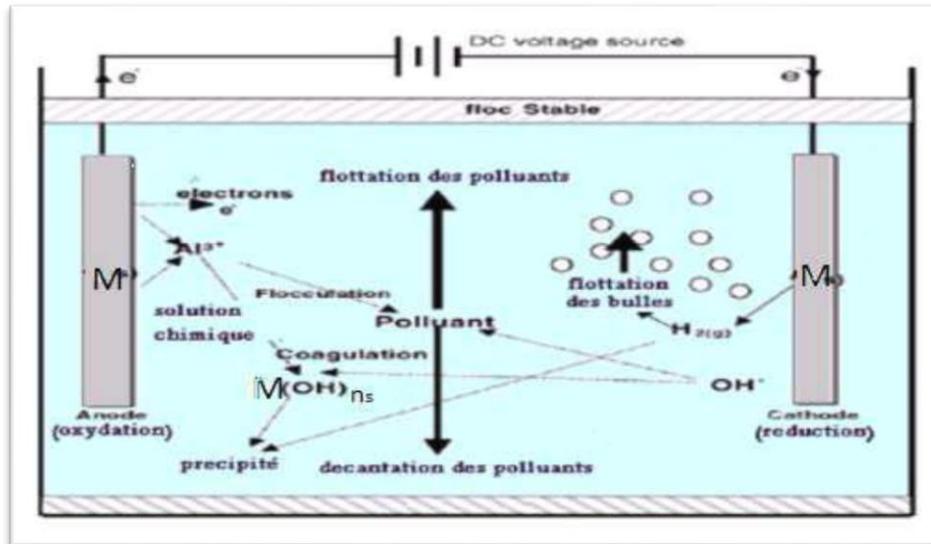


Figure II.3 : Schéma du principe de l'électrocoagulation [Lemlikchi, 2012].

Le processus d'électrocoagulation est résumé comme suit:

- a) La formation des coagulants par l'oxydation électrolytique de métaux sacrificiels
- b) La déstabilisation des contaminants, des polluants, des matières en suspension et la cassure des émulsions
- c) L'agrégation des phases déstabilisées pour former les floccs (hydroxydes métalliques-colloïdes) [Inoussa, 2009].

Les hydroxydes d'aluminium ainsi générés dans la solution, peuvent éliminer les polluants soit par complexation de surface où le polluant est comme un ligand qui se fixe chimiquement

à l'ion hydraté, soit par attraction électrostatique. D'une façon générale, les cations métalliques, lors de l'électrocoagulation jouent le même rôle de déstabilisation des colloïdes que les coagulants utilisés en coagulation chimique [Moukorab et al].

Les floes d'hydroxydes métalliques-colloïdes obtenus sont ensuite séparés du liquide purifié par électroflottation ou sédimentation.

Le pH de la suspension à traiter doit être neutralisé entre 6 et 8 de manière à favoriser la formation d'hydroxydes métalliques [Ularbi et Maharzi, 2016].

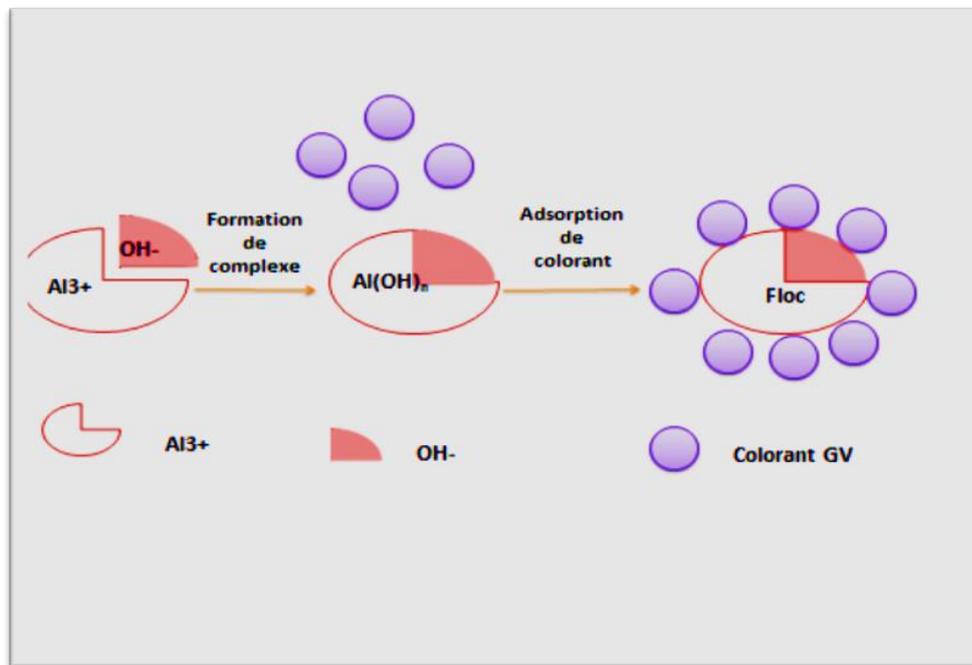


Figure II.4 : Le processus de formation d'hydroxydes métalliques-colloïdes

II.4.Principales lois d'électrolyse :

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

- A l'anode, l'oxydation du métal,
- A la cathode, la réduction de l'eau,

Il est possible de déterminer la masse de métal dissoute et d'hydrogène formé pendant une durée t d'électrolyse à un courant I , en utilisant la loi de Faraday :

$$m = \frac{I.t.M}{n.F} \quad (II.1)$$

m : masse du métal dissous ou de gaz formé (g).

I : intensité du courant imposé (A).

t : durée d'électrolyse (s).

M : poids moléculaire de l'élément considéré (g.mol⁻¹).

F : constante de Faraday (96500 C.mol⁻¹).

n : nombre d'électrons mis en jeu dans la réaction considérée [Bennajah, 2007].

Si le modèle d'électrolyse comprend p électrodes, et est alimenté par un liquide ayant un débit Q_e, alors :

$$C = \frac{m(p-1)}{Q_e} \quad (\text{II.2}).$$

Avec :

C : débit massique de métal dissous (kg.h/m³).

Q_e : débit d'alimentation de la cellule (m³/h).

p : nombre d'électrodes.

m : quantité théorique de métal dissous (kg).

Si d'autres réactions électrochimiques se déroulent simultanément, le courant d'électrolyse n'est pas entièrement utilisé par la réaction d'oxydation.

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

$$R_{\text{anode}} = \frac{m_{\text{exp}}}{m_{\text{thé}}} \cdot 100 \quad (\text{II.3})$$

m_{exp}: masse expérimentalement formée par la pesée de l'anode avant et après l'essai d'électrocoagulation et donnée par la relation suivante:

$$m_{\text{exp}} = m_1 - m_2 \quad (\text{II.4})$$

Où

m₁ : la masse de l'anode avant l'essai d'électrocoagulation

m₂ : la masse de l'anode après l'essai d'électrocoagulation.

m_{thé} : masse théorique donnée par la loi de Faraday.

➤ **Energie consommée:**

La consommation d'énergie dans le procédé d'électrocoagulation est calculée par l'équation suivante : [Ularbi et Maharzi, 2016]

$$E = \frac{I.U.t_{EC}}{V} \quad (II.5)$$

Avec:

E: énergie consommée (KW.h)

U: tension d'électrolyse (volt)

I: intensité de courant (A)

t_{EC}: temps d'électrolyse(h)

V: volume de l'eau usée traitée (m³).

II.5. Configuration des électrodes :

II.5.1. Les différents matériaux utilisés pour les électrodes :

Les anodes et les cathodes utilisées peuvent avoir différentes configurations. Elles peuvent se présenter sous forme de plaques, de boules, de sphères à lit fluidisé, de fil, de tige ou de tube. Ces électrodes peuvent être constituées de divers métaux qui sont choisis de manière à optimiser le procédé de traitement.

Les deux métaux communément utilisés sont le fer et l'aluminium .Cependant des essais ont été conduits sur d'autres types d'électrodes (Al/Cu) et (Fe/Cu) (Zn/Ni) [Inoussa, 2009].

II.5.2. Electrodes en aluminium:

L'aluminium est l'anode sacrificielle la plus fréquemment utilisée dans un réacteur d'électrocoagulation. Le comportement de l'aluminium en solution dépend de plusieurs paramètres (propriétés du polluant, le pH de la solution et sa concentration) [Ammouche et Slimani, 2017].

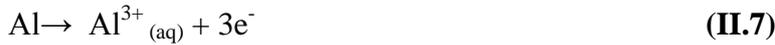
L'ion Al³⁺ réagit avec l'eau en attirant les ions OH⁻ pour former des complexes anioniques, cationiques ou neutres

Les ions hydroxyles proviennent de l'électrolyse de l'eau ou de l'ajout d'une solution basique à l'effluent [Inoussa, 2009].

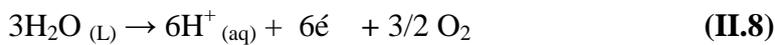
II.5.3.Réactions aux électrodes :

Les principales réactions qui se déroulent avec les électrodes (cas des électrodes en aluminium) sont :

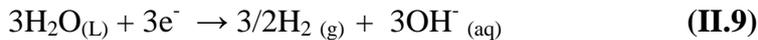
- à l'anode : Oxydation du métal, le métal passe de l'état solide à l'état ionique selon la réaction II.7



Si le potentiel positif est très important il peut y avoir formation d'oxygène selon la réaction (II.8).



- A la cathode la réduction de l'eau :



Ces réactions dépendent du pH de milieu (neutre ou basique), l'hydrogène est produit selon la réaction (II.9), alors qu'en milieu acide l'équation (II.10) décrit mieux l'évolution de l'hydrogène à la cathode.

La dissolution électrique de l'anode produit des espèces monomérique cationique telles que Al^{3+} et $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ à pH faible, qui sont transformés en $\text{Al}(\text{OH})_3$ aux valeur du pH appropriées et finalement sont polymérisés en $\text{Al}_n(\text{OH})^{3n+}$ [Tir,2008].

- Les mono complexes : $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$.
- Les poly complexes : $(\text{Al}_2(\text{OH})_2)^{4+}$, $\text{Al}_2(\text{OH})^{3+}$, $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$.
- les espèces amorphes et très peu solubles telles que $\text{Al}(\text{OH})_3$, et Al_2O_3 .

Les hydroxydes métalliques formés lors de Réaction II.5 s'impliquent dans des réactions de condensation ou de polymérisation. Ce qui conduit à la formation d'une substance gélatineuse blanche pour les hydroxydes d'aluminium Les complexes polymériques formés sont capables d'éliminer les polluants dissous et insolubles par des phénomènes d'adsorption, de complexation ou de précipitation [Dia, 2017].



II.5.4. Cellule électrolytique à deux électrodes :

Pour la plus simple de ses formes, une cellule d'EC est constituée d'une anode et d'une cathode reliées toutes deux à une source d'alimentation électrique Figure II.5 [Ammouche et Slimani, 2017].

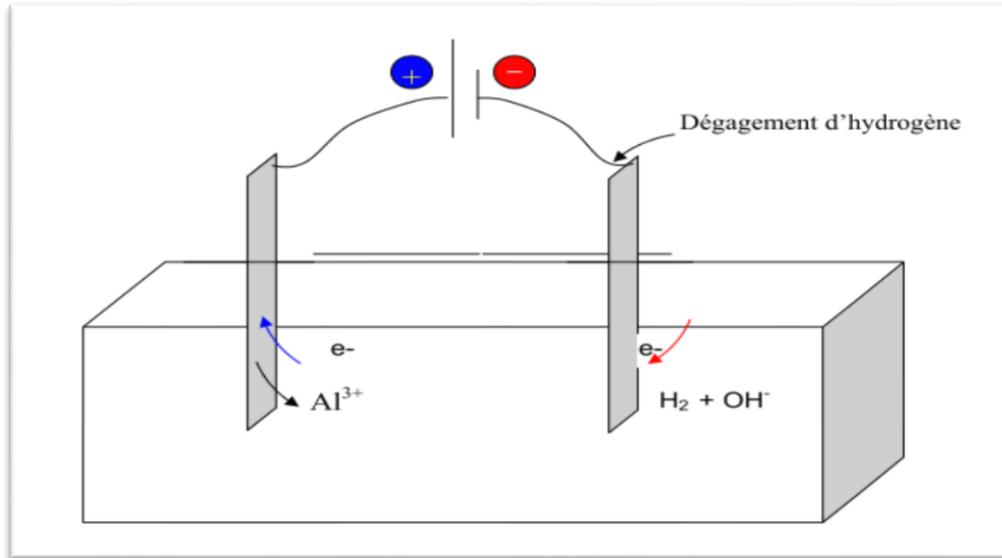


Figure II.5: cellule électrolytique à deux électrodes.

Afin d'améliorer les performances de l'EC à deux électrodes, il est nécessaire d'utiliser d'autres modes de connexions (monopolaires ou bipolaires) à plusieurs électrodes pour avoir une grande surface active. Ces trois modes de connexion diffèrent par leur expression de tension électrique et d'intensité de courant dans la cellule d'électrolyse.

a) connexion monopolaire en parallèle :

La Figure II.6 montre un dispositif simple de cellule d'EC avec une paire d'anodes et une paire de cathodes disposées en parallèle.

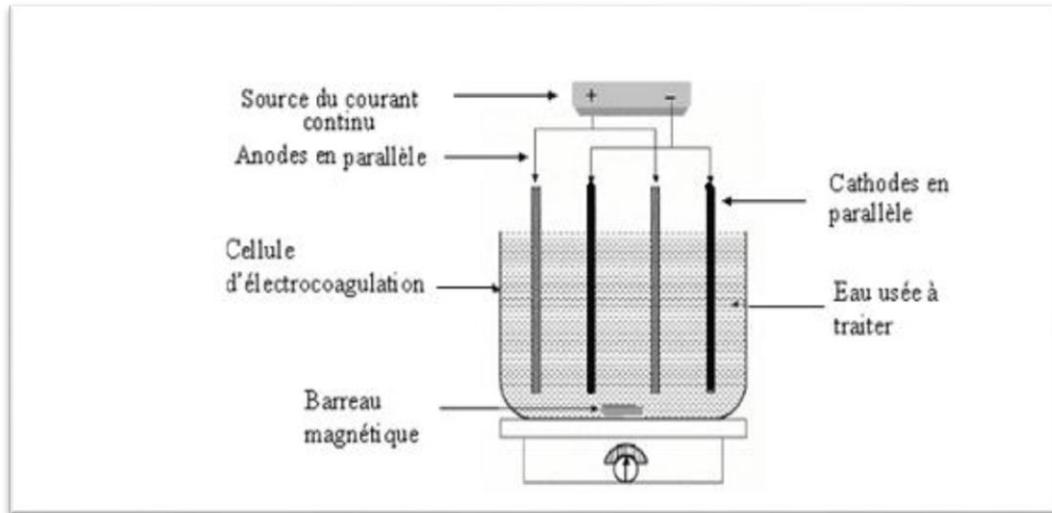


Figure II.6: Connexion en parallèle d'électrodes monopolaires [Annane, 2011]

Cette cellule EC consiste essentiellement en paires de plaques de métal conducteur placées entre deux électrodes parallèles et une source de courant continu. Les plaques métalliques conductrices sont appelées communément « électrodes sacrificielle » abaisse le potentiel de dissolution de l'anode et minimise la passivation de la cathode ; les électrodes sacrificielles peuvent être constituées des mêmes matériaux que l'anode ou de matière différentes

b) connexion monopolaire en série :

Comme le montre la Figure II.7, chaque paire d'électrodes sacrificielles est interconnectée l'une avec l'autre, et n'a donc pas d'interconnexion avec les électrodes monopolaires en série est similaire du point de vue électrique à une simple cellule avec plusieurs électrodes et des interconnexions

Dans un montage en série, une même intensité de courant traverse toutes les électrodes, la tension (différence de potentiel) nécessaire sera plus importante, puisque les résistances s'additionnent. il faudrait un générateur permettant d'imposer des intensités relativement faibles et des tensions plus élevés [Annane, 2011]

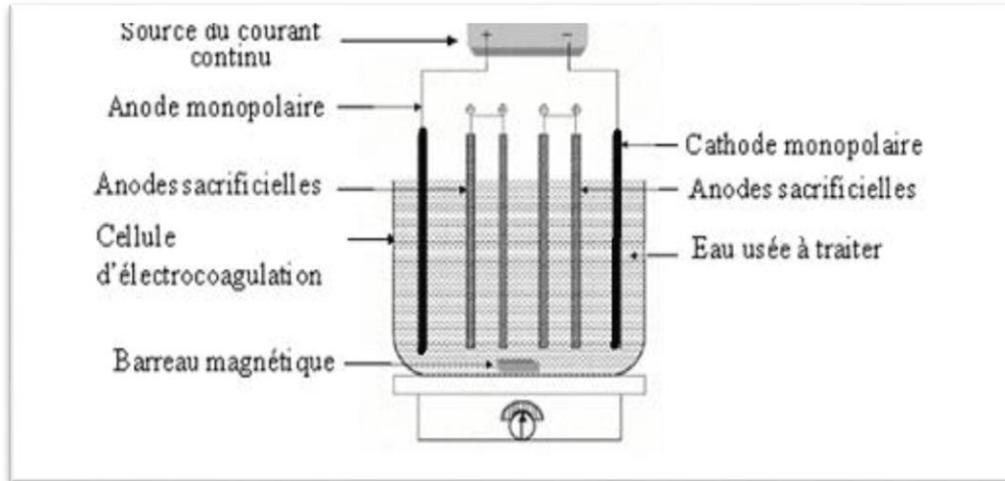


Figure II.7: Connexion en série d'électrodes monopolaires [Annane, 2011]

c) connexion bipolaire :

Seules les deux électrodes monopolaire sont connectées à la source de courant sans aucune interconnexion entre les électrodes sacrificielles .les différentes électrodes sont placées comme l'indique la Figure II.8.

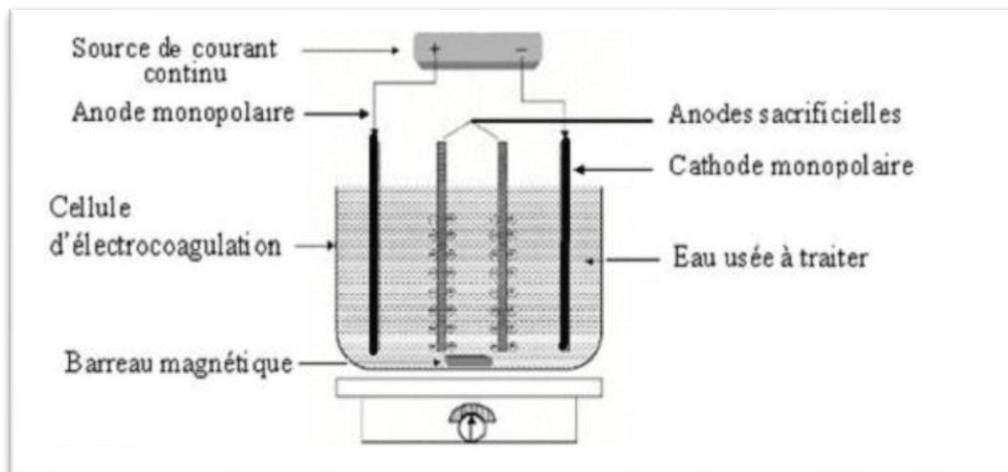


Figure II.8 : Connexion des électrodes bipolaires [Annane, 2011]

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

II.5.5. Paramètres influençant le processus d'EC :

➤ **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].

➤ **Le pH:**

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 est présentées dans le tableau suivant.

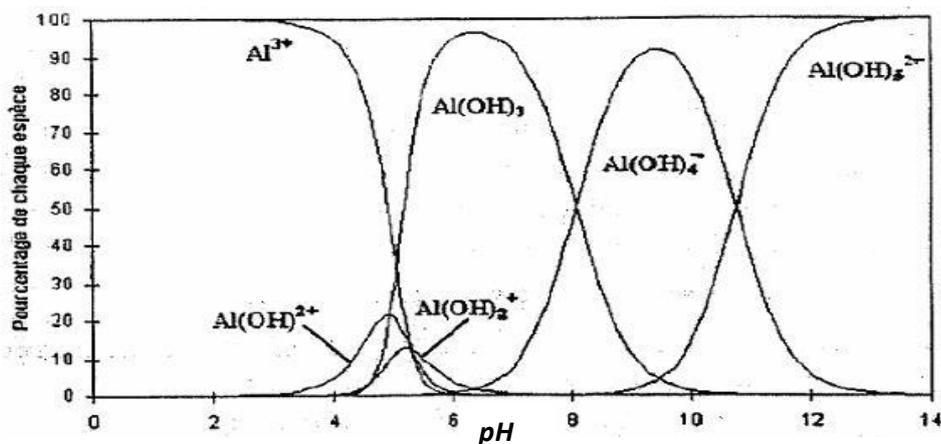


Figure II.9: diagramme de prédominance des espèces aluminium en fonction du pH.

- A pH < 3, l'aluminium est principalement sous la forme trivalente Al^{3+} , cette forme de monomère devient négligeable en milieu moins acide (pH > 6).
- La forme ionique $Al(OH)^{2+}$ apparaît vers des pH de l'ordre de 3 pour atteindre un maximum de concentration (20% de l'aluminium présent) vers un pH =5.
- Dans la zone de pH compris entre 5 et 8, l'espèce la plus répandue en solution est l'hydroxyde d'aluminium $Al(OH)_3$ avec un maximum de 95% vers pH =6.5.
La solubilité de l'aluminium trivalent est quasiment nulle dans une gamme de pH entre 5 et 8, cependant sa réaction avec les OH^- en solution, permet la formation de composés solubles tel que les cations. il existe également les cations $Al(OH)_2^+$ et $Al(OH)^{2+}$.
- L'ion $Al(OH)_4^-$ commence à se former vers un pH = 6 et atteint son maximum de 90% de l'aluminium présent dans la solution vers un pH de 9.5, le reste de l'aluminium étant sous la forme d'hydroxyde d'aluminium $Al(OH)_3$ et de $Al(OH)_5^{2-}$.
- En milieu alcalin (pH > 11), on trouve deux complexe anioniques $Al(OH)_4^-$ et $Al(OH)_5^{2-}$ qui deviennent majoritaires à pH > 12 .
- **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.

- **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.

➤ **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].

II.5.6. Avantage et inconvénient de l'électrocoagulation

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

II.5.6.1. Avantage :

- 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 entraînent 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 traiter 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 floes formés par l'EC sont semblables aux floes obtenus par floculation chimique, sauf que les floes d'EC tendent à être beaucoup plus larges, plus stables et peuvent donc être séparés plus rapidement par filtration.

II.5.6.2 Inconvénients :

Les inconvénients majeurs de l'EC concernent principalement

- La conductivité souvent faible de l'eau polluée et la formation des dépôts sur les électrodes.
- La présence importante d'ions calcium et hydrogencarbonates 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 solutions acides
- L'utilisation de l'électricité peut devenir chère voire difficile dans certaines régions.

CHAPITRE III

Matériels et Méthodes

Ce travail a été réalisé au niveau de laboratoire de Génie des Procédés, Facultés des Sciences et Science Appliqué, Université de Bouira.

Dans le but de la dégradation d'un colorant textile, cas du Gentiane Violet, ce chapitre est consacré à la présentation du riel et les méthodes d'analyse utilisés pour réaliser l'étude du procédé d'EC, ce travail se focalise aussi sur l'étude de l'effet de certains paramètres opératoires avec deux configurations différentes concernant les électrodes utilisées

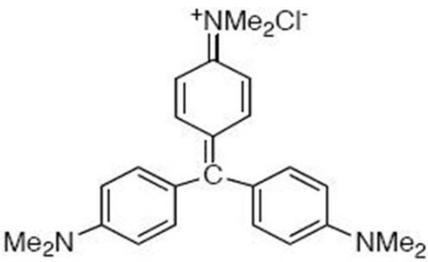
La méthodologie suivie et l'ensemble du matériel et réactifs utilisé sont présentés ci-dessous.

III.1.Produits et réactifs :

- Gentiane Violet ;
- Chlorure de sodium NaCl ;
- La soude NaOH ;
- L'acide sulfurique H₂SO₄.

Les principales propriétés chimiques et physiques du colorant de Gentiane GV sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau III.1: Propriétés chimiques et physiques de GV

Structure chimique	
Formule moléculaire	C₂₅H₃₀N₃⁺Cl⁻
Poids Moléculaire (g/mole)	M=407.99 g/mol
solubilité (g/l)	dans l'eau 50 g/l à 25C°
	dans l'alcool 60 g/l
Longueur d'onde	λ_{max} =592nm

III.2. Matériel :

- Générateur électrique (BAKU BK-305D).
- pH mètre (AD 1030 pH/mV).
- Balance (KERN ABj-NM/AB S-N).
- Spectrophotomètre (UV-VIS 1280).
- Agitateur mécanique (Nahita Dj-1).
- Agitateur magnétique (VELP).

III.3. Méthodologie expérimentale :

III.3.1. Préparation des solutions :

La solution mère de violet de gentiane (1g/l) a été préparée par dissolution de 1g dans 1l d'eau distillée.

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

Tableau III.2: concentration de colorant a différents volumes de dilution

C (mg/l)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V (ml)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

III.3.2. La courbe d'étalonnage :

La courbe d'étalonnage du colorant a été établie pour déterminer les concentrations pour la technique expérimentale en utilisant un spectromètre UV-visible. L'étalonnage a été réalisé, avec des concentrations en soluté variant de 1mg/l à 10 mg/l, la courbe d'étalonnage de GV est donnée dans partie résultats et discussions.

Les étalons sont préparés à partir d'une solution mère de 1g/l, les mesures sont effectuées par étalon et on obtient une droite d'étalonnage de l'absorbance en fonction de la concentration en colorant. Le degré de coloration augmente de gauche vers la droite. Figure III.1



Figure III.1: les solutions fille diluées à partir de la solution mère à 1 g/l

III.4. Dispositif expérimental de procédé d'électrocoagulation :

III.4.1. Description de montage expérimental :

- Le réacteur électrochimique La surface active est de dimensions : $17.2\text{cm} \times 11.2\text{cm} \times 12.2\text{cm}$.
- Les électrodes sont plongées dans le réacteur, et fixées l'un à côté de l'autre à une distance de 0.5cm.
- Sachant que les électrodes sacrificielles supplémentaires sont placées entre les deux électrodes monopolaires et celles-ci se trouvent être les seules connectées à la source de courant (cas de cellule à 4 électrodes).
- Ensuite elles sont reliées au générateur de courant à l'aide des fils électriques, l'intensité de courant est réglée à une valeur de 1.5 A (en tenant compte à l'effet de l'intensité de courant 2.5 A et 3.15) pendant un temps d'électrolyse de 30 minutes.
- Les électrodes sont prétraitées après chaque essai par une solution d'acide chlorhydrique afin de les nettoyer et d'éviter leur passivation, et on doit les sécher avec un papier absorbant après, on les pèse.
- Vitesse d'agitation lente.

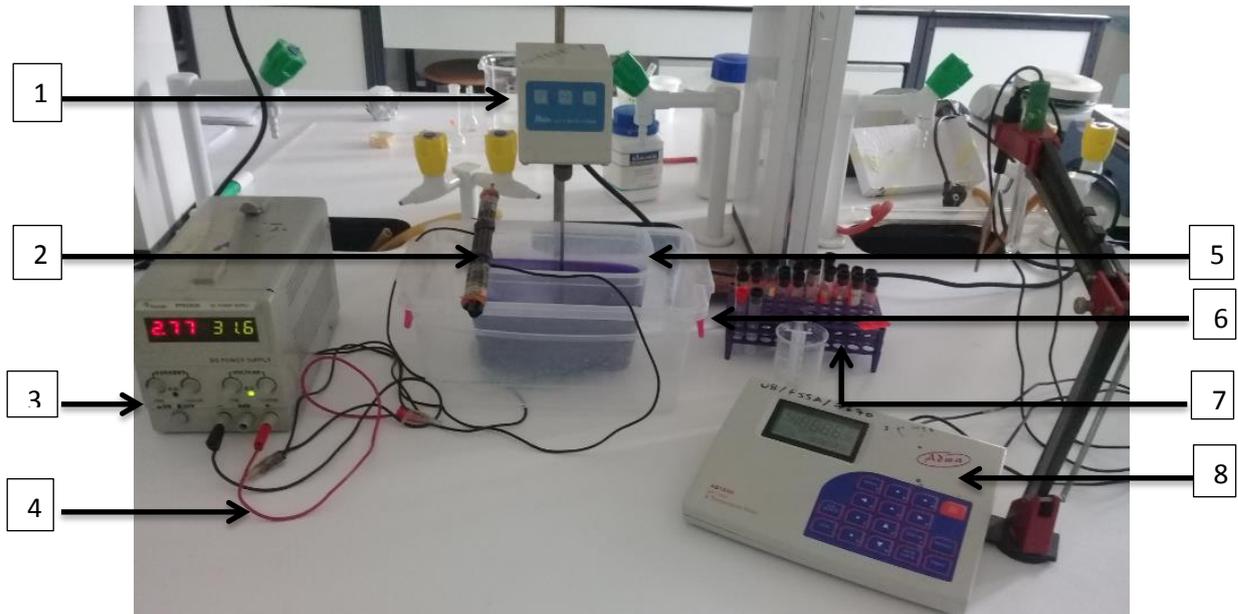


Figure III.2: montage expérimental du Procédé d'électrocoagulation.

- | | |
|----------------------------|-----------------------------|
| 1/ Agitateur mécanique | 5/ Réacteur électrochimique |
| 2/ Electrodes en aluminium | 6/ Bain marin |
| 3/ Générateur de courant | 7/ Echantillons |
| 4/ Fils électrique | 8/ pH-mètre |

III.4.2. Déroulement d'expérience :

- Dans un réacteur de forme parallélépipédique de volume 2L, contenant 1,5L de la solution à traiter, a concentration 50 mg/l (en tenant compte de l'effet de concentration de colorant 30mg/l et 10mg/l) et avec une agitation mécanique, nous avons ajouté la quantité désirée de chlorure de sodium (NaCl), afin d'augmenter la conductivité du milieu.
- Après avoir réglé l'intensité du courant choisie, on déclenche l'expérience qui est suivie pendant une durée de 30min (temps d'électrolyse).
- L'échantillonnage est réalisé en cour de manipulation à chaque 5 min à l'aide d'une seringue et analysée par spectrophotomètre tout en mesurant le pH de chaque prélèvement.
- L'expérience se déroule à température ambiante.

III.4.3.Méthodes d'analyse:

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

a)1a mesure d'absorbance :

Les mesures d'absorbance (590 nm) furent effectuées en utilisant un spectrophotomètre

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

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

Avec :

C_0 : concentration initiale de la solution colorée

C : concentration finale des phosphates

b) La mesure de pH :

Les mesures du pH sont réalisées par un pH mètre AD 1030 pH/mV, Le pH initial a été varié entre 5,8 et 7,6 en utilisant une solution 0,1M de H_2SO_4 ou une solution de NaOH.

L'ajout de NaCl est presque sans effets sur le pH initial de la solution.

CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSION

IV.1.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 GV.

Les expériences ont été réalisées pour examiner les effets des paramètres de fonctionnement du procédé tels que l'intensité de courant, la conductivité, le pH et la concentration en colorant et ceci a été effectué pour deux type d'essais (ECM et ECB) par une étude comparative.

IV.2.Balayage λ_{\max} :

Après on a utilisé des différentes concentrations (10,20 ,40) et des différents pH (2.2, 4.2, 6,8) pour avoir l'absorbance ou la densité optique de notre colorant qui est :

$$\lambda_{\max} = 590 \text{ nm}$$

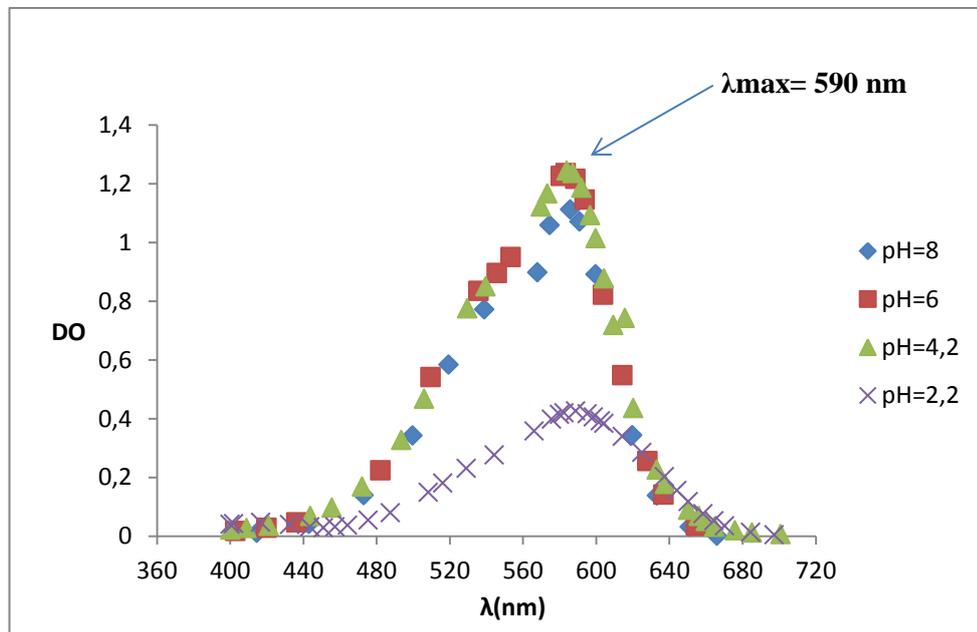


Figure IV.1: balayage de la longueur d'onde à différentes pH, C=50mg/l

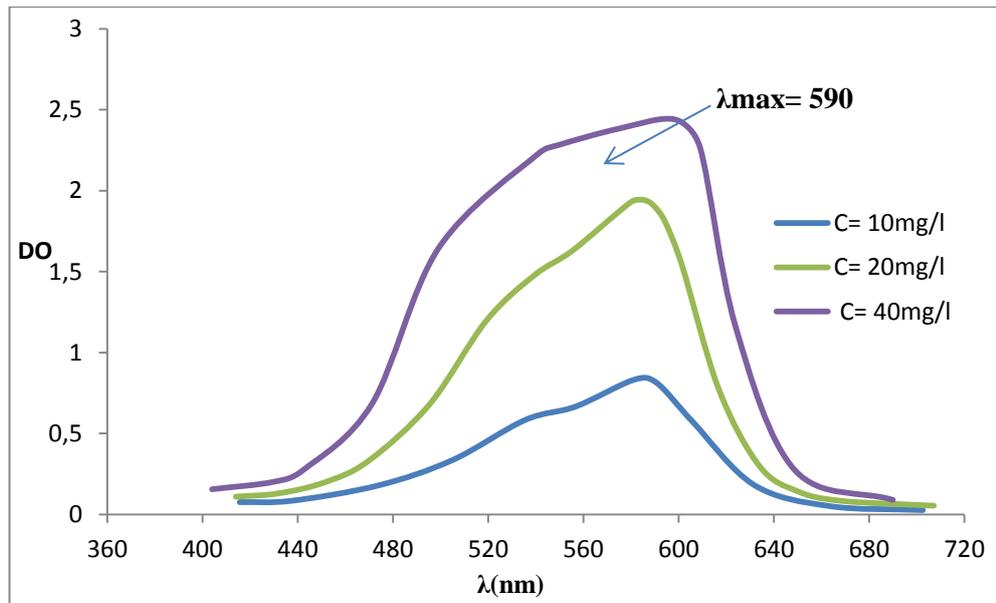


Figure IV.2: balayage de la longueur d'onde à différentes concentrations en colorant, pH=8.6

IV.3.La courbe d'étalonnage :

Le dosage de colorant GV a été réalisé par la méthode colorimétrique à une longueur d'onde de 590 nm. La courbe d'étalonnage a été établie afin d'estimer la concentration de colorant en solution.

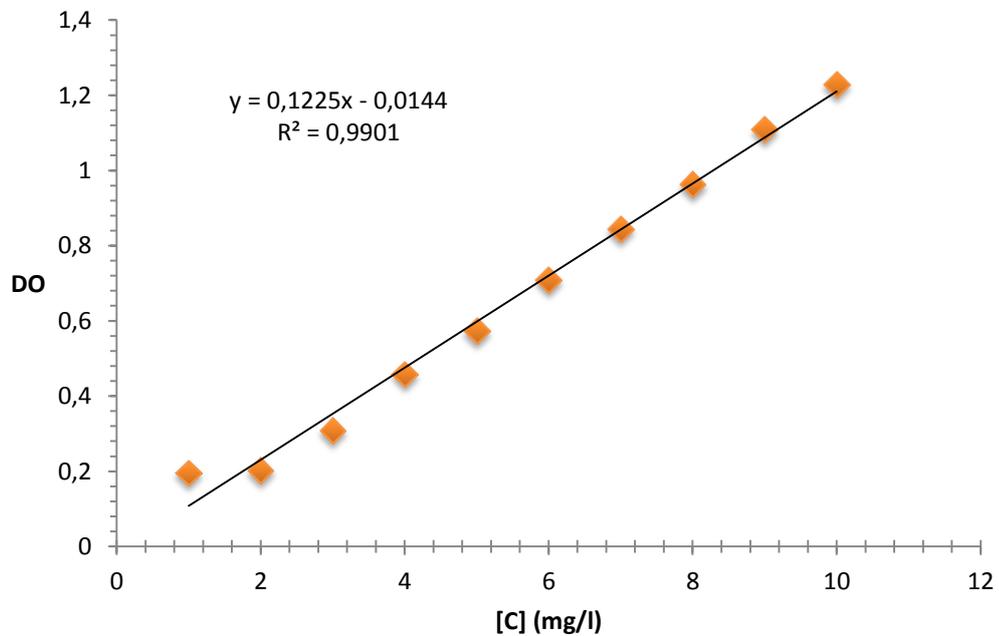


Figure IV.3 : courbe d'étalonnage du colorant Gentiane Violet

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 0.9901 dans le domaine des concentrations de 2 à 10 mg/L,

Comme nous l'avons vu précédemment, l'électrocoagulation est une méthode physicochimique qui permet d'étudier les paramètres en variant les niveaux de chacun dans un intervalle donné (Tableau IV.1), la concentration initiale du colorant étant toujours constante pour l'ensemble des expériences (50mg/l).

Tableau VI.1. Les paramètres influençant le procédé d'électrocoagulation

Paramètres d'expérience	Valeurs supposées
Intensité de courant (A)	1.5
	2.5
	3.15
La concentration en NaCl (g/l)	0.5
	1
	1.5
pH	6
	8
	10
La concentration en colorant (mg/l)	10
	30
	50

Pour suivre la cinétique de dégradation du colorant, nous avons opté pour un seul type d'électrode celle en aluminium et pour deux configurations différentes 2 et 4 électrodes. Pour l'échantillonnage, et ce durant toute la durée des manipulations, nous avons effectué des prélèvements sur le surnageant à intervalle de temps régulier (5 minutes).

IV.4.Essai avec 2 électrodes :

IV.4.1.Effet d'intensité de courant :

L'intensité de courant est jugée comme un paramètre essentiel en électrocoagulation spécifiquement pour la cinétique de décoloration. Les conditions opératoires suivies dans nos essais sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau IV.2 : conditions opératoires pour les essais de l'influence de l'intensité de courant

pH	8.6
[Colorant]	50 mg/l
Intensité de courant	Variable
[NaCl]	1g/l
Surface d'électrode	50 cm ²
Distance inter-électrodes	0.5 cm
Nombre d'électrodes	2

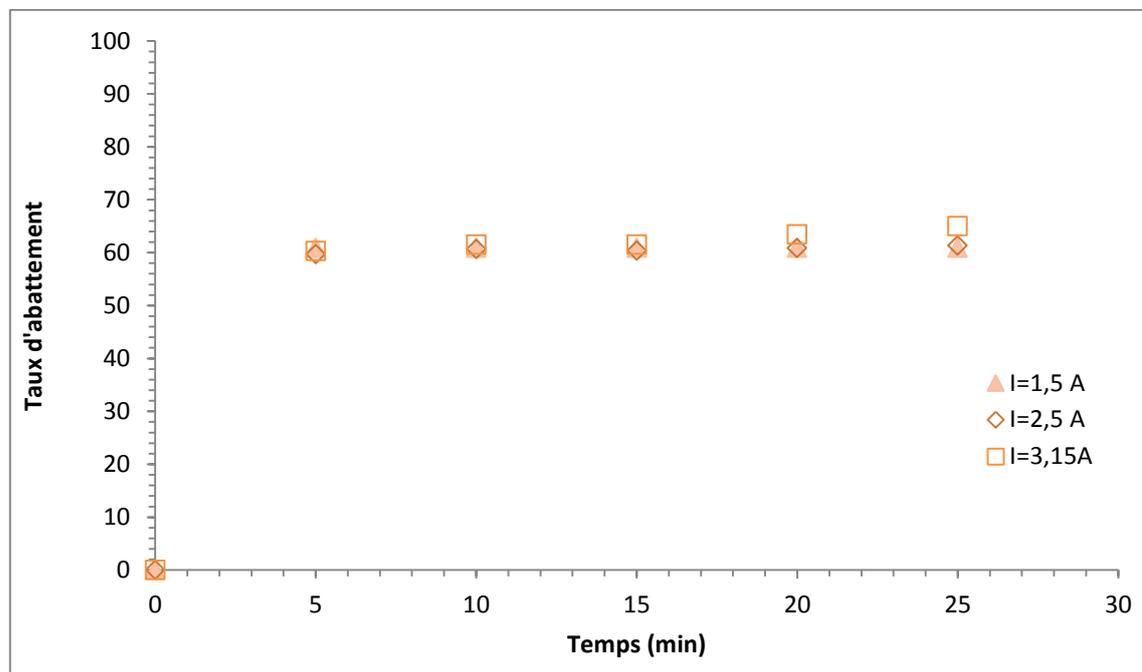


Figure IV.4: Influence de l'intensité du courant sur le taux de décoloration
(pH=8.6, C= 50 mg/l, [NaCl]=1g/l)

En suivant le taux d'abattement de décoloration en fonction de temps sur la figure IV.4 nous constatons que l'allure des courbes présente un comportement similaire, abattement rapide suivi d'un palier.

Il apparaît que l'application de valeurs d'intensité de courant ascendantes améliore le taux de décoloration, en effet au bout de 5 min l'élimination de colorant atteint 60% pour une intensité de courant de 3.15 A tout comme pour une intensité de courant de 1.5A et 2.5A avec un taux de décoloration maximal de 65% au bout de 25 min à $I=3.15A$.

L'optima d'abattement est affecté pour la densité de courant la plus grande, c'est-à-dire, l'abattement est d'autant plus élevé que l'intensité de courant est élevé. Ceci peut être expliqué par la loi de Faraday qui décrit le rapport entre l'intensité de courant, le temps de réaction dans la cellule d'EC et la quantité d'aluminium mise en solution servant de coagulant dans le processus de décoloration.

Il en résulte donc d'avantage de la déstabilisation des particules du polluant, par ailleurs le taux de production des bulles d'hydrogène augmente et leur taille diminue lorsque la densité du courant augmente. Tous ces effets sont bénéfiques pour l'élimination efficace du polluant par flottation. En outre, de meilleures efficacités de collection des particules floculées pourraient être atteintes au cours de l'électroflottation [Salmi et Slimani, 2014].

IV.4.2. Effet de conductivité :

La conductivité du milieu réactionnel est l'un des principaux paramètres influençant le traitement des eaux par EC et qui peut être modifié par l'ajout de sel.

Pour établir le lien entre la salinité d'une solution et sa conductivité, nous avons ajouté de différentes quantités de sel NaCl à la solution traitée [Alem, 2016].

Tableau IV.3 : conditions opératoires pour les essais de l'influence de la conductivité

pH	8.6
[Colorant]	50mg/l
Intensité de courant	2.5A
[NaCl]	Variable
Surface d'électrode	50 cm ²
Distance inter-électrodes	0.5cm
Nombre d'électrodes	2

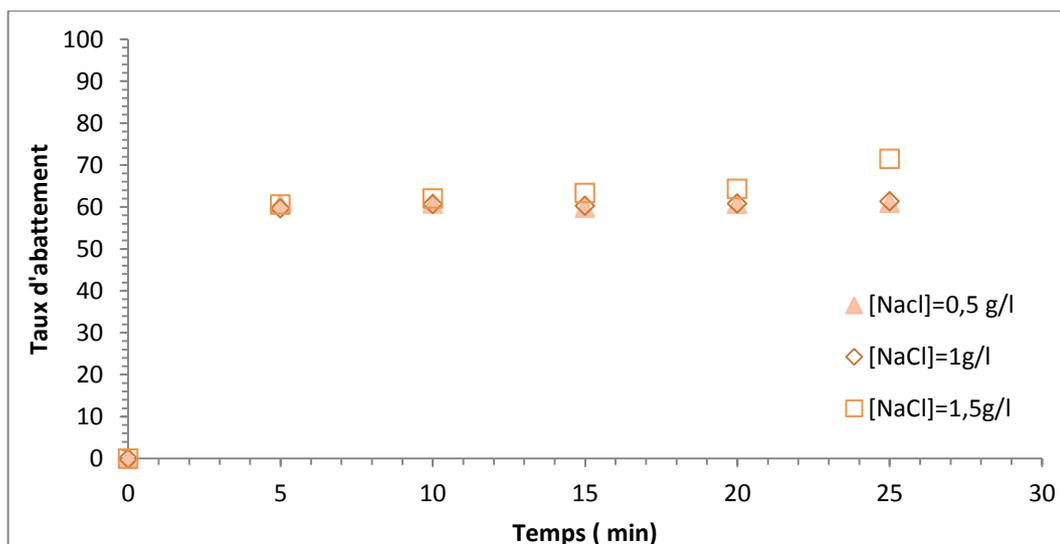


Figure IV.5 : Influence de la conductivité sur le taux de décoloration
($pH=8.6$, $C= 50 \text{ mg/l}$, $I=2.5A$)

Cette figure montre que l'efficacité de la décoloration augmente légèrement avec l'augmentation de concentration en NaCl en passant de 0.5 à 1.5 g/l (le taux d'abattement atteint 71.44% au bout de 25 min).

Si la conductivité du milieu 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 [Ularbi et Maharzi, 2016]. Souvent, l'utilisation du chlorure de sodium (NaCl) est privilégiée du fait que les ions chlorures réduisent de manière significative les effets indésirables d'autres anions tels que HCO_3^- et SO_4^{2-} , en évitant la précipitation du carbonate de calcium contenu dans une eau calcaire, qui pourrait former une couche isolante sur la surface des électrodes et augmenter la résistance de la cellule [Gousmi et Bensadok, 2016].

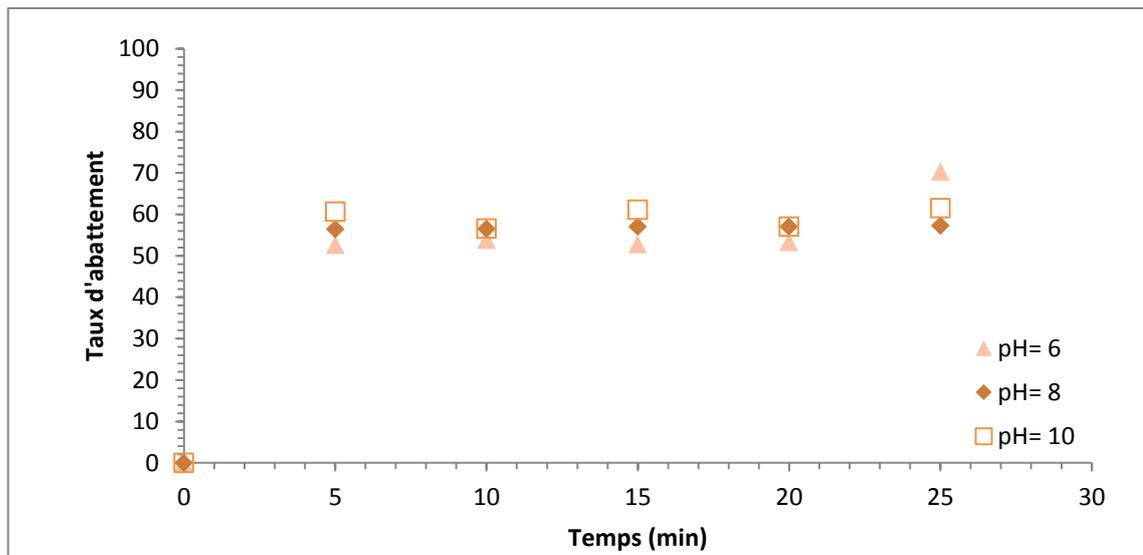
En effet, l'ajout de NaCl est bénéfique pour le passage du courant à travers la cellule d'EC et par conséquent de l'électro-dissolution des électrodes d'aluminium par voie électrochimique et chimique par les chlorures [Lemlikchi, 2012].

IV.4.3. 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]. Nous avons fait varier le pH dans une gamme allant de 6 à 10 tout en maintenant les autres facteurs constants pour un temps réactionnel de 30min :

Tableau IV.4: conditions opératoires pour les essais de l'influence de pH

pH	Variable
[Colorant]	50mg/l
Intensité de courant	2.5A
[NaCl] g/l	1g/l
Surface d'électrode	50cm ²
Distance inter-électrodes	0.5cm
Nombre d'électrodes	2

**Figure IV.6 :** Influence de pH sur le taux de décoloration

([NaCl]=1g/l, C= 50 mg/l, I=2.5A)

Les résultats de ce test montre qu'un meilleur rendement de la décoloration est obtenu en milieu acide (pH =6), il est de l'ordre de 87.10%, et ceci est en accord avec le travail d'Lemlikchi et Ammouche [Lemlikchi, 2012; Ammouche et Slimani, 2017].

L'alcalinisation du milieu est apparemment défavorable dans le cas de traitement par l'aluminium. Nous pouvons expliquer cela par la présence de certaines espèces monomériques et polymériques à ces valeurs de pH (Al(OH)^{2+} , $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$, $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{32}^{7+}$) qui sont très favorables à la formation de l'hydroxyde de l'aluminium Al(OH)_3 , élément actif de l'électrocoagulation à une valeur de pH entre 4 et 7 [Lemlikchi, 2012; Ammouche et Slimani, 2017].

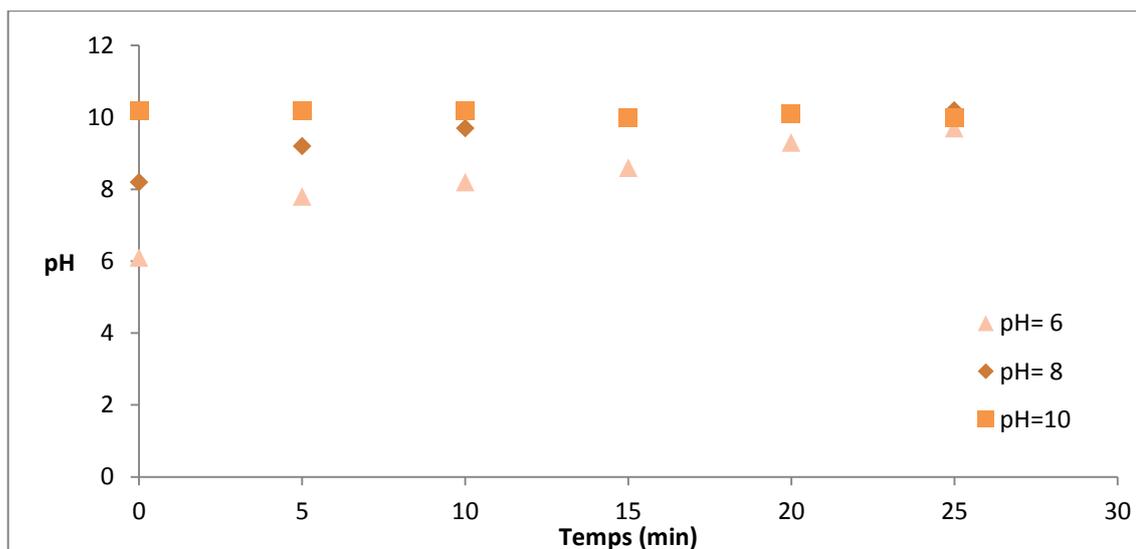


Figure IV.7 : évolution de pH en fonction du temps

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 pH = 4 et pH = 7, elle est maximale à pH = 8, alors qu'une chute du rendement à un pH = 10 peut être expliquée par l'atteinte d'équilibre [Chenna, 2016].

IV.4.4. Effet de la concentration en colorant :

Dans le but d'évaluer le rôle joué par la concentration initiale du colorant lors du traitement par l'EC, nous avons réalisé des expériences en gardant tous les autres paramètres constants, à savoir : la teneur en sel, l'intensité de courant, le pH initial des solutions et en faisant varier les concentrations initiales en colorant de 10 à 50 mg/l.

Tableau IV.5: conditions opératoires pour les essais de l'influence de concentration du colorant

pH	8.6
[Colorant]	Variable
Intensité de courant	2.5A
[NaCl] g/l	1g/l
Surface d'électrode	
Distance inter-électrodes	0.5cm
Nombre d'électrodes	2

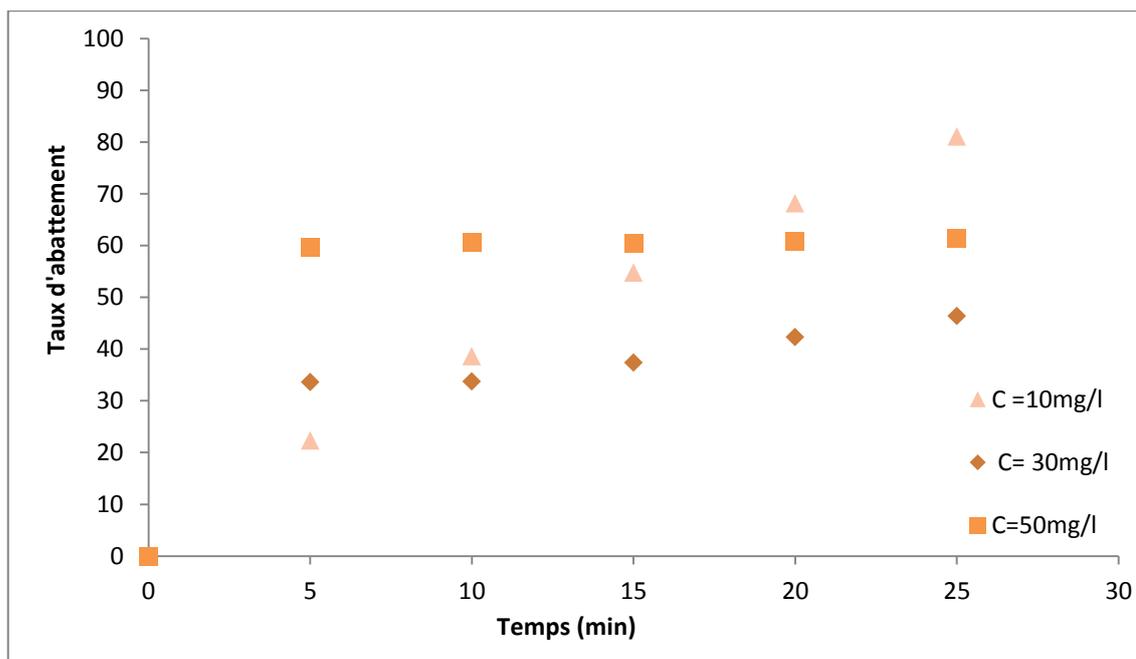


Figure IV.8 : Influence de concentration du colorant sur le taux de décoloration
 ($[NaCl]=1g/l$, $pH=8.6$, $I=2.5A$)

On remarque qu'il y a une meilleure décoloration à une faible concentration de 10mg/l avec les deux électrodes, puisqu'on obtient un rendement de 81.04% au bout de 25min seulement. Pour des concentrations élevée on obtient un rendement de (46.37% et 61.31%) respectivement pour les concentrations (30mg/l et 50mg/l) au cour du même temps.

On conclut que La cinétique de rendement est d'autant plus rapide que la concentration initiale est faible. Quoique le traitement de solutions de plus en plus chargées nécessite un temps réactionnel plus long pour aboutir à l'élimination totale du colorant.

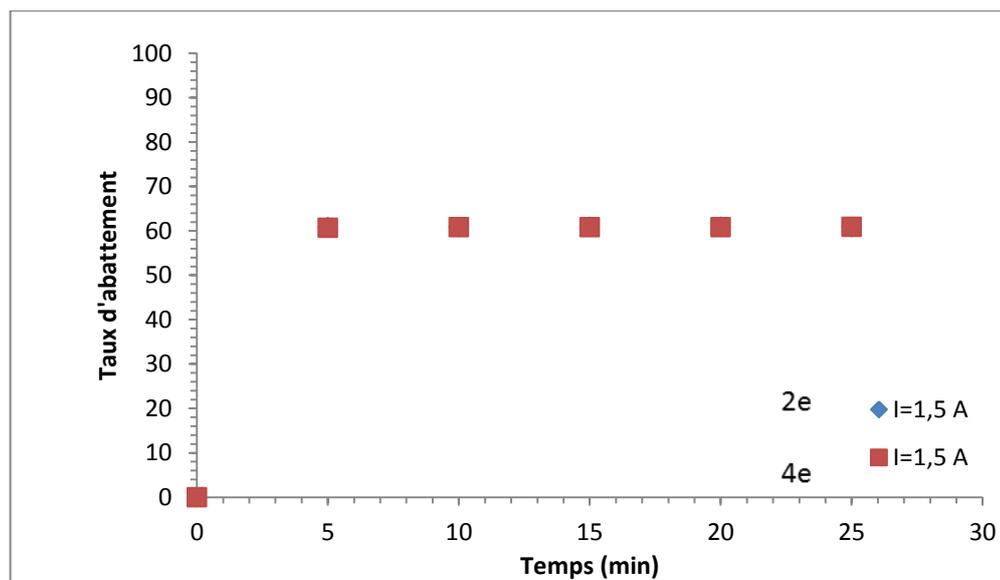
IV.5. Essai avec 4 électrodes:

Après l'optimisation des paramètres les plus importants influençant le bon fonctionnement de l'ECM, nous avons retenu les optima des différentes conditions opératoires précédemment étudiées et nous avons essayé d'améliorer d'avantage l'efficacité du traitement par une augmentation du nombre d'électrodes sacrificielles en connectant celles-ci en mode bipolaire et ceci dans le but de réduire la consommation du courant électrique.

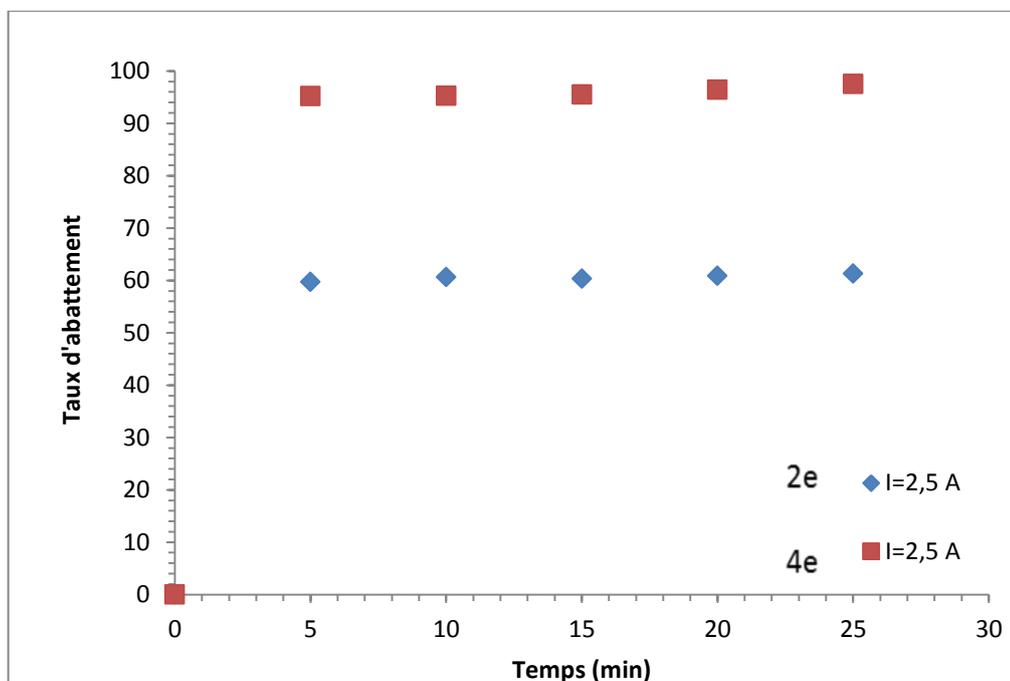
Nous rappelons que les électrodes sacrificielles supplémentaires sont placées entre les deux électrodes monopolaires et celles-ci se trouvent être les seules connectées à la source de courant. Nous parlons dans ce d'ECB.

On a étudié l'influence du nombre d'électrode (avec les mêmes conditions opératoires) en fonction de taux d'abattement de décoloration pour le GV.

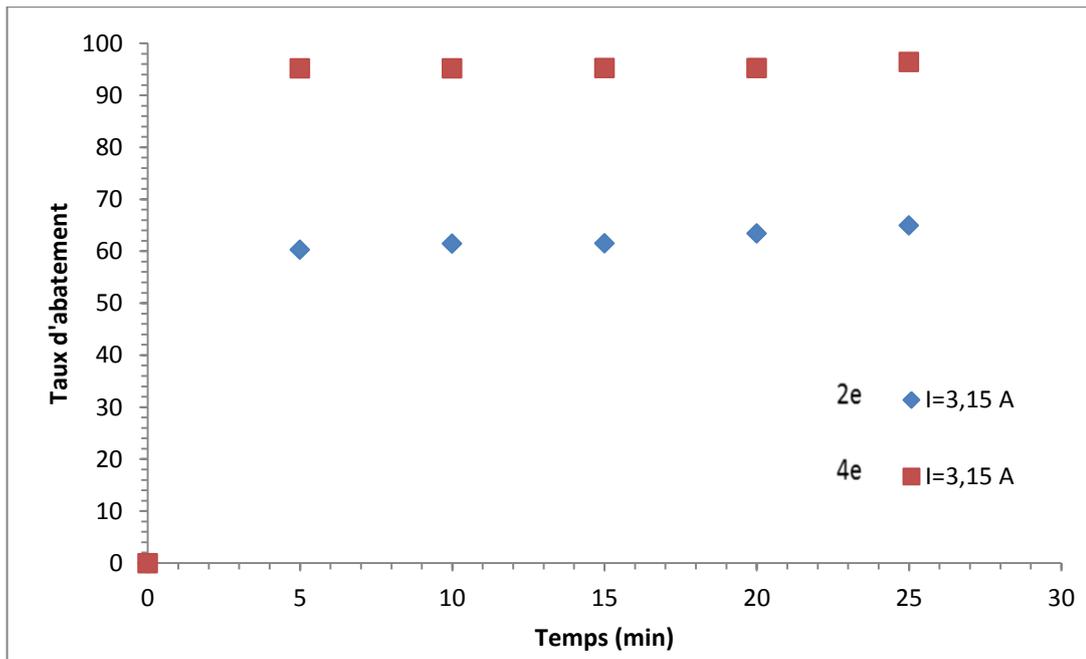
IV.5.1.Effet d'intensité de courant :



(a)



(b)



(c)

Figure IV.9: influence du nombre d'électrodes sur le taux de décoloration

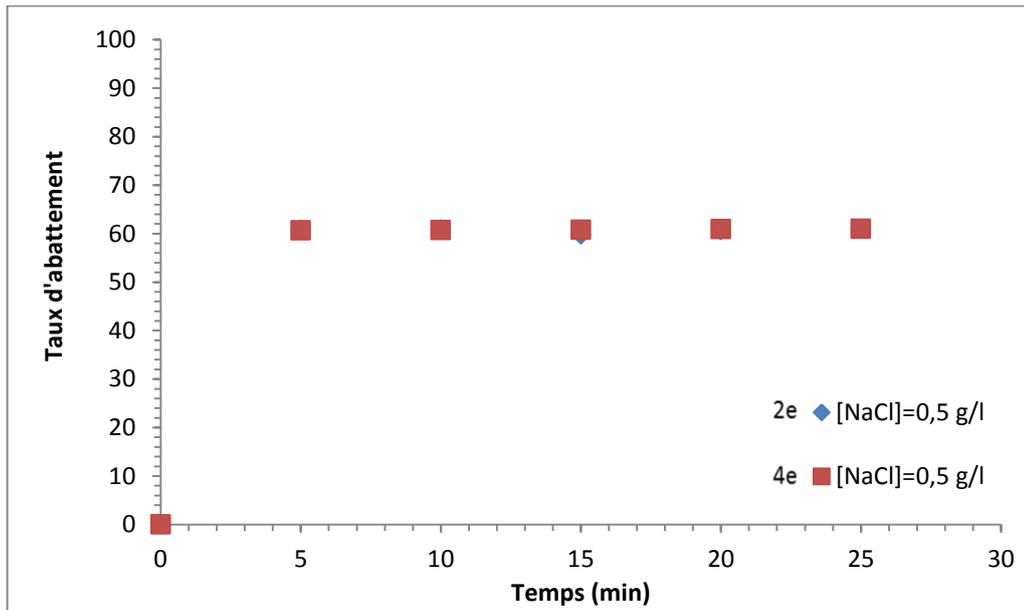
(a) $I = 1.5 \text{ A}$, (b) $I = 2.5 \text{ A}$, (c) $I = 3.15 \text{ A}$

($pH=8.6$, $C=50 \text{ mg/l}$, $[NaCl]=1\text{g/l}$)

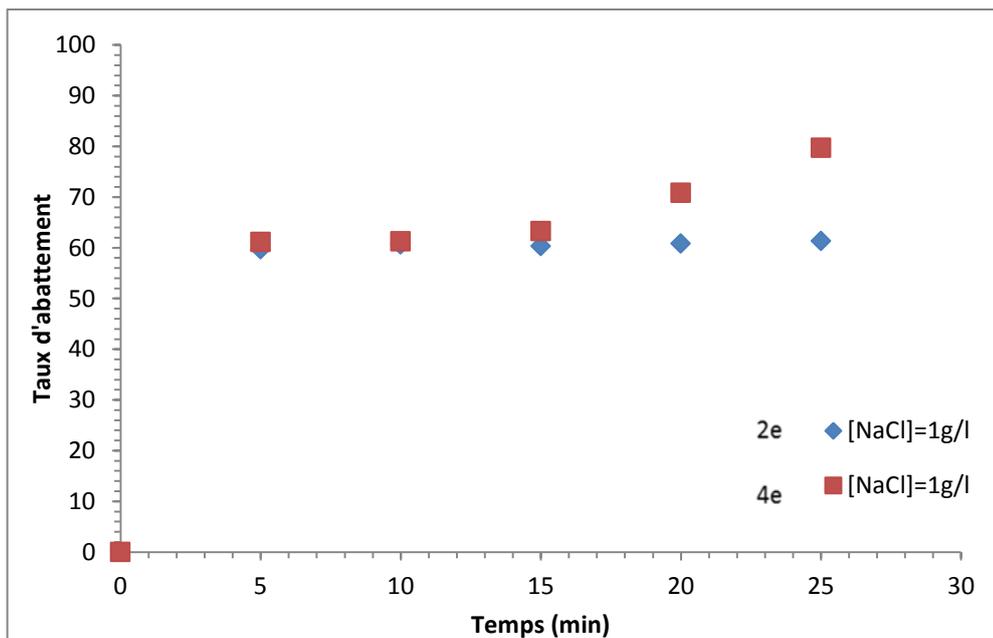
On remarque une superposition complète des deux courbes à une faible intensité de courant $I=1.5\text{A}$ (a), alors que l'augmentation de rendement est proportionnelle à celle d'intensité de courant ainsi que l'effet de nombre d'électrode est remarquable sur l'efficacité du procédé (b) et (c), par exemple au lieu d'utiliser une forte intensité de courant ($I=3.15\text{A}$) à 2 électrodes on utilise seulement une intensité de ($I=1.5\text{A}$) avec 4 électrodes et le rendement va être le même ($R=60\%$) au bout des 5 minutes première et il reste constant pour le reste du temps.

Donc l'augmentation de la surface dissoute des électrodes sacrificielles permet d'obtenir une meilleure élimination des colorants et de réduire l'intensité du courant appliqué en un temps réactionnel très court. Des rendements de 100% sont atteints à des fortes intensités de courant avec un nombre d'électrodes élevé.

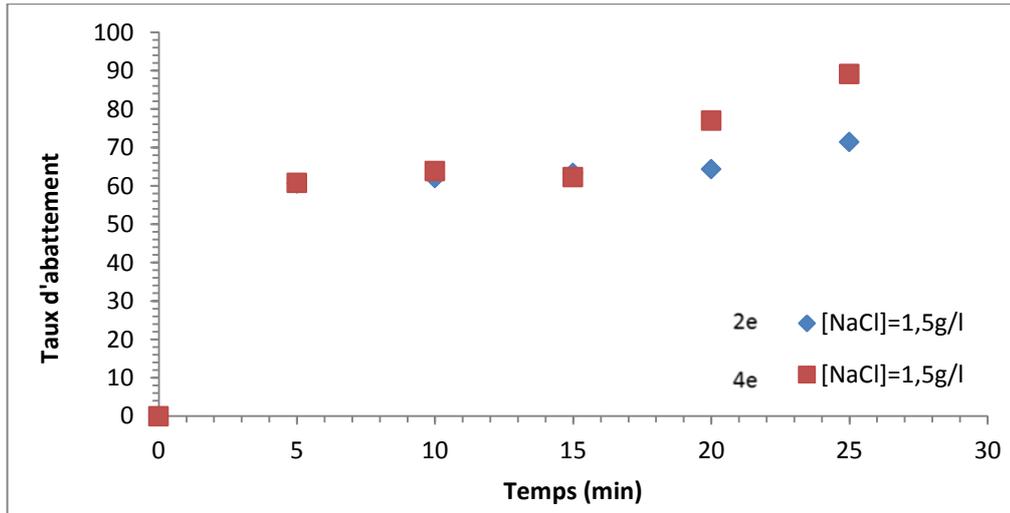
IV.5.2.Effet de conductivité :



(a)



(b)



(c)

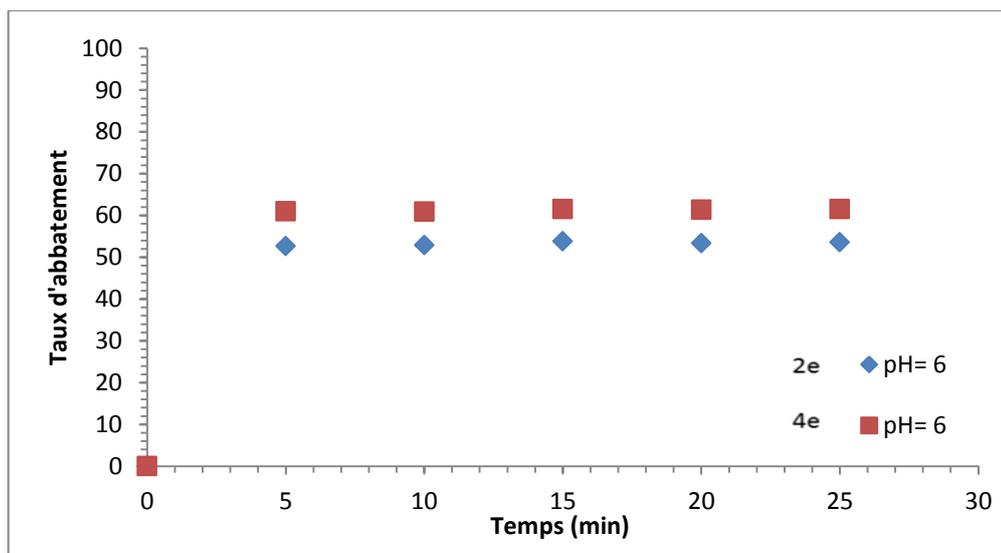
Figure IV.10 : influence du nombre d'électrodes sur le taux de décoloration

(a) $[NaCl] = 0.5 \text{ g/l}$, (b) $[NaCl] = 1 \text{ g/l}$, (c) $[NaCl] = 1.5 \text{ g/l}$

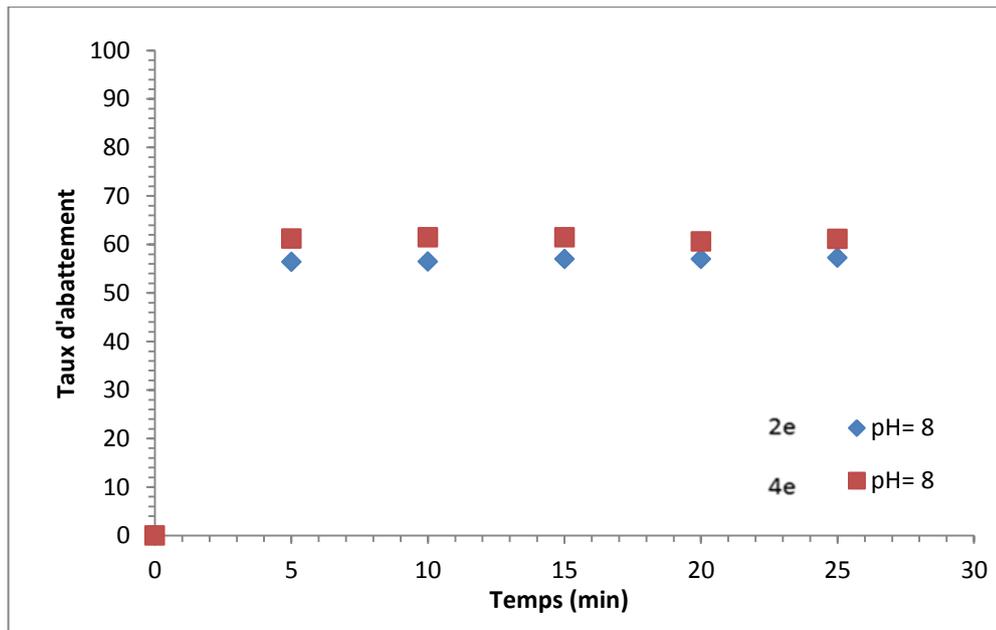
($pH=8.6$, $C= 50 \text{ mg/l}$, $I=2.5A$)

L'effet de de nombre d'électrodes est significatif quoique les graphes sont exposés en superposition dans un même graphique pour les trois niveaux de concentration en sel $[NaCl]$ et cette superposition est beaucoup plus remarquable pour la faible concentration du $[NaCl]$. Par contre on remarque une augmentation de rendement avec 4 électrodes à forte concentration en $NaCl$, et qui atteint 89.12 % au bout de 25 minute avec 4 électrodes et $[NaCl] = 1.5\text{g/l}$

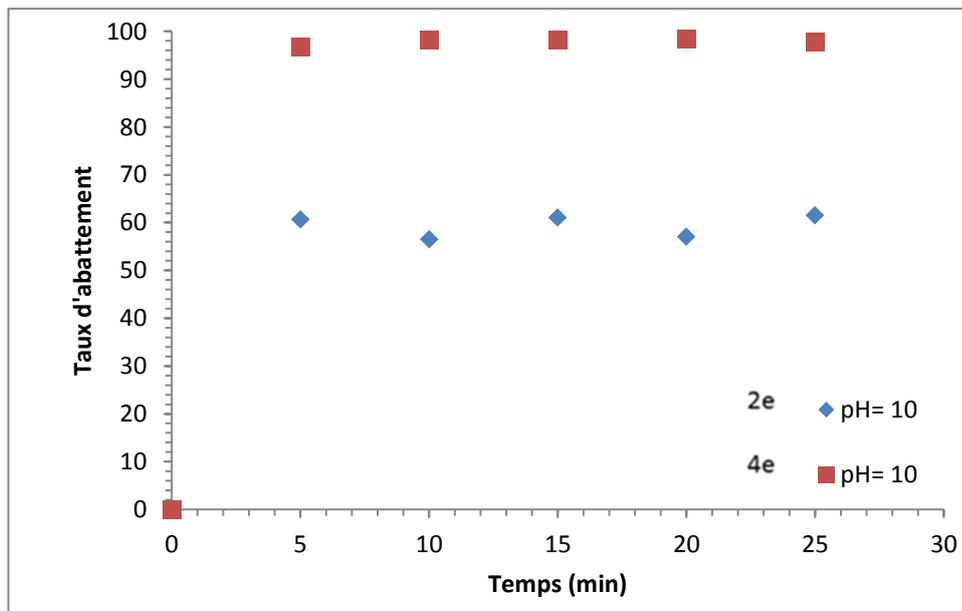
IV.5.3. Effet de pH :



(a)



(b)



(c)

Figure IV.11: influence du nombre d'électrodes sur le taux de décoloration

(a) pH = 6, (b) pH = 8, (c) pH = 10.

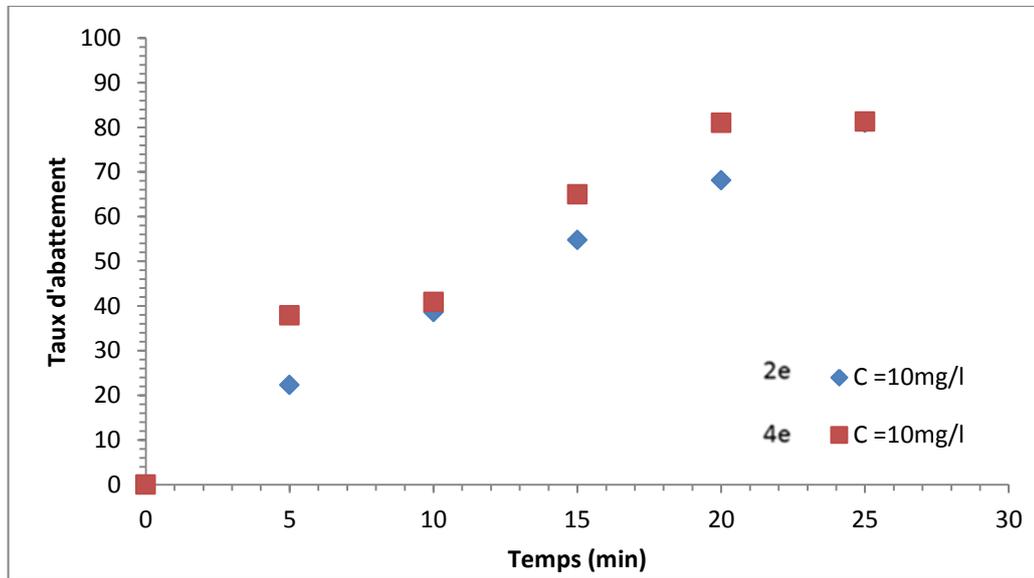
([NaCl]=1g/l, C= 50 mg/l, I=2.5A)

A (pH = 8) les courbes sont exposées en superposition dans un même graphique, avec une légère augmentation de taux d'abattement avec le dispositif à 4 électrodes.

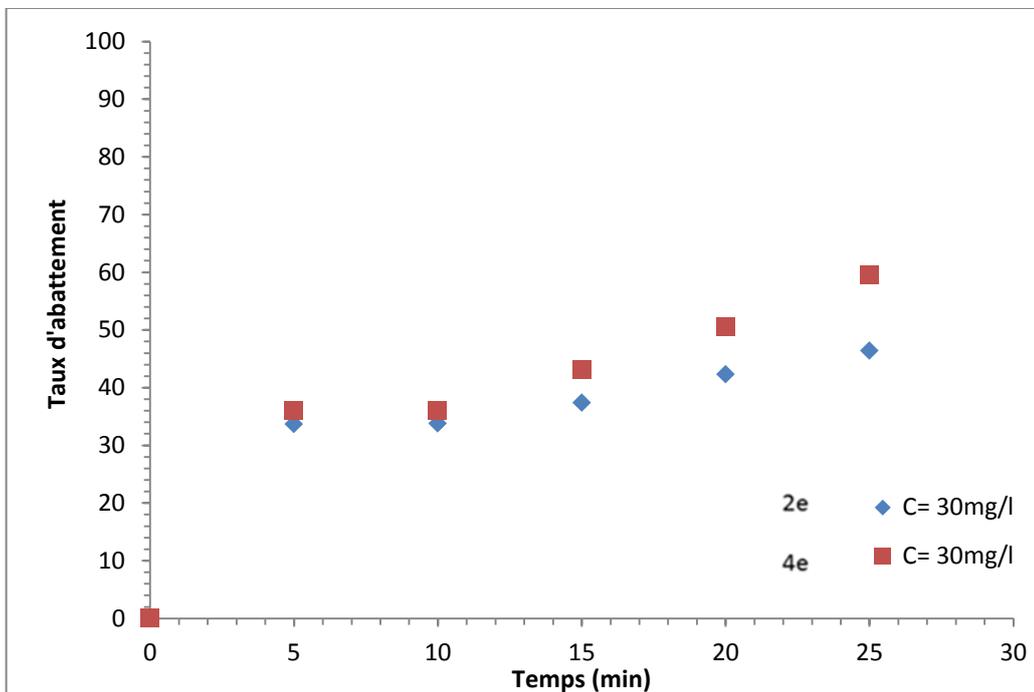
A pH acide (pH = 6), dans les première 5 minutes on obtient respectivement les rendements suivants 52.67% et 60.97% avec les configurations à 2 et à 4 électrodes,

l'effet de nombre d'électrodes est remarquable seulement à des pH basiques (pH=10) le pH constant correspondant à la précipitation de $Al(OH)_n$ est atteint rapidement dans le cas du réacteur à plusieurs cellules.

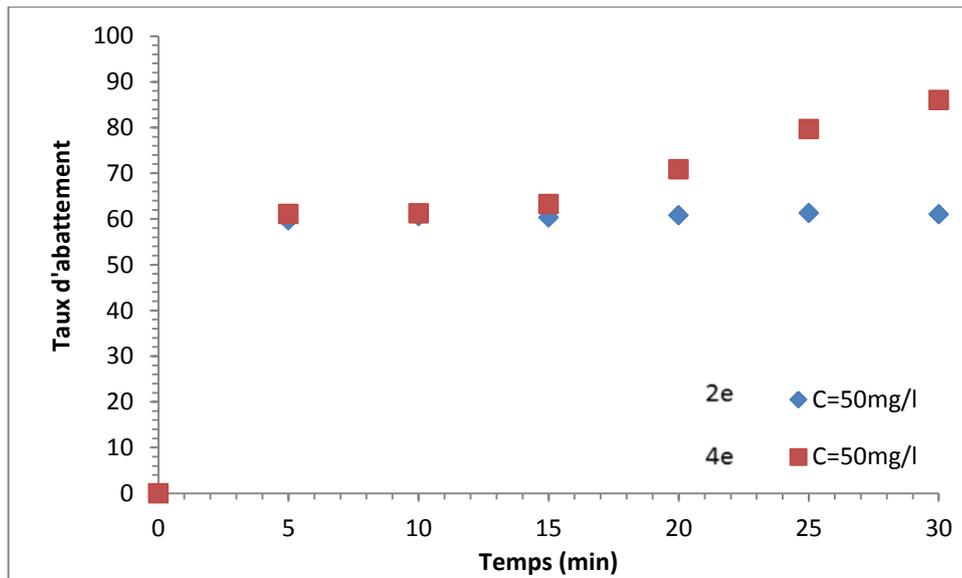
IV.5.4. Effet de concentration en colorant :



(a)



(b)



(c)

Figure IV.12: influence du nombre d'électrodes sur le taux de décoloration

(a) $C = 10\text{mg/l}$, (b) $C = 30\text{mg/l}$, (c) $C = 50\text{mg/l}$.

($[\text{NaCl}] = 1\text{g/l}$, $\text{pH} = 8.6$, $I = 2.5\text{A}$)

D'après les résultats obtenus on remarque presque une superposition des deux courbes, pour des concentrations de 30 mg/l et 50 mg/l au premier 10 minutes, Par contre nous enregistrons une légère hausse du rendement au bout de 25 minutes et il atteint le max avec 4 électrodes et a une faible concentration du colorant 10mg/l qui est estimé par 81.28%.

A la fin du traitement et d'après l'allure des courbes, nous constatons ce qui suit :

- Il faut que le rendement soit plus important que le nombre d'électrodes est plus faible mais l'augmentation des niveaux des paramètres de l'intensité de courant, le pH et la conductivité du milieu, provoque l'augmentation du rendement avec un nombre élevé d'électrode ce qui nous a permis de conclure que ce phénomène est due à l'importance des valeurs élevées du niveau de chaque paramètre.
- Le temps de décoloration diminue de 3 à 2 mn avec l'augmentation du nombre d'électrodes. En effet, avec une intensité de courant de 2.5A, une décoloration totale de 95.21% (3min) avec 4 électrodes passe à 59.28% avec 2 électrodes (5 min).

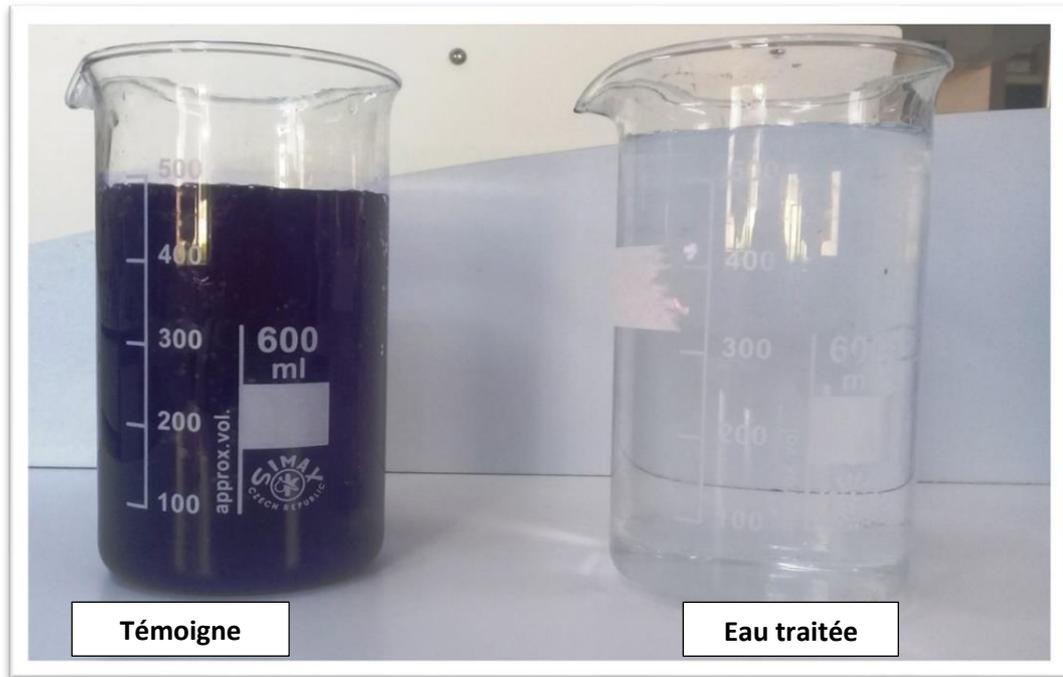


Figure IV.13: résultat final du traitement d'eau coloré par électrocoagulation après clarification.

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.

Ce travail avait pour objectif l'étude de l'élimination du colorant le Gentiane violet présents dans les effluents des industries textile par le procédé d'électrocoagulation, une série d'expériences a été réalisée afin de trouver les effets des paramètres influençant le procédé.

- En étudiant l'effet des quatre paramètres, jugés important dans le traitement électrochimique, à savoir l'effet d'intensité de courant, l'effet de conductivité, l'effet de pH, l'effet de la concentration en colorant, des fortes proportionnalités entre ces paramètres et l'efficacité du procédé (taux d'abattement) sont enregistrés. Cela se résume en une proportionnalité inverse entre l'efficacité du procédé et la concentration en colorant et une et une proportionnalité positive entre l'efficacité du procédé et les trois autres paramètres.
- Le choix de la valeur optimale d'un paramètre étudié se base, sur la comparaison des rendements obtenus pour chaque niveau appliqué.

Le procédé EC nous a permis de conclure que :

- Le traitement des eaux usées urbaines par électrocoagulation, s'est avéré être très efficace pour l'abattement de la décoloration, on a obtenu des résultats de traitement très satisfaisant avec des taux d'abattement qui atteint 87% (ECM, pH=8.6, C=10mg/l, I=2.5A, [NaCl]=1g/l) et aller jusqu'à 98% (ECB, pH=10, C=50mg/l, I=2.5A, [NaCl]=1g/l).
- La production des ions hydroxydes (OH^-) au voisinage de la cathode fait que le pH augmente régulièrement au cours du processus, pour éviter l'encrassement de l'anode.

- L'augmentation de l'intensité du courant accélère la floculation, une forte densité du courant est expliquée par une vitesse de dissolution du coagulant plus élevée.
- L'optimisation de procédé se fait en passant de mode monopolaire au mode bipolaire
- L'augmentation de la surface dissoute des électrodes sacrificielles en utilisant quatre électrodes pour une meilleure élimination des colorants et de réduction de l'intensité du courant appliqué en un temps réactionnel très court avec les électrodes en aluminium dans un milieu acide ou alcalin.
- La réduction de volume de boues formées: Il est ainsi beaucoup plus faible qu'avec un procédé de coagulation-floculation chimique, l'avantage par rapport à la coagulation-floculation chimique est que les floes sont plus compacts et par conséquent les boues produites sont en quantité plus faible.
- 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.

Références bibliographiques :

- [1] **Abbas Meriem et Messaad Aicha:** Utilisation de l'électrocoagulation pour l'élimination de colorants des eaux usées de l'industrie textile, mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf – Msila, (2016 /2017)
- [2] **Ala Abdessemed :** Etude de l'élimination de l'éthyle violet par adsorption sur la kaolinite et le charbon actif et par des méthodes photochimiques en milieu aqueux, Mémoire de magister, Université Mentouri-Constantine, (2009)
- [3] **Alem Salim :** Etude comparative entre coagulation-floculation et électrocoagulation-électroflottation, mémoire de master, Université Abderrahmane mira de Bejaia, (2015/2016)
- [4] **Alexander M. Maley, MD and Jack L. Arbiser, MD, PhD :** Experimental Dermatology, ISSN 0906-6705, 12/2013, Volume 22, Issue 12.
- [5] **Aliouche Sihem :** Etude de l'élimination d'un colorant par différentes méthodes photochimiques en milieu aqueux, Mémoire de magister en chimie, Université Mentouri Constantine, (2007)
- [6] **Amir Anushiravani :** Application of Electrocoagulation Process for Reactive Red 198 DyeRemoval from the Aqueous Solution, Article, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran, (May 2014)
- [7] **Ammouche Ahmed et Slimani yahia:** Traitement des eaux usées par un procédé électrochimique, mémoire de master, université Akli Mohand Oulhadj,Bouira, (2016/2017)
- [8] **O.Annane :** Amélioration de la technique de la technique de défluoruration par le nouveau procédé d'électrocoagulation bipolaire. Thèse de magister en chimie de l'environnement. Université de Tizi-Ouzou, 2011.
- [9] **Benaissa Asma :** Etude de la faisabilité d'élimination de certains colorants textile par certain matériaux déchet d'origine naturelle, mémoire de Master en Université Abou Bakr Balkaid,Tlemcen-Algérie ,(2012).

- [10] **Benamraoui Faouzia:** Elimination des colorants cationiques par des charbons actifs synthétisés à partir des résidus de l'agriculture, mémoire de magister, Université Ferhat Abbas Sétif, (2014)
- [11] **Chebli Derradji :** Traitement des eaux usées industrielles: Dégradation des colorants azoïques par un procédé intégré couplant un procédé d'oxydation avancée et un traitement biologique, thèse de doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas, Sétif (2012)
- [12] **François Zaviska :** Modélisation du traitement de micropolluants organiques par oxydation électrochimique, thèse présentée pour l'obtention du grade de philosophiae doctor (Ph.D.) en sciences de l'eau, Institut National de la Recherche Scientifique, Université du Québec,(2011)
- [13] **Gousmi .N. Bensadok .K:** Etude de L'applicabilité du procédé d'électrocoagulation pour le traitement de rejets pétroliers, ICEMAEP2016, October 30-31, 2016, Constantine, Alger
- [14] **Guitouni Farah :** Oxydation des colorants par les procédés d'oxydation avancée sur des catalyseurs à base de la montmorillonite modifiée, mémoire de master, Université de Tlemcen, (2017)
- [15] **Hayat Anouar, Abderrahim Elhourch, Kacem Elkacemi, and Abdelmajid Zouahri :** Elimination de l'orange 16 colorant azoïque par adsorption sur charbon actif en poudre, Vol. 9 No. 3, Nov. (2014)
- [16] **Hedi Ben Mansour, Oualid Boughzala, Dorra Dridi, Daniel Barillier, Leila Chekir-Ghediraet Ridha Mosrati :** Les colorantes textiles sources de contamination de l'eau : Criblage de la toxicité et des méthodes de traitement, Volume 24, numéro 3, (2011)
- [17] **Inoussa Zongo:** Etude expérimentale et théorique du procédé d'électrocoagulation : application au traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie, thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine,(2009)
- [18] **Jalila Bensaid :** Contribution à la dépollution des eaux usée par électrocoagulation et par adsorption sur des hydroxydes d'Aluminium, thèse de doctorat d'état, Université Mohammed V Agdal, Rabat, (2009)

- [19] **Lamri Naidja** : Elimination du colorant orange ii en solution aqueuse, par voie photochimique et par adsorption, Mémoire de magister en chimie, Université Mentouri de Constantine, (2010)
- [20] **Lemlikchi Wahiba** : 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)
- [21] **Malika Chenna**: Elimination des molécules récalcitrantes par procédés d'oxydation avancés et procédé d'électrocoagulation thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, (2016)
- [22] **Marcel Lecomte** : Violet de Gentiane fiche technique, Cercle des Mycologues du Luxembourg belge asbl (M.L.B.)
- [23] **Merouani Djellali Redha** : Traitement de colorant azoïque et anthraquinonique par procédés d'oxydation avancé (POA), Université Lille1 et Université Abdlehamid ibn Badis Mostaganem (2011)
- [24] **Mélanie Asselin** : Utilisation de l'électrocoagulation dans le traitement des eaux usées industrielles chargées en matière organique, mémoire présenté pour l'obtention du grade de maître de science, Université de Québec, (2007)
- [25] **Mohamed Moukorab A. Daouda, Martin Pépin Aïna, David Agoungbome** : Élimination de la matière organique par le procédé d'électrocoagulation : comparaison à la coagulation chimique.
- [26] **Moïse Desire Dihang** : Mécanismes de coagulation et de floculation de suspensions d'argiles diluées rencontrées en traitement des eaux, thèse de doctorat, Université Paul Sabatier (2007).
- [27] **Mounir Bennajah**: Traitement des rejets industriels liquide par électrocoagulation / électroflotation en réacteur airlift, thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse,(2007)
- [28] **Nait Merzoug Nesrine** : Application des tiges de dattes dans l'adsorption de polluants organiques, mémoire de magister, Université Mohamed Cherif Massaadia Souk-Ahras (2013-2014)

- [29] **Oumar Dia** : Combinaison des procédés de biofiltration et d'électrocoagulation pour le traitement des lixiviats des sites d'enfouissement sanitaires, thèse présentée pour l'obtention du grade de Philosophiae doctor (Ph.D.) en sciences de l'eau, Institut National de la Recherche Scientifique, Université du Québec (2017)
- [30] **Salim Zodi**: Etude de l'épuration d'effluents de composition complexe par électrocoagulation et des couplages intervenants entre le traitement électrochimique et l'étape de séparation : application à l'industrie textile et papetière, thèse doctorat, Université de Lorraine, (2012)
- [31] **Salmi Djaafar et Slimani Kahina** : Application de l'électroflottation-électrocoagulation pour l'élimination d'un colorant textile Cas du Bleu d'indanthrène RS, mémoire de master, Université A. Mira-Bejaia, (2014)
- [32] **Samiha Hammami**: Étude de dégradation des colorants de textile par les procédés d'oxydation avancée : application à la dépollution des rejets industriels, thèse doctorat, Université Paris-Est Institut Francilien des Sciences Appliquées, Université Tunis El Manar Faculté des Sciences de Tunis, (2008)
- [33] **Tir Mohamed** : Utilisation des techniques électrochimiques dans le traitement des émulsions hydrocarbure/eau, thèse doctorat, Université M'hamed Bougara, Boumerdes, (2008)
- [34] **Ularbi Radhia et Maharzi Oum el kheir** : Traitement des eaux usées urbaines de la ville d'Ain Defla par électrocoagulation, mémoire de master, Université Djilali Bounaama, (2015/2016).

Résumé :

Au cours de ces dernières années des études réalisées sur les colorants textiles ont montré qu'ils sont parmi les éléments les plus toxiques, dont les effets de leur toxicité, et sont aussi généralement cancérigènes pour les êtres vivants. En effet, dans le but d'éviter ce fléau, on a cherché des technologies efficaces pour éliminer ces colorants ou au moins atteindre des concentrations très faibles dans les effluents industriels.

Dans ce travail, nous avons étudié expérimentalement l'élimination du colorant Gentian Violet présent dans les effluents des industries du textile par la technique d'électrocoagulation en continu. Dans un premier lieu nous avons étudié l'effet de différents paramètres influençant le procédé (l'effet d'intensité de courant, l'effet de conductivité, l'effet de pH, l'effet de la concentration en colorant) en mode monopolaire (ECM) ensuite, on a pu optimiser le procédé par le mode bipolaire (ECB)

- Nous avons pu conclure que l'EC est un procédé efficace pour le traitement des eaux colorées dans nos conditions expérimentales surtout avec le mode bipolaire avec un taux d'abattement maximal de 98% avec (pH=10, C=50mg/l, I=2.5A, [NaCl]=1g/l).

Mots clés : Electrocoagulation, Electrodes en aluminium, Colorant Gentian Violet,

Abstract :

In recent years studies on textile dyes have shown that they are among the most toxic elements, including the effects of their toxicity, and are also generally carcinogenic to living beings. Indeed, in order to avoid this scourge, we sought effective technologies to eliminate these dyes or at least achieve very low concentrations in industrial effluents.

In this work, we have experimentally studied the elimination of violet Gentian dye present in textile effluents by the continuous electrocoagulation technique. In a first place we studied the effect of different parameters influencing the process (the effect of intensity of current, the effect of conductivity, the effect of pH, the effect of the concentration in dye) by monopolar mode (ECM) then the process could be optimized by the bipolar mode (ECB).

We were able to conclude that EC is an effective method for the treatment of colored water under our experimental conditions, especially with the bipolar mode with a maximum reduction rate of 98% (pH=10, C=50mg/l, I=2.5A, [NaCl]=1g/l).

Keywords: Electrocoagulation, Aluminum electrodes, Gentian Violet dye.

المخلص:

في السنوات الأخيرة ، أظهرت الدراسات على الأصباغ النسيجية أنها من بين أكثر العناصر السمية ، بما في ذلك آثار سُميتها ، وهي أيضاً مسرطنة بشكل عام للكائنات الحية. في الواقع ، من أجل تجنب هذه الآفة ، سعينا لإيجاد تقنيات فعالة للقضاء على هذه الأصباغ أو على الأقل تحقيق تراكيزات منخفضة للغاية في النفايات الصناعية السائلة

في هذا العمل ، درسنا تجريباً القضاء على صبغة جنتيان البنفسجية الموجودة في النفايات السائلة النسيجية بواسطة تقنية الابانة الاليكترية المستمرة. في المقام الأول قمنا بدراسة تأثير العوامل المختلفة المؤثرة على العملية (تأثير شدة التيار ، تأثير الموصلية ، تأثير الأس الهيدروجيني ، تأثير التركيز في الصبغة) ثم في وضع ابانة اليكترية احادية القطب ، بعدها يمكن تحسين العملية عن طريق وضع ثنائي القطب (ECB).

تمكنا من استنتاج أن الابانة الاليكترية طريقة فعالة لمعالجة المياه الملونة ، وخاصة مع وضع ثنائي القطب باعلى معدل تخفيض (pH=10, C=50mg/l, I=2.5A, [NaCl]=1g/l).98%

الكلمات المفتاحية : Electrocoagulation (EC) ، أقطاب الألومنيوم ، صبغة جيننتية بنفسجية ،

Introduction Générale

Chapitre I

Généralité

Chapitre II

Électrocoagulation

Chapitre III

Matériel

Et

Méthodes

Chapitre IV

Résultats

Et

Discussion

Conclusion Générale

**TABLE
DES
MATIERES**