

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



Université 8 Mai 1945 Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologies
Département de Génie des Procédés

Mémoires de Projet de Fin d'Étude
2^{ème} Année Master

**Etude physico-chimique par boue activée et par électrocoagulation-
Application aux eaux usées de Guelma**

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie chimique

Présentée par :

Gharbi Inas

Gharbi Nawel

Sous la direction du :
Dr. Mahmoudi Ourida

Juillet 2019

Remerciements

Nous remercions dieu avant tout

Nous tenons à remercier vivement notre encadreur le docteur Mahmoudi Ourida pour le suivi durant ce travail de projet de fin d'étude et pour les conseils qu'elle nous a donné pour que ce travail mène à sa fin

Par ailleurs nous remercions le chef de département de génie de procédés monsieur Nememcha A/R professeur à l'université de Guelma

Nous tenons aussi à remercier le laboratoire d'électrochimie qui nous a aidé à réaliser la partie expérimentale

Aussi un très grand merci pour le professeur Nouaouria Mohamed salah chef de laboratoire de génie civil et d'hydraulique et aussi un remerciement spécial pour l'ingénieur Wahiba khabatti pour la réalisation de la partie analyse

Enfin un remerciement très chaleureux à nos parents pour nous avoir aidé le long de nos études

Dédicaces

Inas

Nawel

*A ceux qui nous ont tant donné et trouvent aujourd'hui leur rêve
se réaliser*

A nos parents et mères nous dédions ce fruit de tant d'années de travail

A nos frères : Wail, Amine

A nos sœurs : Amel, Nihed, Maram, Djihen

Au petit prince Mohammed Joud

A toute la famille Gharbi grand et petit

A toute nos amis de classe 2^{ème} année Master génie chimique

A tous nos amis les plus proches



Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction générale	1

Chapitre I : Généralités sur les eaux usées

1- Définition	3
2- Origine des eaux usées	3
2-1- Les eaux usées domestiques	3
2-2- Les eaux usées industrielles	3
2-3- Les eaux usées agricoles	4
2-4- Les eaux usées pluviales	4
3- Caractéristiques des eaux usées	5
3-1- Caractéristiques physiques	5
3-1-1- La température	5
3-1-2- Les matières en suspension	5
3-1-3- La turbidité	5
3-1-4- La conductivité électrique	6
3-2- Caractéristiques chimiques	6
3-2-1- Potentiel d'Hydrogène	6
3-2-2- Demande chimique en oxygène	6
3-2-3- Demande biochimique en oxygéné	7
3-2-4- Oxygène dissous	7
3-2-5- Potentiel redox	7
3-2-6- Nitrites	7
3-2-7- Nitrates	8
3-2-8- L'orthophosphate	8
3-2-9- Les sulfates	8
3-3- Caractéristiques organoleptiques	8
3-3-1- La couleur	8
3-3-2- L'odeur	8

4- Les principaux types de pollutions	9
4-1- Pollution chimique	9
4-2- Pollution physique	9
4-3- Pollution biologique de l'eau	9
4-3-1- Les bactéries	9
4-3-2- Les virus	10
4-3-3- Les protozoaires	10

Chapitre II : Fonctionnement de la station d'épuration

1- Description de la station d'épuration des eaux usées de la ville de Guelma	11
1- 1- Localisation	11
1-2- Définition	11
1- 3- Emplacement et accès	11
2- Caractéristiques et nature des effluents	12
2-1- Nature du réseau	12
2-2- Nature du traitement des eaux usées avant l'emplacement de la station	12
2-3- Charges hydrauliques et charges polluantes	12
3- Point de rejet (Destination)	13
3-1- L'eau épurée	13
3-2- Les sous-produits issus de l'épuration	13
4- Méthodes de traitement	13
4-1- Prétraitement	14
4-1-1- Le dégrillage	15
4-1-2- Le dessablage et le déshuilage dégraissage	16
4-2- Traitement primaire	16
4-3- Traitement secondaire	17
4-3-1- L'élimination de l'ammoniaque : la nitrification	18
4-3-2- L'élimination des nitrates : La dénitrification	18
4-4- Traitement tertiaire	18
4-5- Traitement des boues	19
4-5-1- Origine des boues	19

4-5-2- Procédés de traitement des boues	20
4-5-2-1- L'épaississement des boues	20
4-5-2-2- Déshydratation	20
4-5-3- Les lits de séchage	20

Chapitre III : Electrocoagulation

1- Introduction	22
2- Principe d'électrocoagulation	22
3- Diagramme de Pourbaix	24
4- Avantages et inconvénients du procédé d'électrocoagulation	25
4-1- Avantages	25
4-2- Inconvénients	26
5- Elimination de la pollution par électrocoagulation	26
5-1- Les colloïdes	26
5-1-1- Introduction	26
5-1-2- Types des colloïdes	27
5-1-2-1- Les colloïdes hydrophiles	27
5-1-2-2- Les colloïdes hydrophobes	27
5-1-3- Structure et stabilité des colloïdes	27
5-2- Etapes d'élimination de la pollution par électrocoagulation	28
5-2-1- Formation du coagulant	28
5-2-2- Flocculation, flottation et décantation	29
5-2-2-1- Flocculation	29
5-2-2-2- Flottation et décantation	29
6- Facteurs influençant le procédé d'électrocoagulation	30

Chapitre IV : Matériels et mode opératoire

I-Eaux usées traitées par boue activée	31
I-1- Prélèvement et échantillonnage	31

I-2- Analyses physico-chimiques	32
I-2-1-Température	32
I-2-2- Potentiel hydrogène pH	32
I-2-3- Conductivité	33
I-2-4- Oxygène dissous	33
I-3- Les paramètres chimiques	34
I-3-1- Matières en suspension MES	34
I-3- 2- Demande chimique en oxygène DCO	37
I-3-3- Demande biochimique en oxygène DBO ₅	39
I-3-4- Ammonium NH ₄ ⁺	40
I-3-5- Orthophosphate OPO ₄ ⁻	41
II- Eaux usées traitées par électrocoagulation	42
II-1- Matériels	42
II-2- Mode opératoire	42
II-3- Analyses physico-chimiques	43
II-3-1- Détermination des ions ammonium NH ₄ ⁺	43
II-3-2- Détermination des nitrites NO ₂ ⁻	44
II-3-3- Détermination des sulfates SO ₄ ²⁻	45
II-3-4- Détermination des phosphates PO ₄ ³⁻	47

Chapitre V : Résultats et discussion

1- Résultats des analyses physico-chimiques de l'eau traitée par la boue activée	49
1-1- Température	49
1-2- Conductivité	50
1-3- Oxygène dissous O ₂	51
1-4- Demande chimique en oxygène DCO	51
1-5- Demande biochimique en oxygène DBO ₅	52
1-6- Matières en suspension MES	53
1-7- Ammonium NH ₄ ⁺	54
1-8- Orthophosphate OPO ₄ ⁻	55
2- Résultats des analyses physico-chimiques de l'eau traitée par électrocoagulation	55

2-1- Variation des paramètres en fonction du temps à différents courant	55
2-1-1- Température	55
2-1-2- Potentiel d'hydrogène	56
2-1-3- Conductivité	57
2-2- Influence de la filtration sur les paramètres physico-chimiques	57
2-2-1- Température	57
2-2-2- Potentiel d'hydrogène	58
2-2-3- Conductivité	59
3- Variation des paramètres MES, concentration des différentes ions en fonction du temps et du courant	59
2-3-1- Matières en suspension	59
2-3-2- Variation d'ammonium (NH_4^+) en fonction du temps et du courant	60
2-3-3- Variation des nitrites (NO_2^-) en fonction du temps et du courant	61
2-3-4- Variation des sulfates (SO_4^{2-}) en fonction du temps et du courant	63
2-3-5- Variation des phosphates (PO_4^{3-}) en fonction du temps et du courant	64
Conclusion générale	66
Références bibliographiques	
Annexe	

Chapitre II : Fonctionnement de la station d'épuration

Figure II-1: Localisation de la STEP de la ville de Guelma	11
Figure II-2 : Différentes étapes de traitement	14
Figure II-3 : Dégrillage	15
Figure II-4: Dessablage et déshuilage	16
Figure II-5 : Décanteur primaire	17
Figure II-6 : Bassin d'aération	18
Figure II-7 : Bassin de désinfection	19
Figure II-8 : Epaisseur des boues	20
Figure II-9 : Lit de séchage	21

Chapitre III : Electrocoagulation

Figure III-1 : Schéma du principe de l'électrocoagulation	23
Figure III-2 : Diagramme de prédominance des différents hydroxydes d'aluminium en fonction du pH	24
Figure III-3 : Diagramme potentiel-pH de l'aluminium (1mol/l) et de l'eau $E_v = f(\text{pH})$ à 25 °C	25
Figure III- 4 : Distribution ionique autour d'un colloïde	28

Chapitre IV: Matériels et mode opératoire

Figure IV-1 : Prélèvement à l'entrée	31
Figure IV-2 : Prélèvement à la sortie	32
Figure IV-3 : PH-mètre et conductimètre	33
Figure IV-4 : Oxymètre utilisé pour la mesure de l'oxygène dissous	34
Figure IV-5 : Pompe à vide	35
Figure IV-6 : Balance analytique	35
Figure IV-7 : Etuve	36
Figure IV-8 : Photo représentant la manipulation de MES	36

Figure IV-9 : Réacteur utilisé pour la mesure de la DCO	37
Figure IV-10 : Spectrophotomètre utilisé au niveau de la STEP	38
Figure IV-11 : Photo représentant l'analyse de DCO	38
Figure IV-12 : Photo montrant les échantillons dans le thermostat à 20°C pendant 5 jours	39
Figure IV-13 : Photo représentant la manipulation pour la détermination de NH_4^+	40
Figure IV-14 : Photo montrant la manipulation pour la détermination d' OPO_4^-	41
Figure IV-15 : Dispositif expérimental utilisé pour le traitement des eaux usées par électrocoagulation	43
Figure IV-16 : Echantillons des différentes eaux (brute, traitée par boue activée, par électrocoagulation) après ajout de NH_4 -1, NH_4 -2 et NH_4 -3	44
Figure IV-17 : Photomètre utilisé au niveau du laboratoire d'hydraulique	45
Figure IV-18 : Echantillons des différentes eaux (brute, traitée par boue activée, par électrocoagulation) après ajout du réactif NO_2 -1	45
Figure IV-19 : Bain-marie utilisé pour le chauffage	46
Figure IV-20 : Filtrations des solutions	47
Figure IV-21 : Echantillons des différentes eaux (brute, traitée par boue activée, par électrocoagulation) après ajout de SO_4 -1, SO_4 -2, SO_4 -3 et SO_4 -4	47
Figure IV-22 : Echantillons des différentes eaux (brute, traitée par boue activée, par électrocoagulation) après ajout de réactif PO_4 -1 et PO_4 -2	48

Chapitre V: Résultats et discussion

Figure V-1 : Evolution de la température (T°) en fonction des mois décembre, janvier, février, mars et avril avant et après épuration	50
Figure V-2 : Evolution de la conductivité en fonction des mois décembre, janvier, février, mars et avril avant et après épuration	50
Figure V-3 : Evolution de l'oxygène dissous (O_2) en fonction des mois décembre, janvier, février, mars et avril avant et après épuration	51
Figure V-4 : Evolution de la demande chimique en oxygène (DCO) en	52

fonction des mois décembre, janvier, février, mars et avril avant et après épuration	
Figure V-5 : Evolution de la demande biochimique en oxygène (DBO ₅)	53
en fonction des mois décembre, janvier, février, mars et avril avant et après épuration	
Figure V-6 : Evolution de la matière en suspension (MES) en fonction	54
des mois décembre, janvier, février, mars et avril avant et après épuration	
Figure V-7 : Evolution d'ammonium (NH ₄ ⁺) en fonction des mois décembre,	54
janvier, février, mars et avril avant et après épuration	
Figure V-8: Evolution des orthophosphates (OPO ₄ ⁻) en fonction des mois	55
décembre, janvier, février, mars et avril avant et après épuration	
Figure V-9 : Variation de la température en fonction du temps d'E.C	56
Figure V-10 : Variation du potentiel d'hydrogène en fonction du temps d'E.C	56
Figure V-11 : Variation de la conductivité en fonction du temps d'E.C	57
Figure V-12 : Variation de la température en fonction du temps	58
(avant filtration et après filtration)	
Figure V-13 : Variation de potentiel d'hydrogène en fonction du temps	58
(avant filtration et après filtration)	
Figure V-14 : Variation de la conductivité en fonction du temps	59
(avant filtration et après filtration)	
Figure V-15 : Variation de matière en suspension en fonction du temps	60
Figure V-16 : Variation de matière en suspension en fonction du courant	60
Figure V-17 : Variation d'ammonium en fonction du temps	61
Figure V-18 : Variation d'ammonium en fonction du courant	61
Figure V-19 : Variation des nitrites en fonction du temps	62
Figure V-20 : Variation des nitrites en fonction du courant	62
Figure V-21 : Variation des sulfates en fonction du temps	63
Figure V-22 : Variation des sulfates en fonction du courant	64
Figure V-23 : Variation de phosphate en fonction du temps	65
Figure V-24 : Variation de phosphate en fonction du courant	65

Chapitre II : Fonctionnement de la station d'épuration

Tableau II-1 : Charge polluante (STEP de Guelma 2010)	12
Tableau II-2 : Charge hydraulique de STEP de Guelma 2010 (STEP de Guelma 2010)	13

Chapitre V: Résultats et discussion

Tableau V-1 : Résultats des analyses physico-chimiques pour l'année 2018- 2019	50
---	----

ONA: Office National d'Assainissement

MES: Matières en suspension

CE: Conductivité électrique

pH: Potentiel d'Hydrogène

DCO: Demande chimique en oxygène

MO: Matière organique

DBO₅: Demande biochimique en oxygène

O₂: Oxygène dissous

NO₂⁻: Nitrite

NO₃⁻: Nitrate

NH₄⁺: Ammonium

SO₄⁻²: Sulfate

STEP: Station d'épuration

SP1: Premier poste de refoulement (OUEDMAIZ)

SP2: Second poste de refoulement (OUEDSKHOUNE)

EC: Electrocoagulation

OPO₄⁻: Orthophosphate

PO₄⁻³: Phosphate

OMS: Organisation mondiale de la santé

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est une denrée de plus en plus rare en Algérie et de moins en moins renouvelable. Elle fait actuellement l'objet d'une exploitation concurrentielle entre les besoins de la population, ceux de l'agriculture et de l'industrie qui se disputent une disponibilité limitée [1].

L'importance de l'eau dans l'économie humaine ne cesse de croître et l'approvisionnement en eau de bonne qualité devient de plus en plus difficile, tant en raison de l'accroissement de la population et de son niveau de vie, que de développement accéléré des techniques industrielles modernes [2].

En Algérie, peu d'importance est accordée à la couverture des services d'assainissement comparée à la couverture des services d'approvisionnement en eau et encore moins d'importance est accordée à l'épuration. En effet, seules 20 % des eaux usées collectées en Algérie sont traitées, contre une couverture du réseau d'assainissement de l'ordre de 85 %. D'après un rapport publié par l'Office National d'Assainissement (ONA) en 2015, l'Algérie compte 120 stations d'épuration qui produisent un volume de 14,6 millions de mètres cubes par mois d'eaux usées épurées. Toutefois ce volume reste très réduit par rapport aux grandes quantités d'eaux usées produites et qui sont toujours déversées dans les différents milieux naturels [3].

La région de Guelma, comme la plupart des villes algériennes endure des conséquences de la pollution hydrique. Elle est devenue après l'indépendance, en plus de sa vocation agricole, un pôle industriel ce qui a causé un exode rural important. Cependant, le sous-bassin de la moyenne Seybouse, où se localise notre région d'étude, n'échappe pas à la pollution. L'oued Seybouse, principal cours d'eau, qui traverse la plaine de Guelma, Bouchegouf sur plus de 45 km du sud au nord-est, se trouve particulièrement touché par ce problème. Pour cela, la wilaya de Guelma a mis en service une station d'épuration (STEP), qui est rentrée en service en 2008 et avait pour objectif l'épuration de 43388 m³/j d'eaux usées, d'où un apport non négligeable pour permettre l'irrigation des terres agricoles [4].

Les procédés mécaniques et physiques comme le dégrillage, le dessablage et les traitements biologiques par boues activées ont permis d'éliminer une grande partie des matières contenues dans l'eau. Mais après ces opérations l'eau contient toujours une quantité des substances composées de matière en suspension, de colloïdes et des particules très fines difficilement décantables [5].

L'électrocoagulation est une technique dérivée de la coagulation classique. Elle permet d'éliminer les particules colloïdales et la pollution dissoute grâce à la production in situ de floes d'hydroxydes obtenus par dissolution anodique d'électrodes solubles (Fe, Al). Les floes

d'hydroxydes générés par voie électrochimique sont plus compacts que ceux obtenus par la méthode chimique. En outre, l'électrocoagulation requiert moins de réactifs et permet de réduire le volume de boues générées comparativement à la coagulation chimique qui nécessite des concentrations élevées de réactifs, entraînant ainsi une augmentation du volume de boues [6].

Le procédé d'électrocoagulation crée, au sein de l'eau que l'on souhaite épurer, des floes d'hydroxydes métalliques par électrodissolution d'anodes solubles (le fer et l'aluminium sont les matériaux d'anode les plus utilisés) [7]. L'électrocoagulation (EC) peut ainsi constituer une alternative. L'utilisation d'électrodes solubles comme l'aluminium permet de produire à l'anode des ions Al^{3+} qui réagiront par la suite en solution avec les ions OH^- pour former des hydroxydes d'aluminium $Al(OH)_3$. Ces derniers réagissent comme un coagulant permettant la coagulation-floculation des polluants. La production des fines bulles d'air d'hydrogène (H_2) de taille bien adaptée (10-50 micromètres) par électrolyse de l'eau entraîne dans leur mouvement ascensionnel les floes ainsi formés [8].

Dans cette optique notre travail est structuré en cinq chapitres qui sont les suivants :

- Le premier chapitre donne des généralités sur les eaux usées ;
- Le deuxième chapitre est consacré au fonctionnement de la station d'épuration des eaux usées de Guelma et les étapes du procédé d'épuration à boues activées ;
- Le troisième chapitre traite le procédé d'électrocoagulation ;
- Le quatrième chapitre présente le matériel et le mode opératoire utilisés ;
- Le cinquième chapitre est consacré aux résultats et discussion ;
- Enfin une conclusion générale.

CHAPITRE I
GENERALITES SUR LES
EAUX USEES

I-1- Définition

Les eaux usées sont utilisées pour des usages domestiques, industriels ou même agricole, constituant donc un effluent pollué qui sont rejetées dans un émissaire d'égout. Ils regroupent les eaux usées domestiques (les eaux vannes et les eaux ménagères), les eaux de ruissellement et les effluents industriels (les eaux usées des usines) [9].

I-2- Origine des eaux usées

L'eau, propre et potable à l'origine subit une altération et une dégradation par les multiples usages que l'on en fait dans les habitations, dans les établissements publics et dans les usines.

Les matières ajoutées dans l'eau lors de son utilisation se retrouvent dans les eaux usées soit à l'état dissous soit en suspension, soit à l'état solide [10].

Suivant l'origine et la qualité des substances polluantes, on distingue quatre catégories d'eaux usées:

- Les eaux domestiques;
- Les eaux industrielles;
- Les eaux agricoles;
- Les eaux de ruissellement (pluviales).

I-2-1- Les eaux usées domestiques

Elles proviennent des différents usages domestiques de l'eau et sont essentiellement porteuses de pollution organique. Elles se répartissent en eaux ménagères, qui ont pour origine les salles de bains et les cuisines, et sont généralement chargées de détergents, de graisses, de solvants, de débris organiques, etc. Et en eaux vannes ; il s'agit des rejets des toilettes, chargés de diverses matières organiques azotées et de germes fécaux [11].

I-2-2- Les eaux usées industrielles

Elles sont très différentes des eaux usées domestiques. 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 [12]. Elles peuvent également contenir :

- Des graisses (industries agroalimentaires, équarrissage);

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

Dans certains cas, avant d'être rejetées dans les réseaux de collecte, les eaux industrielles doivent faire l'objet d'un prétraitement de la part des industriels. Elles ne sont mêlées aux eaux domestiques que lorsqu'elles ne présentent plus de danger pour les réseaux de collecte et ne perturbent pas le fonctionnement des usines de dépollution [13].

I-2-3- Les eaux usées agricoles

Il s'agit de rejets liquides agricoles issus du ruissellement d'eau d'irrigation qui entraîne des engrais, des pesticides, des herbicides ou des rejets organiques dus à un élevage important [14]. Dans le contexte d'une agriculture performante et intensive, l'agriculteur est conduit à utiliser divers produits d'origine industrielle ou agricole dont certains présentent ou peuvent présenter, des risques pour l'environnement et plus particulièrement pour la qualité des eaux. Il s'agit principalement [15]:

- Des fertilisants (engrais minéraux du commerce ou déjections animales produites ou non sur l'exploitation);
- Des produits phytosanitaires (herbicides, fongicides, insecticides etc.).

I-2-4- Les eaux usées pluviales

Ce sont les eaux de ruissellement (eaux pluviales, eaux d'arrosage des voies publiques, eaux de lavage des caniveaux, des marchés et des cours).

Les eaux qui ruissellent sur les toitures, les cours, les jardins, les espaces verts, les voies publiques et les marchés entraînent toutes sortes de déchets minéraux et organiques : de la terre, des limons, des déchets végétaux etc., et toute sortes de micropolluants (hydrocarbures, pesticides, détergents etc. [16].

I-3- Caractéristiques des eaux usées

Les eaux usées sont caractérisées en fonction de leur composition physique, chimique et biologique. Selon le niveau de polluants et les réglementations locales, un traitement physique, chimique et biologique est utilisé. La plupart du temps, les trois traitements sont combinés ensemble pour obtenir la meilleure qualité d'eau. Les caractéristiques des eaux usées varient considérablement d'une industrie à l'autre. Par conséquent, les caractéristiques particulières détermineront les techniques de traitement à utiliser pour satisfaire aux exigences en matière de rejets ou de conformité. En raison du grand nombre de matières polluantes, les caractéristiques des eaux usées ne sont généralement pas prises en compte pour chaque substance [17].

I-3-1- Caractéristiques physiques

I-3-1-1- La température

La température est un facteur écologique important du milieu. Elle permet de corriger les paramètres d'analyse dont les valeurs sont liées à la température (conductivité notamment). De plus en mettant en évidence des contrastes de température de l'eau sur un milieu, il est possible d'obtenir des indications sur l'origine et l'écoulement de l'eau. C'est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision [18]. En effet celle-ci joue un rôle dans la solubilité des gaz, dans la dissociation des sels dissous et dans la détermination du pH, pour la connaissance de l'origine de l'eau et les mélanges éventuels, etc. En outre, cette mesure est très utile pour les études limnologiques. Et d'une façon générale, la température des eaux est influencée par l'origine dont elles proviennent (superficielles ou profondes) [19].

I-3-1-2- Les matières en suspension (MES)

Les matières en suspension sont constituées de toutes les particules organiques ou minérales véhiculées par les eaux. Elles peuvent être composées de particules de sable, de terre et de sédiment arrachées par l'érosion, de divers débris apportés par les eaux usées ou les eaux pluviales très riches en MES, d'êtres vivants planctoniques (notamment les algues) [20].

I-3-1-3- La turbidité

La turbidité des effluents résiduaux et des eaux polluées est en général très élevée, elle ne peut de ce fait être exprimée en gouttes de silice ou de mastic. La turbidité est donc définie par absorptiomètre. La mesure est effectuée au moyen d'un spectrophotomètre à 720

nm, car à cette longueur d'onde l'influence de la couleur est négligeable. Pour éviter l'interférence due à la présence de grosses particules décantables, il convient de les éliminer au préalable par décantation [21].

I-3-1-4- La conductivité électrique

La conductivité électrique, en tant que paramètre brut, mesure la concentration en ions d'une solution. Plus il y a de sels, d'acides ou de bases dissociés dans une solution, plus sa conductivité sera élevée. Dans l'eau et l'eau usée, il s'agit surtout d'ions de sels dissous. La conductivité exprime ainsi la charge en sels de l'eau usée ou le degré de pureté d'une eau [22].

I-3-2- Caractéristiques chimiques:

I-3-2-1- Potentiel d'Hydrogène (pH)

Le potentiel d'Hydrogène pH mesure la concentration en ions H^+ de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14,7 étant le pH de neutralité. Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibre physico-chimique et dépend de facteurs multiples, dont l'origine de l'eau [23]. Le pH exprime le potentiel en hydrogène, indique la concentration en ion H^+ , il joue un rôle important dans [24];

- Les propriétés physico-chimiques (l'acidité et l'alcalinité);
- L'efficacité de certains procédés (coagulation-floculation);
- Les processus biologiques.

I-3-2-2- Demande chimique en oxygène (DCO)

Elle s'exprime en milligramme par litre (mg/l) d'oxygène et correspond effectivement à la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder dans des conditions opératoires définies, les matières organiques présentes dans un échantillon donné [25]. La valeur du rapport DCO/DBO indique le coefficient de la biodégradable d'un effluent, il permet aussi de définir son origine. Généralement la valeur de la DCO est :

DCO = 1.5 à 2 fois DBO	pour les eaux usées urbaines.
DCO = 1 à 10 fois DBO	pour tout l'ensemble des eaux résiduaires.
DCO > 2.5 fois DBO	pour les eaux usées industrielles.

La relation empirique de la de la matière organique (MO) en fonction de DBO_5 et DCO est donnée par l'équation suivante :

$$MO = (2DBO_5 + DCO) / 3 \quad (I-1)$$

I-3-2-3- Demande biochimique en oxygène (DBO_5)

La DBO_5 exprime la quantité d'oxygène consommée par les bactéries à 20°C et à l'obscurité pendant 5 jours d'incubation d'un échantillon préalablementensemencé, temps qui assure l'oxydation par voie aérobie. Pour la mesure, on prend comme référence la quantité d'oxygène consommée au bout de 5 jours c'est la DBO_5 [26].

I-3-2-4- Oxygène dissous (O_2)

L'oxygène est l'un des paramètres particulièrement utile pour l'eau et constitue un excellent indicateur de sa qualité. C'est l'un des paramètres les plus sensibles à la pollution. Sa valeur nous renseigne sur le degré de pollution et par conséquent sur le degré de l'autoépuration d'un cours d'eau [27].

I-3-2-5- Potentiel redox

Le potentiel redox est mesurée en mV, il indique la force avec laquelle la solution de mesure agit en oxydation ou en réduction. Une valeur de tension négative signifie que la solution a un effet réducteur par rapport à une électrode étalon hydrogène. Une valeur positive indique que la solution agit en oxydation.

L'élimination de microorganismes (désinfection) étant en relation directe avec le pouvoir oxydant, on utilise avec succès le potentiel redox pour surveiller les procédés de désinfection. On effectue des mesures redox également en contrôle de la dénitrification d'eaux usées (détermination du point d'inflexion redox) [28].

I-3-2-6- Nitrites (NO_2^-)

Les ions nitrites (NO_2^-) sont un stade intermédiaire entre l'ammonium (NH_4^+) et les ions nitrates (NO_3^-). Les bactéries nitrifiantes (nitrosomonas) transforment l'ammonium en nitrites. Cette opération, qui nécessite une forte consommation d'oxygène, est la nitrification. Les nitrites proviennent de la réduction bactérienne des nitrates, appelée dénitrification. Les nitrites constituent un poison dangereux pour les organismes aquatiques, même à de très faibles concentrations. La toxicité augmente avec la température [17].

I-3-2-7- Nitrates (NO_3^-)

Les nitrates constituent le stade final de l'oxydation de l'azote organique dans l'eau. Les bactéries nitrifiantes (nitrobacters) transforment les nitrites en nitrates. Les nitrates ne sont pas toxiques ; mais des teneurs élevées en nitrates provoquent une prolifération algale qui contribue à l'eutrophisation du milieu. Leur potentiel reste néanmoins relatif à leur réduction en nitrites [13].

I-3-2-8- L'orthophosphate (OPO_4^-)

Le phosphore est à la fois le métalloïde le plus nécessaire à la vie aquatique et celui qui se présente sous la forme la plus simple : celle de l'orthophosphate. La présence de phosphates dans les eaux naturelles est liée à la nature des terrains traversés, à la décomposition des matières organiques et à l'utilisation des détergents. La grande partie du phosphore organique provient également des déchets du métabolisme des protéines et de son élimination sous forme de phosphates dans les urines par l'homme [29].

I-3-2-9- Les sulfates (SO_4^{2-})

Les sulfates dissous dans l'eau proviennent de certains minéraux en particulier du gypse, où apparaît à partir de l'oxydation de minéraux sulfureux. La limite supérieure admise dans l'eau potable est 250 mg/l [30].

I-3-3- Caractéristiques organoleptiques**I-3-3-1- La couleur**

La coloration d'une eau est dite vraie ou réelle lorsqu'elle est due aux seules substances en solution. Elle est dite apparente quand les substances en suspension y ajoutent leur propre coloration. Les couleurs réelles et apparentes sont approximativement identiques dans l'eau claire et les eaux de faible turbidité [31].

I-3-3-2- L'odeur

Toute odeur est un signe de pollution ou de présence de matières organiques en décomposition.

L'odeur peut être définie comme [32]:

- L'ensemble des sensations perçues par l'organe olfactif en flairant certaines substances volatiles;

- La qualité de cette sensation particulière provoquée par chacune de ces substances.

I-4- Les principaux types de pollutions

I-4-1- Pollution chimique

La pollution chimique de l'eau est due essentiellement aux déversements de polluants organiques et des sels de métaux lourds par les unités industrielles. L'enrichissement des sols pour intensifier l'agriculture par diverses catégories d'engrais et de pesticides est également à l'origine de la pollution chimique des sources et des nappes souterraines. Ces substances exercent un effet toxique sur les matières organiques et les rendent plus dangereuses. Les polluants chimiques sont classés en cinq catégories [33] :

- Les polluants chimiques dits indésirables (nitrates, les composés phosphorés et les sels ammoniacaux);
- Les polluants chimiques toxiques;
- Les pesticides et produits apparentés;
- Les hydrocarbures;
- Les détergents.

I-4-2- Pollution physique

IL s'agit d'une pollution qui se traduit par la présence des particules de taille et de matière très variés dans l'eau ; qui lui confèrent un caractère trouble. On distingue aussi les matières décantées (plus lourdes que l'eau elle-même), les matières flottables (plus légères que l'eau elle-même) et les matières non séparables (de même densité que l'eau) [34].

Elle est due aux agents physiques (tout élément solide entraîné par l'eau). Elle regroupe la pollution mécanique (effluents solides), la pollution thermique (réchauffement de l'eau par usines) et la pollution atomique (retombées de radioéléments issus des explosions d'armes nucléaires, résidus des usines atomique et accidents nucléaires) [35].

I-4-3- Pollution biologique de l'eau

I-4-3-1- Les bactéries

Les bactéries sont les microorganismes les plus communément rencontrés dans les eaux usées. Les eaux usées urbaines contiennent environ 10^6 à 10^7 bactéries /100 ml dont la plupart sont des proteus et des entérobactéries, 10^3 à 10^4 des streptocoques et de 10^2 à 10^3 des

clostridium. La concentration en bactéries pathogène est très variable et peut atteindre 10⁴ germes par litre. Parmi les bactéries pathogènes les plus détectées, les salmonelles, dont celles responsables de la typhoïde, des paratyphoïdes et des troubles intestinaux [36].

I-4-3-2- Les virus

Ce sont des organismes infectieux de très petite taille (10 à 350 nm) qui se reproduisent en infectant un organisme hôte. Les virus ne sont pas naturellement présents dans l'intestin, contrairement aux bactéries. On estime leur concentration dans les eaux usées urbaines comprise entre 10³ et 10⁴ particules par litre. Leur isolement et leur dénombrement dans les eaux usées sont difficiles, ce qui conduit vraisemblablement à une sous-estimation de leur nombre réel. Les virus entériques sont ceux qui se multiplient dans le trajet intestinal; parmi les virus entériques humains les plus importants, il faut citer les entérovirus (exemple : polio), les rotavirus, les rétrovirus, les adénovirus et le virus de l'hépatite A [37].

I-4-3-3- Les protozoaires

Les protozoaires sont des organismes unicellulaires munis d'un noyau, plus complexes et plus gros que les bactéries. La plupart des protozoaires pathogènes sont des organismes parasites, c'est-à-dire qu'ils se développent aux dépens de leur hôte. Certains protozoaires adoptent au cours de leur cycle de vie une forme de résistance, appelée kyste. Cette forme peut résister généralement aux procédés de traitements des eaux usées [38].

CHAPITRE II
FONCTIONNEMENT DE
LA STATION
D'EPURATION

II-1- Description de la station d'épuration des eaux usées de la ville de Guelma

II-1- 1- Localisation

La station d'épuration de l'eau usée de la wilaya de Guelma est fonctionnelle depuis le 28 Février 2008 (**Figure II-1**).



Figure II-1: Localisation de la STEP de la ville de Guelma

II-1-2- Définition

Une station d'épuration est une usine de dépollution des eaux usées avant leur rejet au milieu naturel, en général dans une rivière, elle fait partie du réseau d'assainissement. La station rejette finalement dans la nature une eau propre mais non potable. Les résidus de traitement sont récupérés sous forme de boues [39].

II-1- 3- Emplacement et accès

La station est implantée sur un terrain agricole de 08 Hectares à 1 Kilomètre environ au nord de la ville de Guelma, sur le flanc droit de la vallée développée par oued SEYBOUSE, et sans habitations existantes à la proximité.

Elle est alimentée par 02 conduites de refoulement, l'une de diamètre 700 mm en provenance du premier poste de refoulement SP1 (OUEDMAIZ) avec un débit de 1575 m³/h, l'autre en

diamètre 500 mm en provenance du second poste de refoulement SP2 (OUEDSKHOUNE) son débit est de 1125 m³/h, et l'emplacement de ces 02 postes était également pris en considération [39].

II-2- Caractéristiques et nature des effluents

La station d'épuration est prévue alimentée par des effluents d'origine domestique (à hauteur de 199 086 équivalent- habitants) en 2013 [39].

II-2-1- Nature du réseau

Les eaux usées domestiques de la ville de Guelma sont collectées en gravitant sur 2 bassins versants par un ensemble de réseaux d'assainissement existant. Les 2 tronçons gravitaires rejoignent chacun un point bas (emplacement des postes de refoulement à équiper). Le réseau est de type unitaire. Le débit de point de temps de pluie peut ainsi atteindre 4182 m³/h pour un débit de temps sec de 2091 m³/h d'après les données du dossier d'appel d'offres [39].

II-2-2- Nature du traitement des eaux usées avant l'emplacement de la station

Les effluents sont collectés par le réseau d'assainissement existant, mais ne subissaient pas de traitement particulier [39].

II-2-3- Charges hydrauliques et charges polluantes

Les différents nombres de charges à retenir sont présentés sur les tableaux suivants :

Tableau II-1: Charge polluante (STEP de Guelma 2010)

Paramètres	Charge première phase perspective 2012	
	Kg/J	mg/l
DBO₅	10800	338
DCO	16000	500
MES	14000	438

Tableau II-2: Charge hydraulique de STEP de Guelma 2010 (STEP de Guelma 2010)

	Volume journalier eaux usées (m ³ /j)	Volume maxi journalier temps pluie (m ³ /j)	Débit moyen temps sec (m ³ /j)	Débit moyen temps pluie (m ³ /j)	Débit de point temps sec (m ³ /j)	Débit de temps pluie m ³ /j
Charge première phase perspective 2010	32000	43388	1333	1807	2091	4182

II-3- Point de rejet (Destination)

II-3-1- L'eau épurée

Le rejet est réalisé dans l'Oued SEYBOUSE situé en contrebas de la station d'épuration à 331 m de distance, les effluents sont acheminés jusqu'à l'Oued par une canalisation de rejet [39].

II-3-2- Les sous-produits issus de l'épuration

- **Boues:** Les boues sont épaissies puis hydratées sur lits de séchage avant leur envoi en décharge (ou autres = utilisation Agricole).
- **Les produits de dégrillage :** Les refus de dégrillage sont évacués par un tapis transporteur, ou une vis de convoyage dans une benne ordure.
- **Graisses et huiles:** Elles sont stockées dans une fosse à graisse avant enlèvement.
- **Sables :** Ils sont extraits de l'ouvrage de prétraitement, séparés de leur eau par un classificateur, puis stockés dans une benne relevable [39].

II-4- Méthodes de traitement

La ligne de traitement complète des eaux résiduaires peut être schématiquement scindée en deux filières :

- La filière eau dans laquelle l'eau est débarrassée de tous les polluants avant son rejet dans le milieu naturel;
- La filière boue dans laquelle les résidus générés par la filière eau sont traités et déshydratés avant leur évacuation [40].

Les différentes procédés de traitement des eaux dans la station d'épuration sont selon la (Figure II-2):

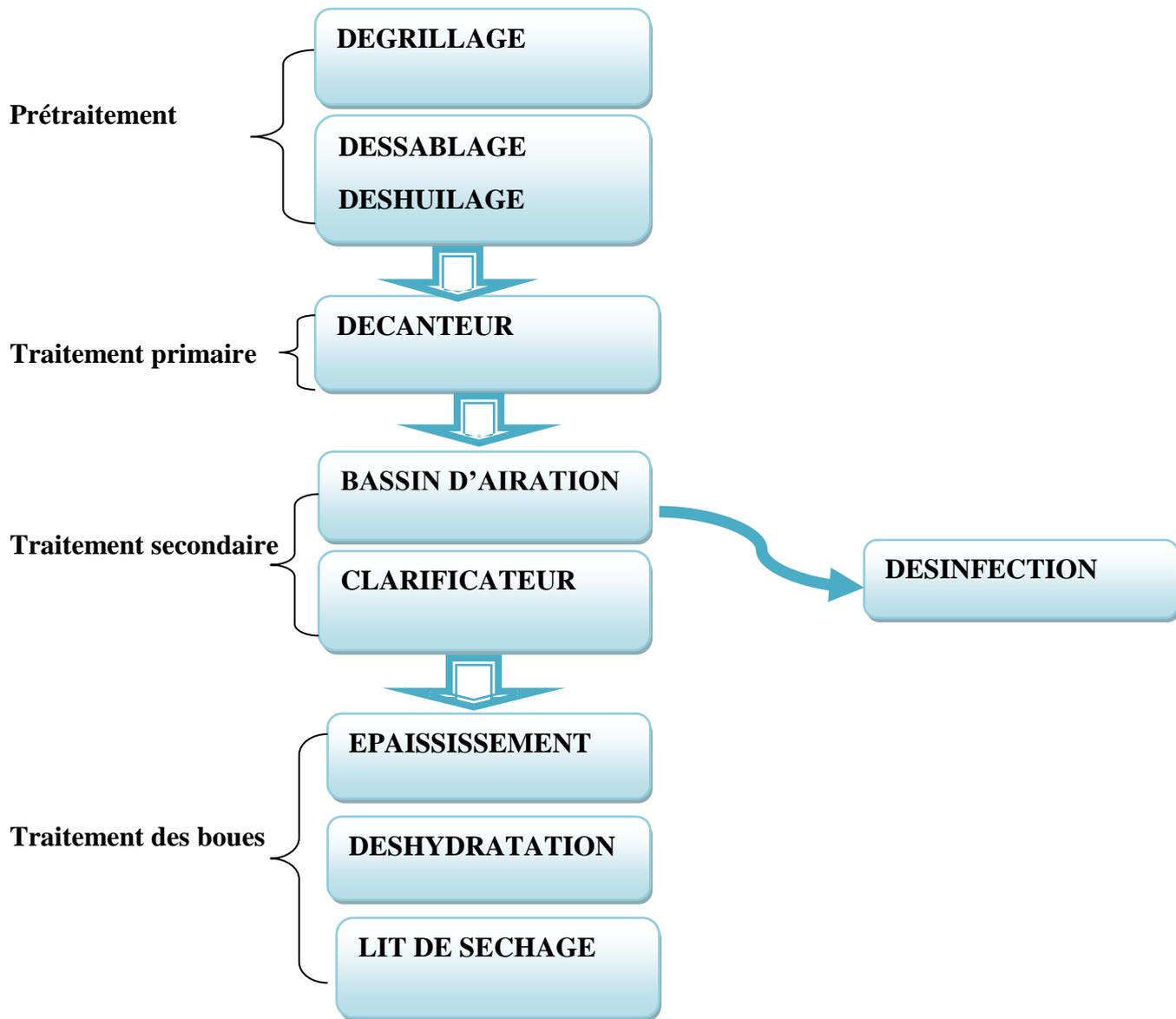


Figure II-2: Différentes étapes de traitement

II-4-1- Prétraitement

Les prétraitements ont pour objectif d'éliminer les éléments les plus grossiers (les déchets volumineux «dégrillage», les sables et graviers «dessablage» et les graisses «dégraisage-déshuilage»), qui sont susceptibles de gêner les traitements ultérieurs et d'endommager les équipements [41].

II-4-1-1- Le dégrillage

Le dégrillage et le tamisage permettent de retirer de l'eau les déchets insolubles tels que les branches, les plastiques, serviettes hygiéniques, etc. En effet, ces déchets ne pouvant pas être éliminés par un traitement biologique ou physico-chimique, il faut donc les éliminer mécaniquement. Pour ce faire, l'eau usée passe à travers une ou plusieurs grilles dont les mailles sont de plus en plus serrées. Celles-ci sont en général équipées de systèmes automatiques de nettoyage pour éviter leur colmatage, et aussi pour éviter le dysfonctionnement de la pompe (dans les cas où il y aurait un système de pompage) (**Figure II-3**) [42].

- **Un dégrillage grossier** : l'eau brute passe à travers une première grille qui permet l'élimination des matières de diamètre supérieur à 50 mm [43].
- **Un dégrillage fin** : après le relevage de l'eau par quatre pompes (1250m³/h pour chacune), il passe par deux grilles à câble composées de barreaux placés verticalement ou inclinés de 60 à 80° sur l'horizontale. L'espacement des barreaux est de 20 mm, la vitesse moyenne de passage entre les barreaux est comprise entre 0,6 et 1 m/s [43].



Figure II-3: Dégrillage

II-4-1-2- Le dessablage et le déshuilage dégraissage

Le dessablage-déshuilage permet la décantation des résidus les plus denses (sable) et la flottation des déchets les plus légers (huiles), à l'aide des pompes, qui sont présents dans les eaux usées. Le système de pont racleur de surface pousse les flottants dans une fosse à graisse (Les graisses seront traités) et les sables sont aspirés par des pompes aspiratoires vers un classificateur de sable pour son séchage ensuite le sable séché est stocké dans une benne.

Ces deux opérations sont réalisées ensemble bien que correspondant à deux phénomènes physique différents [44]. Le déshuilage est une opération de séparation liquide-liquide, alors que le dégraissage est une opération de séparation solide-liquide (à la condition que la température de l'eau soit suffisamment basse, pour permettre le figeage des graisses) (**Figure II-4**) [45].



Figure II-4: Dessablage et déshuilage

II-4-2- Traitement primaire

Le procédé a pour but d'extraire le maximum de matières en suspensions et de matières organiques facilement décantables. Trois voies de traitement sont possibles [46]:

- **La décantation:** le principe de séparation solide-liquide est la pesanteur, les matières en suspension ou colloïdales tendent à se séparer du liquide par sédimentation (**Figure II-5**).

- **La flottation:** par opposition à la décantation, la flottation est un procédé de séparation solide-liquide ou liquide-liquide qui s'applique à des particules dont la masse volumique réelle est inférieure à celle du liquide qui les contient [47].
- **La décantation associée à l'utilisation d'un coagulant- floculant:** le principe est de favoriser l'agrégation des molécules en suspension grâce aux techniques de coagulation et de floculation de façon à augmenter la sédimentation grâce à l'obtention de floes plus gros [47].



Figure II-5: Décanteur primaire

II-4-3- Traitement secondaire

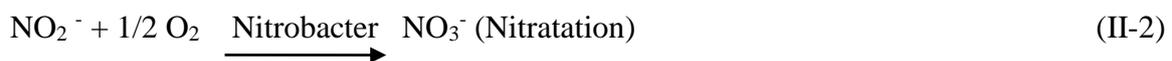
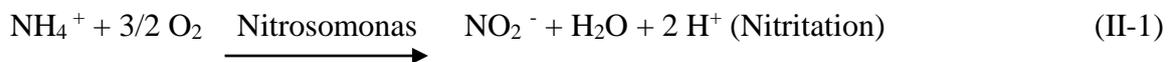
L'élimination des matières organiques implique le recours à des traitements biologiques qui font intervenir des organismes vivants, essentiellement des bactéries. Ces traitements sont basés sur la capacité des micro-organismes à oxyder la matière minérale (NH_3 , ...) et les matières constitutives de la DCO et de la DBO_5 d'une part (aérobie), et à réduire d'autre part les molécules comportant de l'oxygène : NO_3^- (anoxie), SO_4^{2-} et CO_2 (anaérobie). Ils vont permettre ainsi d'éliminer la pollution soluble biodégradable et une partie de MES (**Figure II-6**) [48].



Figure II-6: Bassin d'aération

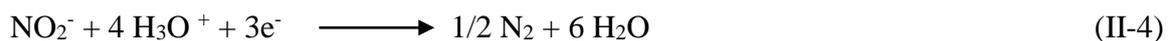
II-4-3-1- L'élimination de l'ammoniaque : la nitrification

La nitrification consiste en l'oxydation biologique de l'azote ammoniacal en nitrates. C'est l'oxydation de l'azote ammoniacal (NH_4^+) en azote nitreux (NO_2^-) par des bactéries autotrophes du genre *Nitrosomonas* et *Nitrobacter* [49]. La transformation chimique de l'azote ammoniacal s'écrit par l'équation [50] :



II-4-3-2- L'élimination des nitrates : La dénitrification

Dans le cas de l'élimination biologique des nitrates, la dénitrification, la réaction nécessite l'oxydation concomitante d'une molécule organique ou minérale qui fournira l'énergie nécessaire à la réduction des nitrates en azote N_2 [48] [50].



II-4-4- Traitement tertiaire

Ils ont pour but de compléter plus au moins l'épuration, selon les normes de qualité applicables aux eaux épurées ou selon les utilisations de ces eaux ; absents ou peu nombreux

dans le cas des rejets en rivière, ils deviennent en revanche multiples s'il s'agit d'affiner l'eau en vue d'une réutilisation [51].

- **Le bassin de désinfection:** Il existe de nombreuses techniques de désinfection des eaux (**Figure II-7**). Les techniques disponibles actuellement dans le monde sont les suivantes [51]:
 - Désinfection à l'ozone;
 - Désinfection par rayonnement UV;
 - Désinfection utilisant le chlore.



Figure II-7 : Bassin de désinfection

II-4-5- Traitement des boues

II-4-5-1- Origine des boues

- **Les boues physico-chimiques:** Les boues physico-chimiques renferment la quasi-totalité de la pollution particulière et colloïdale enlevée à l'eau (dans les décanteurs placés en aval), ainsi que les quantités de réactifs ajoutés qui se retrouvent dans les boues sous forme de précipités minéraux (carbonate, phosphate, etc.) [52].
- **Les boues biologiques:** Les boues biologiques résultent de l'activité vitale des micro-organismes. Les boues ont une structure floculée et sont séparées dans les décanteurs secondaires. Dans les filtres biologiques (lits bactériens), il s'agit de boues de lits bactériens prélevées dans des décanteurs secondaires dans les bassins de boues activées [53].

II-4-5-2- Procédés de traitement des boues

II-4-5-2-1- L'épaississement des boues

C'est la première étape du traitement des boues qui consiste à réduire le volume et concentrer la matière en suspension en éliminant une partie de l'eau. Cet épaississement peut se faire par des techniques simples comme la décantation, la flottation, la centrifugation, l'égouttage (drainage). Ce procédé permet d'obtenir des boues qui ont jusqu'à 5% de matières sèches (**Figure II-8**) [54].



Figure II-8 : Epaisseur des boues

II-4-5-2-2- Déshydratation

Cette étape permet de réduire le volume des boues en éliminant le maximum d'eau. Il existe trois grands types de déshydratation : la déshydratation par filtration (sous pression, sur bandes), la déshydratation par évaporation (lits de séchage) et la déshydratation par centrifugation. Dans la pratique, à l'exception de certaines petites installations, la déshydratation est principalement réalisée par filtration ou centrifugation. L'eau retirée est renvoyée en tête de station, afin d'être traitée. A ce stade, la siccité obtenue est de l'ordre de 15 à 40%, selon les boues et les installations utilisées [55].

II-4-5-3- Les lits de séchage

La boue épaissie est prise par pompage et évacuée vers les lits de séchages. Le séchage des boues s'effectue à l'air libre dans des surfaces d'étendues de 30 m de longueur et 15 m de largeur. Dans la STEP, il existe 14 lits de séchage conçus d'un béton équipé d'une conduite de drainage perforée, pour permettre l'évacuation de l'eau filtrée vers l'entrée de la

station. Chaque lit de séchage est composé de diverses couches de matériaux "sable et gravies" avec granulométrie de plus fine vers la surface du lit (**Figure II-9**) [49].



Figure II-9: Lit de séchage

CHAPITRE III
ELECTROCOAGULATION

III-1- Introduction

L'électrocoagulation est une technique dérivée de la coagulation chimique standard. Dans l'électrocoagulation, aucun ajout de produit chimique n'est effectué puisque les ions métalliques actifs proviennent directement de la dissolution des anodes. Cette situation permet donc de diminuer le coût d'utilisation de produits chimiques et diminue par le fait même la production finale des boues dont il faut disposer. De plus, les hydroxydes métalliques qui sont formés lors de l'électrocoagulation ont une très grande habilité pour l'adsorption des polluants [56].

III-2- Principe d'électrocoagulation

Le procédé d'électrocoagulation est basé sur le principe des anodes solubles. Il s'agit d'imposer un courant (ou potentiel) entre deux électrodes (fer ou aluminium) immergées dans un électrolyte contenu dans un réacteur pour générer, in situ, des ions (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+}) susceptibles de produire un coagulant en solution et de provoquer une coagulation-floculation des polluants qu'on souhaite éliminer.

La **Figure (III-1)** présente le principe du procédé d'électrocoagulation avec les électrodes d'aluminium. Les anodes et les cathodes utilisées peuvent avoir différentes configurations. Elles peuvent se présenter sous forme de plaques, de fil, de tige ou 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. L'EC consomme l'énergie électrique essentiellement pour dissoudre l'anode sacrificielle [57].

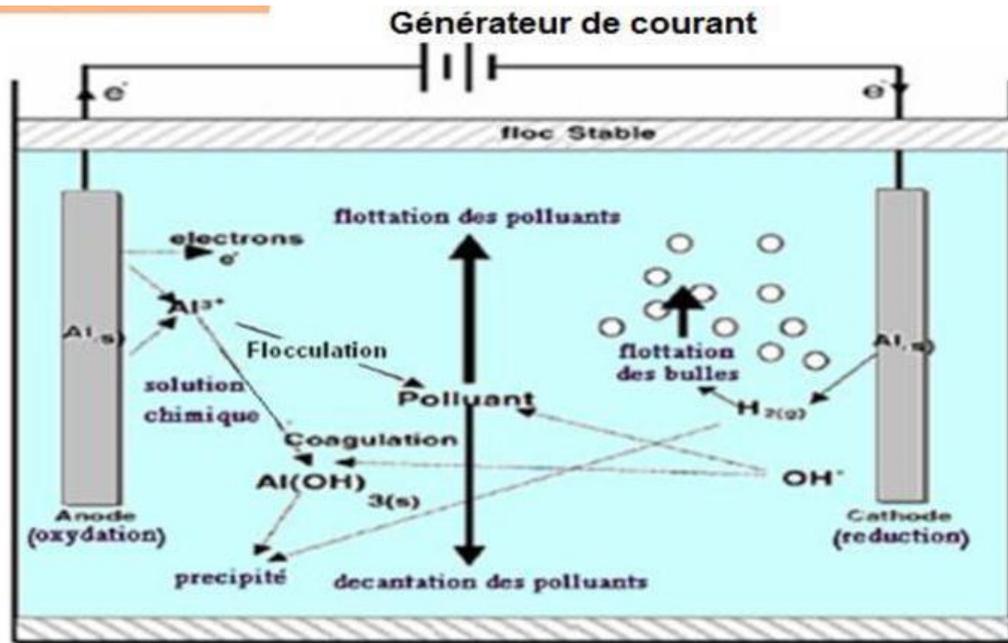
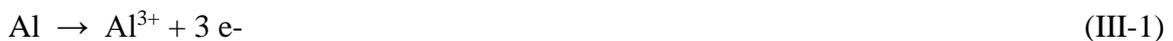


Figure III-1 : Schéma du principe de l'électrocoagulation [58]

Les principales réactions qui se déroulent avec les électrodes (cas des électrodes en aluminium) sont [58]:

➤ A l'anode :

L'oxydation du métal :



La formation de l'hydrogène et l'alumine :



➤ A la cathode :

La réduction de l'eau avec formation de l'hydrogène et les ions hydroxydes [58] :



Les cations métalliques forment des complexes avec les ions hydroxydes. L'espèce majoritaire dépend du pH. Dans le cas de l'aluminium, on trouve une multitude de complexes anioniques et cationiques [59]. Ainsi, on peut distinguer (**Figure III-2**) :

Les monocomplexes tels que $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$.

Les polycomplexes tels que $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$, $\text{Al}_2(\text{OH})_5^+$, $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$.

Les espèces amorphes et très peu solubles telles que $\text{Al}(\text{OH})_3$, Al_2O_3 [59].

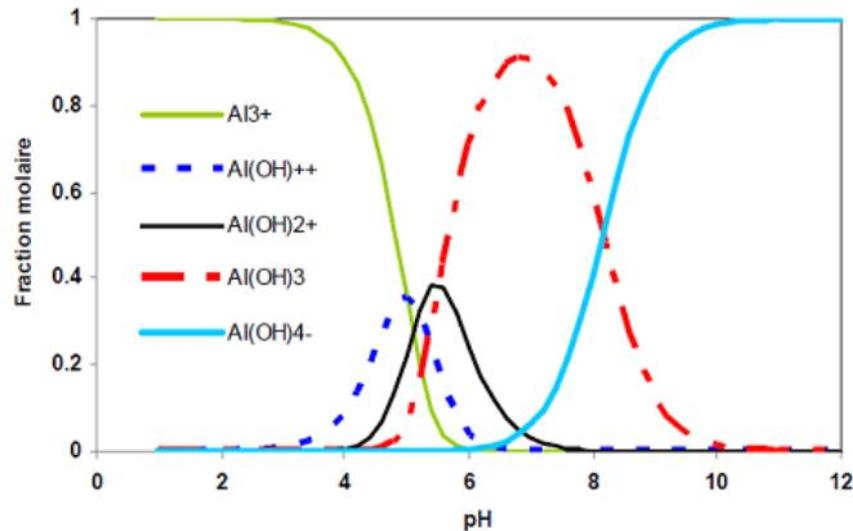


Figure III-2 : Diagramme de prédominance des différents hydroxydes d'aluminium en fonction du pH [8]

III-3- Diagramme de Pourbaix

Pourbaix (1963) a établi les diagrammes potentiel-pH de nombreux métaux en déterminant leur réactivité en fonction du pH et du potentiel E pour les réactions électrochimiques à l'équilibre thermodynamique. Le diagramme potentiel-pH représente les relations entre deux espèces en solution, une espèce en solution et une espèce dissoute ou bien deux espèces solides. Pour l'aluminium, les espèces solides Al, Al₂O₃ hydraté, Al₂O₃ anhydre et Al(OH)₃ ; les espèces ioniques Al³⁺ et AlO₂⁻ ainsi que les réactions d'oxydation d'aluminium pour établir le diagramme d'équilibre potentiel-pH.

Ce diagramme est valable en absence des espèces formant avec l'aluminium des complexes solubles ou des sels insolubles. Le domaine de stabilité de l'aluminium est situé en dessous de celui de l'eau [7].

Zone A, le pH varie de 0 à 14 : zone de stabilité thermodynamique du métal Al, donc immunité thermodynamique.

Zone B, le pH varie de 0 à 3 : l'élément aluminium est sous forme d'ions Al³⁺ aqueux en solution donc corrosion.

Zone C, le pH varie de 3 à 12 : l'élément aluminium est sous forme d'oxyde Al₂O₃(s) protecteur du métal, donc passivation.

Zone D, le pH varie de 12 à 14 : l'élément aluminium est sous forme d'ions AlO_2^- aqueux en solution donc corrosion (**Figure III-3**) [60].

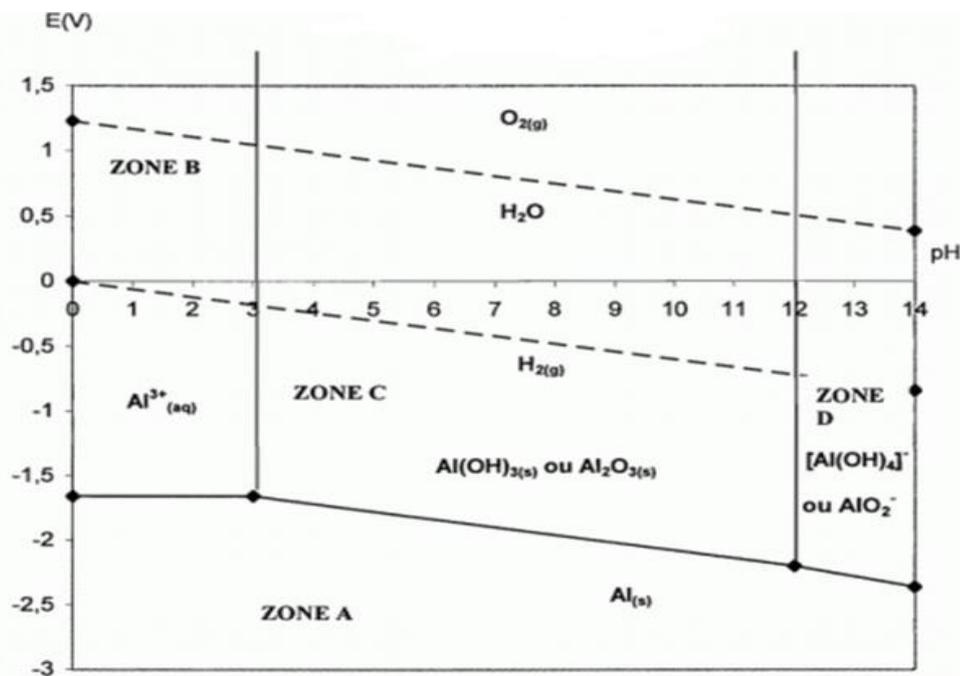


Figure III-3 : Diagramme potentiel-pH de l'aluminium (1 mol/l) et de l'eau $E_v = f(\text{pH})$ à 25°C [60]

III-4- Avantages et inconvénients du procédé d'électrocoagulation

III-4-1- Avantages

- Le procédé d'électrocoagulation ne nécessite pas l'ajout de produits chimiques. Il nécessite l'ajout de petite quantité d'additif pour améliorer la conductivité électrique de l'effluent [61];
- Le procédé de l'EC a l'avantage d'éliminer les plus petites particules colloïdales [62];
- Les boues obtenues par l'EC sont plus denses et moins hydrophiles tendent à être aisément stables et faciles à sécher, parce qu'elles se composent principalement d'oxydes/d'hydroxydes métalliques. Cela rend la décantation et la flottation plus facile et diminue le volume des boues [63];
- L'utilisation de l'électrocoagulation permet de réduire le temps de traitement. Aussi, ce procédé donne la possibilité d'automatisation [64];

- L'agitation violente qu'il faut provoquer dans la floculation chimique pour que les colloïdes accèdent à la surface de l'hydroxyde (1cm^3 d'hydroxyde de fer développe 6000 m^2 de surface), endommage l'accroissement sensible du volume des boues et disperse le floc [64].

III-4-2- 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. En effet, la conductivité du rejet doit être suffisante pour permettre le passage du courant sans consommation excessive d'électricité. Lorsque la conductivité de l'eau polluée est trop faible, un rajout du chlorure de sodium est généralement nécessaire. La présence de certains ions tels que les chlorures, permet d'éviter le phénomène de passivation des électrodes d'aluminium [8];
- Une pellicule d'oxyde imperméable peut être formée sur la cathode menant à la diminution d'efficacité de l'unité de l'EC [65];
- La maintenance des installations est parfois coûteuse. Le nettoyage et le changement des électrodes nécessitent l'arrêt du procédé au cours de ces opérations [65];
- Les électrodes sacrificatoires sont dissoutes dans l'effluent à traiter en raison de l'oxydation, et doivent être régulièrement remplacées [65];
- L'EC est sans effet sur certains types de pollutions tels que ceux dues à des fluides complètement miscibles à l'eau [66].

III-5- Elimination de la pollution par électrocoagulation

III-5-1- Les colloïdes

III-5-1-1- Introduction

Les colloïdes, ou solutions colloïdales, sont des mélanges (liquide, gel) qui contiennent, en suspension, des particules. Ces particules ont une taille supérieure aux molécules qui les constituent (taille supramoléculaire) mais suffisamment petite pour que le mélange demeure homogène. Les colloïdes présentent un diamètre compris entre 10^9 m et 10^5 nm [67].

L'origine des colloïdes est très diverse. On peut citer l'érosion des sols, la dissolution des substances minérales, la décomposition des matières organiques, le déversement des eaux résiduaires urbaines et industrielles ainsi que les déchets agricoles [68].

II-5-1-2- Types des colloïdes

On distingue deux types de colloïdes

III-5-1-2-1- Les colloïdes hydrophiles

Les colloïdes hydrophiles sont des micromolécules complexes à nombre élevé d'atomes, et qui englobent la plupart des corps de la chimie organique [5]. Ils proviennent de substances solubles présentant une affinité pour l'eau, et qui adsorbent une couche d'eau liée, protectrice. Dans ce groupe se trouvent les protéines, les carbohydrates et, d'une façon générale, les produits organiques [69].

III-5-1-2-2- Les colloïdes hydrophobes

Les colloïdes hydrophobes sont des micelles ou agrégats de molécules simples, dissoutes et qui comprennent la plupart des corps de la chimie minérale [5]. Qui n'ont aucune affinité pour l'eau et dont la stabilité est due à la charge électrique développée par des particules qui engendrent une répulsion mutuelle empêchant toute agglomération [70].

III-5-1-3- Structure et stabilité des colloïdes

Dans une eau de surface, les colloïdes portent des charges négatives situées à leur surface. Ces charges négatives attirent les ions positifs en solution dans l'eau. Ceux-ci sont étroitement collés au colloïde et forment la couche liée ou de STERN, qui attire à son tour des anions accompagnés d'une faible quantité des cations : c'est la couche diffuse ou de GOUY. Il y a donc formation d'une double couche ionique, l'un accompagnant la particule lors de ces déplacements, l'autre se déplaçant indépendamment ou avec un certain retard [71].

Il se crée entre ces deux couches un potentiel électrostatique ou de Nernst qui est fonction de la température. Ce potentiel s'exprime en fonction de la quantité de charges positives et négatives présentes au niveau de la double couche. La **Figure (III-4)** représente la distribution ionique autour d'un colloïde [72].

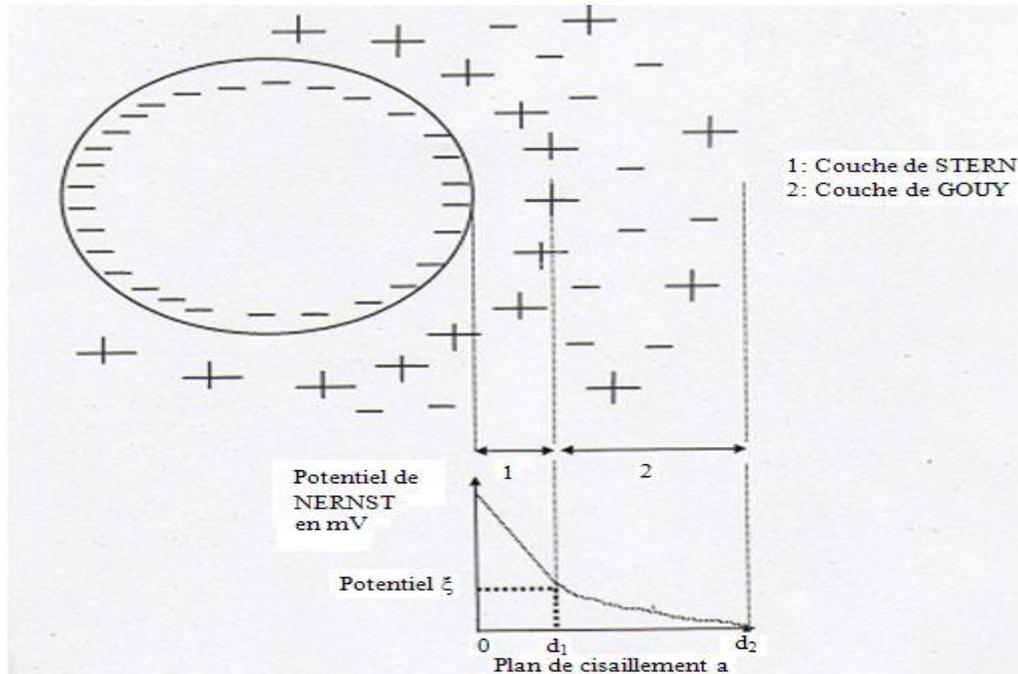


Figure III-4 : Distribution ionique autour d'un colloïde [71].

La stabilité colloïdale à long terme d'une dispersion sera d'une grande importance dans un grand nombre d'industries. Le terme "stabilité" peut avoir différentes connotations selon les applications. Quand il est appliqué aux colloïdes, un système colloïdale stable se définit par des particules résistantes à la floculation ou à l'agrégation et montre des signes de longue durée de vie [73].

La stabilité dépend des interactions qui ont lieu entre les particules et entre les particules et le solvant. La stabilité d'un système colloïdal est donc déterminée par les interactions entre toutes les particules présentes dans la dispersion [74].

III-5-2- Etapes d'élimination de la pollution par électrocoagulation

III-5-2-1- Formation du coagulant

La coagulation s'agit du procédé dont un réactif appelé coagulant est introduit dans la solution avec le but de déstabiliser la suspension colloïdale en pénétrant la double couche afin de s'adsorber dans la couche de Stern [75]. Les coagulants sont des produits qui neutralisent les charges de surfaces des matières colloïdales. Les coagulants principalement utilisés pour déstabiliser les particules colloïdales. Les coagulants principalement utilisés pour déstabiliser les particules colloïdales sont à base de d'aluminium ou de fer hydrolysable au pH voisin de la neutralité [76].

L'efficacité de la purification dépend d'abord du coagulant utilisé, les coagulants les plus efficaces sont des sels de métaux, à base d'aluminium ou de fer [5].

III-5-2-2- Flocculation, flottation et décantation

III-5-2-2-1- Flocculation

Après avoir été déstabilisées par le coagulant, les particules colloïdales s'agglomèrent lorsqu'elles entrent en contact. C'est la flocculation. Le floc ainsi formé, peut décanter, flotter ou être filtrer (coagulation sur filtre), suivant le procédé de rétention choisi [77].

C'est aussi l'agrégation des particules déchargées par transport et mise en contact les unes aux autres. Elle conduit à la formation des flocons ou flocs, capables d'être retenus dans une phase ultérieure du traitement de l'eau [78].

III-5-2-2-2- Flottation et décantation

Ces procédés sont des méthodes de séparation des matières en suspension et des colloïdes rassemblés en floc, après l'étape de coagulation-flocculation. Si la densité de ces flocs est supérieure à celle de l'eau, il y a décantation. L'eau clarifiée située près de la surface est dirigée vers des filtres à sable. Dans le cas de particules de densité inférieure à celle de l'eau, le procédé de flottation doit être appliqué [69].

La flottation est un procédé de séparation solide-liquide qui s'applique à de petites particules de faible masse volumique. Dans la technique de flottation, on agit indirectement sur la différence de densité entre les phases. On génère au sein du liquide des bulles d'air, qui au cours de leur ascension à travers la phase aqueuse, interagissent avec les particules en suspension. L'effet de séparation est obtenu par association d'une particule solide et d'une ou plusieurs bulles d'air qui forment un complexe bulle-particule ayant comme conséquence de diminuer la densité apparente de la particule solide et par conséquent de la faire flotter [59].

La décantation est une technique de séparation des matières en suspension et des colloïdes rassemblés en floc, après l'étape de coagulation-flocculation. C'est un procédé utilisé pratiquement dans toutes les stations de traitement des eaux [5].

III-6- Facteurs influençant le procédé d'électrocoagulation

Les paramètres susceptibles d'influencer le plus sur l'électrocoagulation sont les suivants :

- La surface des électrodes ; dans cette étude elle sera fixe pour toutes les expériences;
- La nature des électrodes (électrode en aluminium);
- Le volume réactionnel constant (100 ml);
- Le temps d'électrocoagulation variant de 0 à 60 min;
- Le pH variant au cours de l'électrocoagulation;
- Le potentiel (voltage) ou courant appliqué variant de 2,5 à 32 V;
- La distance entre les électrodes est fixée à 3cm.

CHAPITRE IV
MATERIELS ET MODE
OPERATOIRE

I- Eaux usées traitées par boue activée

Dans toute station d'épuration des eaux usées il est nécessaire d'effectuer des analyses de l'eau brute (à l'entrée) et de l'eau traitée (à la sortie) afin de déterminer les différents paramètres physico-chimiques et bactériologiques permettant d'évaluer le niveau de pollution dans chaque phase de traitement pour donner une bonne appréciation des performances épuratoires de la STEP.

III-I-1- Prélèvement et échantillonnage

Pour les prélèvements destinés à l'analyse physico-chimiques, le premier prélèvement est prélevé à l'entrée de la station constituant ainsi l'eau brute (**Figure IV-1**) l'autre du bassin de désinfection constituant l'eau traitée (**Figure IV-2**).



Figure IV-1 : Prélèvement à l'entrée



Figure IV-2 : Prélèvement à la sortie

III-I-2- Analyses physico-chimiques

III-I-2-1- Température

a- Appareillage

- La température est mesurée en même temps avec le pH par le biais d'un pH-mètre.

III-I-2-2- Potentiel d'hydrogène pH

a- Appareillage

- pH-mètre à électrode;
- Récipient contenant l'eau à analyser (**Figure IV-3**).

b- Mode opératoire

- Rincer l'électrode avec de l'eau distillée;
- Immerger l'électrode dans l'échantillon;
- Faire la lecture après la stabilisation de pH au pH-mètre.

III-I-2-3- Conductivité**a- Appareillage**

- Conductimètre à électrodes;
- Récipient contenant l'eau à analyser (**Figure IV-3**).

b- Mode opératoire

- Rincer d'abord l'électrode avec de l'eau distillée;
- Immerger l'électrode dans l'eau;
- Agiter la sonde légèrement;
- Lire le résultat.



Figure IV-3 : pH-mètre et conductimètre

III-I-2-4- Oxygène dissous O₂**a- Appareillage**

- Oxymètre;
- Récipient contenant l'eau à analyser;
- Eau distillée.

b- Mode opératoire

- Rincer d'abord l'électrode avec de l'eau distillée;
- Immerger l'électrode dans l'eau;
- Lire la valeur de l'oxygène dissous à l'aide de l'oxymètre (**Figure IV-4**).



Figure IV-4 : Oxymètre utilisé pour la mesure de l'oxygène dissous

III-I-3- Les paramètres chimiques

III-3-1- Les matières en suspension MES

a- Matériels

- Eau brute;
- Eau épurée;
- 2 filtres;
- Pompe à vide et entonnoir de filtration (**Figure IV-5**);
- Balance analytique (**Figure IV-6**);
- Etuve réglée à 105°C (**Figure IV-7**);

b- Mode opératoire

- Mesurer le poids des 2 filtres en utilisant la balance analytique [filtre 1(M_0) ; filtre 2 (M_0')];
- Filtrer (**Figure IV-8**):
 - 10 ml d'eau brute.
 - 25 ml d'eau épurée.
- Mettre les 2 papiers filtres sur un support de séchage (assiette plate);
- Sécher les filtres à 105°C pendant deux heures et les peser à nouveau;
- Mesurer le poids des 2 filtres après deux heures de séchage (M_1) et (M_1').



Figure IV-5 : Pompe à vide



Figure IV-6 : Balance analytique



Figure IV-7 : Etuve



Figure IV-8 : Photo représentant la manipulation de la MES

c- Résultat

La valeur de la MES est calculée en utilisant la formule suivante :

$$\text{MES} = M_1 - M_0 / 1000 \text{ (mg/l)}.$$

III-I-3- 2- Demande chimique en oxygène DCO

Elle s'exprime en milligramme par litre (mg/l) d'oxygène et correspond effectivement à la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder dans des conditions opératoires définies, les matières organiques présentes dans un échantillon donné.

a- Matériels :

- Eau brute;
- Eau épurée;
- Réacteur DCO (**Figure IV-9**);
- Spectrophotomètre (**Figure IV-10**);
- Kits (tubes contenant les réactifs).

b- Mode opératoire

- Mélanger les kits;
- Verser 2 ml d'eau dans les kits et bien mélanger (**Figure IV-11**);
- Mettre les kits dans le réacteur DCO pour le chauffage à une température de l'ordre de 148°C pendant deux heures ;
- Après deux heures on laisse les kits se refroidissent, ensuite on mesure la DCO avec le spectrophotomètre.



Figure IV-9 : Réacteur utilisée pour la mesure de la DCO

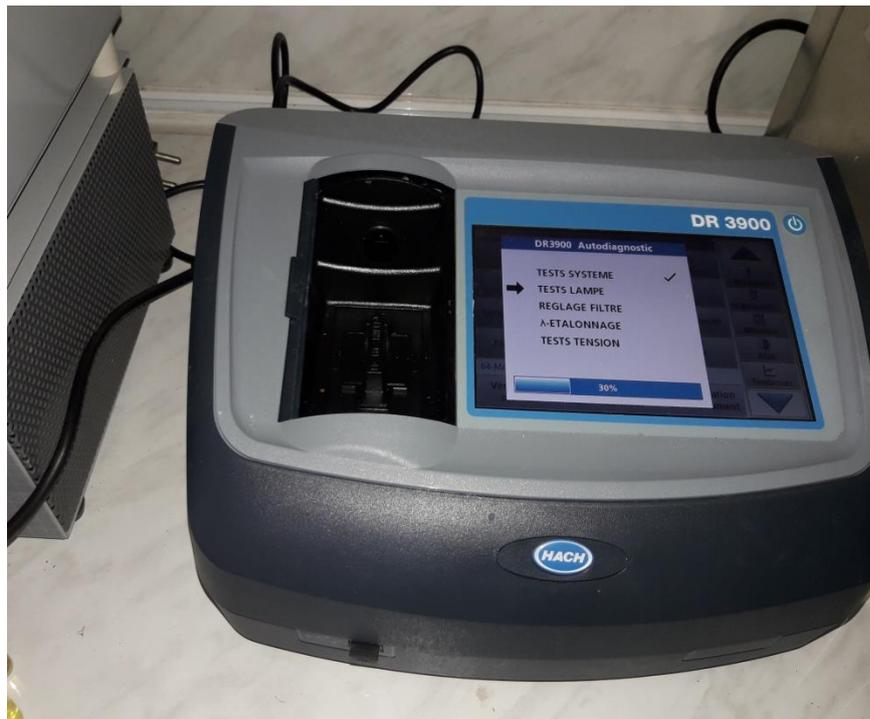


Figure IV-10 : Spectrophotomètre utilisé au niveau de la STEP



Figure IV-11 : Photo représentant l'analyse de la DCO

III-I-3-3- Demande biochimique en oxygène DBO₅**a- Matériels**

- 2 flacons;
- Agitateur magnétique;
- Thermostat à 20°C;
- Oxymètre;
- Eau ultra-pure pour la dilution;
- Aérateur.

b- Mode opératoire**• Préparation de l'eau de dilution**

Mettre la vielle de prélèvement, dans un récipient de l'eau du robinet dans laquelle on plonge pendant 24h un aérateur pour la saturation en O₂ et laisser reposer 12h.

• Préparation des flacons de mesure

- Verser dans le flacon un peu d'eau de dilution puis la quantité prévue d'échantillon puis remplir le reste du flacon avec de l'eau de dilution;
- Fermer le flacon sans y laisser d'air pénétrer;
- Faire ainsi 2 flacons identiques;
- Placer les deux flacons au thermostat à 20°C et à l'obscurité pendant 5 jours (**Figure IV-12**).



Figure IV-12 : Photo montrant les échantillons dans le thermostat à 20°C pendant 5 jours.

III-I-3-4- Ammonium NH_4^+ **a- Matériels**

- Kits (tubes contenant les réactifs) ;
- Eau brute;
- Eau épurée;
- Spectrophotomètre.

b- Mode opératoire

- Ajouter 0,2 ml de l'eau brute dans le kit;
- Agiter le kit pendant 3 secondes;
- Laisser le kit pendant 15 min, puis mesurer la concentration d'échantillon avec le spectrophotomètre;
- On ajoute 5ml de l'eau épurée dans le kit et refaire les mêmes étapes de l'eau brute (**Figure IV-13**).



Figure IV-13 : Photo représentant la manipulation pour la détermination de NH_4^+

III-I-3-5- Orthophosphate OPO_4^- **a- Matériels**

- Kits (tubes contenant les réactifs);
- Spectrophotomètre;
- Réactif B.

b- Mode opératoire

- Ajouter 0,4 ml de l'eau brute dans le kit + 0,5 ml de réactif B;
- Agiter le kit après on change le bouchon de kit et laisser 10 min;
- Lire la concentration dans le spectrophotomètre;
- Pour l'eau épurée on obtient 0,5 ml d'eau + 0,2 de réactif B et refaire les mêmes étapes de l'eau brute (**Figure IV-14**).



Figure IV-14 : Photo montrant la manipulation pour la détermination d' OPO_4^-

II- Eaux usées traitées par électrocoagulation

IV-II-1- Matériels

- Eau brute fournie par la STEP-Guelma;
- Générateur de courant électrique;
- Agitateur magnétique;
- Conductimètre;
- pH-mètre;
- Béchers;
- Electrodes d'aluminium.

IV-II-2- Mode opératoire

Tous les essais d'électrocoagulation ont été réalisés en suivant le même protocole.

Avant chaque essai, on utilise un récipient contenant 120 ml de l'eau brute et des électrodes qui sont lavées avec une solution diluée d'acide chlorhydrique HCl.

Les électrodes sont immergées dans la cellule d'électrocoagulation fraîchement remplie d'eau brute développant ainsi une surface immergée de 80 mm², ses électrodes sont reliées au bloc d'alimentation (générateur de courant électrique) stabilisé en courant continu qui peut être réglé à l'ampérage désiré.

L'ensemble est soumis sous agitation modérée de 300 tr/min sur une plaque d'agitation magnétique pour homogénéisation.

Pour réaliser l'étude expérimentale on a étudié les effets de l'intensité du courant électrique entre 0.01A à 0.2A ainsi que le temps d'électrocoagulation (temps maximum 40 min) sur les différents paramètres physicochimiques (pH, T, conductivité) pour une première manipulation, et pour une deuxième on a stabilisé le courant électrique à 0.15 A et on a mesuré les paramètres après chaque 10 min (temps maximum 60 min) (**Figure IV-15**).



Figure IV-15 : Dispositif expérimental utilisé pour le traitement des eaux usées par électrocoagulation

IV-II-3- Analyses physico-chimiques

En plus des mesures des paramètres habituels T, pH et conductivité on a réalisé des analyses afin de déterminer les concentrations massiques des nitrites, des phosphates, des sulfates et d'ammoniums selon les protocoles expérimentaux suivants donné pour chaque type.

IV-II-3-1- Détermination des ions ammonium NH_4^+

a- Matériels

- Eau à analyser ;
- Réactifs de formules commerciales NH_4 -1, NH_4 -2 et NH_4 -3 ;
- Tubes à essai.

b- Mode opératoire

- Verser 5 ml d'eau dans les tubes à essai ;
- Ajouter 0.6 ml de réactif NH_4 -1 et mélanger;
- Ajouter 1 microcuillère de réactif NH_4 -2 et agiter vigoureusement jusqu'à dissolution totale du réactif;
- Laisser reposer 5 minutes;

- Ajouter 4 gouttes de réactif NH₄-3 et mélanger;
- Laisser reposer 5 minutes, puis verser l'échantillon (**Figure IV-16**) dans la cuve et introduire dans le photomètre et lire la valeur de la concentration massique d'ammonium.



Figure IV-16 : Echantillons des différentes eaux (brute, traitée par boue activée et par électrocoagulation) après ajout de NH₄-1, NH₄-2 et NH₄-3

IV-II-3-2- Détermination des nitrites NO₂⁻

a- Matériels

- Eau à analyser ;
- Réactif de formule commerciale NO₂-1;
- Photomètre (**Figure IV-17**);
- Tubes à essai.

b- Mode opératoire

- Verser 5 ml d'eau à analyser dans les tubes à essai;
- Ajouter 1 microcuillère de réactif NO₂-1 et agiter vigoureusement jusqu'à dissolution totale du réactif;
- Laisser reposer 10 minutes, puis introduire l'échantillon (**Figure IV-18**) dans la cuve et introduire la cuve dans le photomètre et lire la concentration massique des nitrites.



Figure IV-17 : Photomètre utilisé au niveau du laboratoire d'hydraulique

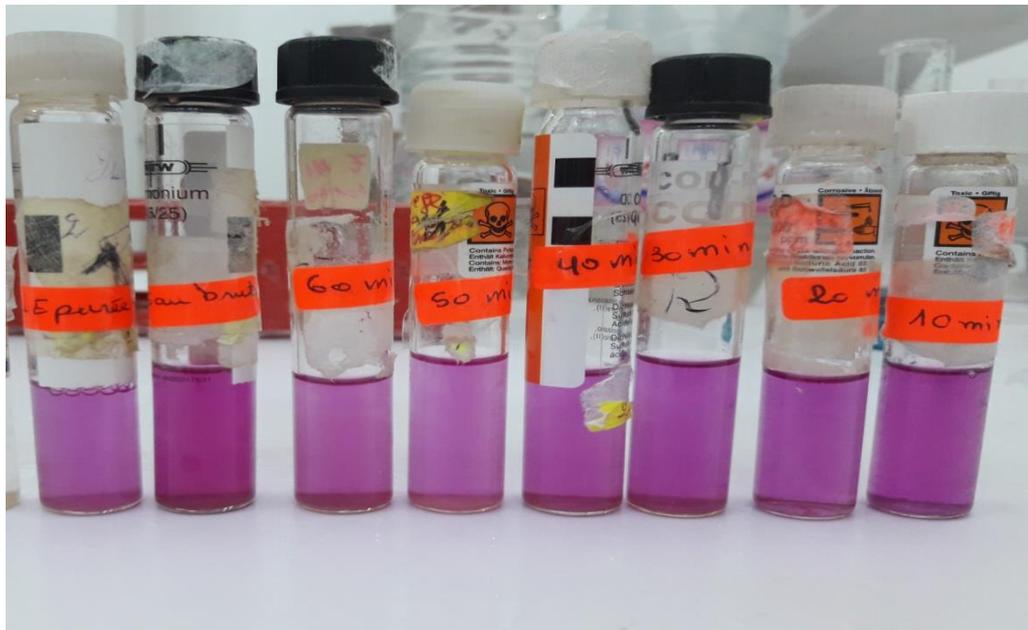


Figure IV-18 : Echantillons des différentes eaux (brute, traitée par boue activée et par électrocoagulation) après ajout du réactif $\text{NO}_2\text{-1}$

IV-II-3-3- Détermination des sulfates SO_4^{2-}

a- Matériels

- Eau à analyser;
- Réactifs de formules commerciales $\text{SO}_4\text{-1}$, $\text{SO}_4\text{-2}$, $\text{SO}_4\text{-3}$ et $\text{SO}_4\text{-4}$;
- Papiers filtre;
- Entonnoirs;

- Erlenmeyers;
- Béchers;
- Tubes à essai.

b- Mode opératoire :

- Verser 2,5 ml d'eau dans les tubes à essai avec bouchon fileté;
- Ajouter 2 gouttes de réactif SO₄-1 et mélanger;
- Ajouter 1 microcuillère de réactif SO₄-2, boucher le tube et mélanger;
- Chauffer les tubes 5 minutes à 40°C au bain-marie (**Figure IV-19**) en agitant de temps en temps, et après cela on ajoute 2.5 ml du réactif SO₄-3;
- Filtrer le contenu des tubes sur des filtres rond (**Figure IV-20**);
- Ajouter au filtrat 4 gouttes de réactif SO₄-4, boucher les tubes et mélanger;
- Chauffer les tubes 7 minutes à 40°C au bain-marie en agitant de temps en temps;
- Introduire l'échantillon (**Figure IV-21**) dans la cuve et introduire dans le photomètre et lire la valeur de la concentration massique des sulfates.



Figure IV-19 : Bain-marie utilisé pour le chauffage



Figure IV-20 : Filtration des solutions



Figure IV-21 : Echantillons des différentes eaux (brute, traitée par boue activée et par électrocoagulation) après ajout de SO_4-1 , SO_4-2 , SO_4-3 et SO_4-4

IV-II-3-4- Détermination des phosphates PO_4^{3-}

a- Matériels

- Eau à analyser;
- Photomètre;
- Tubes à essai;
- Réactifs de formule commerciale PO_4-1 et PO_4-2 .

b- Mode opératoire :

- Verser 5 ml d'eau dans les tubes à essai;
- Ajouter 5 gouttes de réactif PO₄-1 et mélanger;
- Ajouter 1 microcuillère de réactif PO₄-2 et agiter rigoureusement jusqu'à dissolution totale du réactif;
- Laisser reposer 5 minutes (temps de réaction), puis introduire l'échantillon (**Figure IV-22**) dans la cuve et réaliser la mesure en utilisant le photomètre.



Figure IV-22 : Echantillons des différentes eaux (brute, traitée par boue activée et par électrocoagulation) après ajout des réactifs PO₄-1 et PO₄-2

CHAPITRE V RESULTATS ET DISCUSSION

V-1- Résultats des analyses physico-chimiques de l'eau traitée par la boue activée

Les résultats des analyses physico-chimiques effectués à l'entrée et à la sortie de la STEP des mois de décembre à avril de l'année 2018- 2019 sont donnés dans le tableau suivant:

Tableau V-1 : Résultats des analyses physico-chimiques pour l'année 2018- 2019

	T °C	Cond ms/cm	O ₂ mg/l	DCO mg/l	DBO ₅ mg/l	MES mg/l	NH ₄ ⁺ mg/l	OPO ₄ ⁻ mg/l
Décembre	15.7	1.10	3.3	258.6	147.2	135	20.8	3.16
	14.9	1.08	6.4	22.5	13.8	9	2.4	1.2
Janvier	12.8	1.09	3.46	313	213.6	225	36.2	2.5
	13	1.17	6.2	27.3	13.6	8	1.63	1.8
Février	13.2	1.4	4	297	175.84	187	30	3.01
	12.6	1.29	6.1	24.2	13.75	16	1.7	1.84
Mars	15.47	1.18	4.54	536	125.74	218	53	3.19
	15.07	1.11	6.58	32.5	14.3	20.33	2.19	1.69
Avril	17.5	1.13	4.1	332	186	188	43	3.21
	17.6	1.10	6.7	26	13.8	13	1.8	1.3

V-1-1- Température T (°C)

La température est un facteur écologique très important dans les eaux usées. Aussi les variations de la température des eaux usées traitées par la boue activée (STEP-GUELMA) des mois de décembre à avril de l'année 2018- 2019 sont illustrées sur la **Figure (V-1)**. Les valeurs de la température de l'eau oscillent entre 12.8°C et 17.5 °C à l'entrée de la station.

De même à la sortie de la station, la température ne cesse de croître, on observe que les valeurs sont approximativement égales, avec une augmentation remarquable lors du prélèvement d'avril.

Les valeurs de température sont dans les normes d'OMS (**Tableau 1-Annexe**).

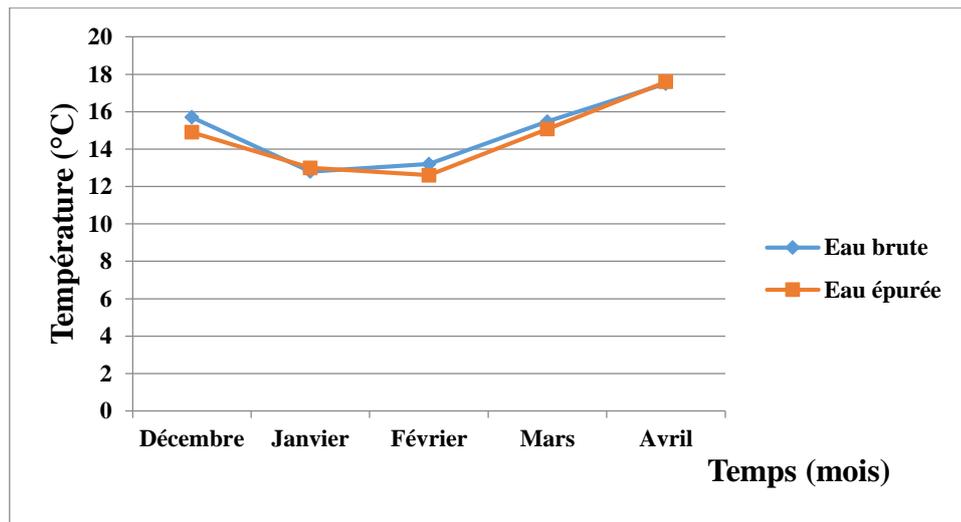


Figure V-1: Evolution de la température ($T^{\circ} C$) en fonction des mois décembre, janvier, février, mars et avril avant et après épuration

V-1-2- La conductivité (ms/cm)

La représentation graphique de l'évolution de la conductivité avant et après épuration en fonction des mois cités dessus (**Figure V-2**) montre que les valeurs de la conductivité électrique des eaux à l'entrée sont de l'ordre de [1.09-1.14] ms/cm et à la sortie de l'ordre [1.1-1.29] ms/cm. Ces valeurs sont bien compatibles avec les normes d'OMS (**Tableau 1-Annexe**).

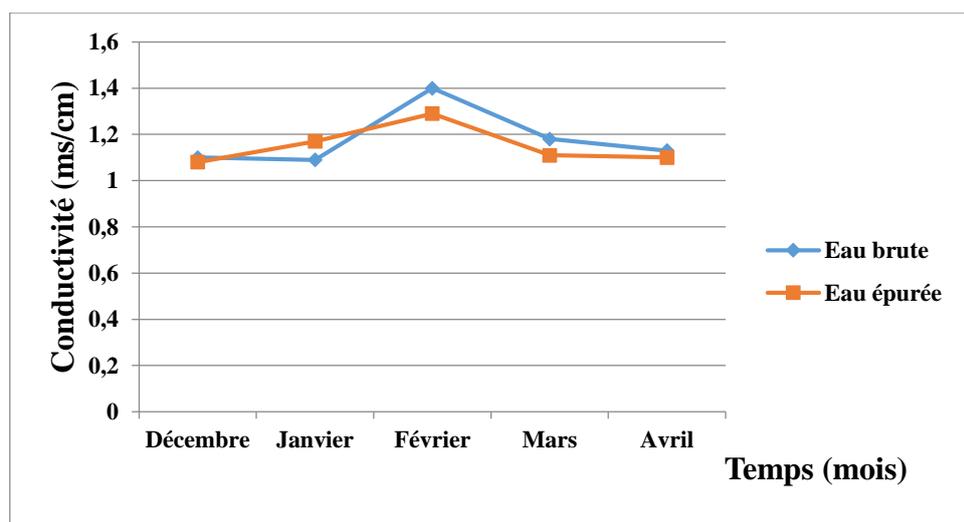


Figure V-2 : Evolution de la conductivité en fonction des mois décembre, janvier, février, mars et avril avant et après épuration

V-1-3- Oxygène dissous O₂ (mg/l)

La teneur de saturation en oxygène dépend fortement de la température. Lorsque la température augmente, la teneur en oxygène diminue en raison de la plus faible solubilité, mais aussi à cause de la consommation accrue par les êtres vivants et les bactéries qui se multiplient [49]. A l'entrée de la STEP, les teneurs en O₂ sont comprises entre 3.3 et 4.54 mg/l et les valeurs relevées à la sortie se situent entre 6.1 et 6.7 mg/l pour les mois concernés par l'étude. La teneur en oxygène dissous (O₂) enregistrée à la sortie de la STEP est nettement supérieure à celle de l'entrée. Cette augmentation est due à l'aération des eaux au niveau du bassin biologique (traitement secondaire) (**Figure V-3**).

La teneur en oxygène dissous à l'entrée est dans les normes des rejets des eaux usées en Algérie alors que la teneur en oxygène dissous à la sortie n'est pas conforme aux normes des rejets des eaux usées en Algérie (**Tableau 2-Annexe**).

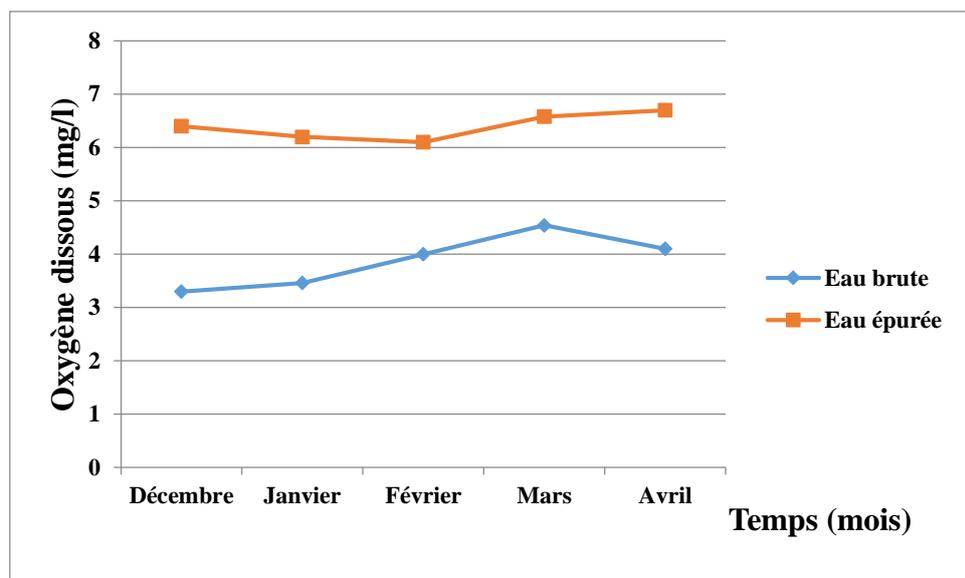


Figure V-3 : Evolution de l'oxygène dissous (O₂) en fonction des mois décembre, janvier, février, mars et avril avant et après épuration

V-1-4- Demande chimique en oxygène DCO (mg/l)

Les résultats concernant l'évolution de la demande chimique en oxygène (DCO) en fonction des mois décembre, janvier, février, mars et avril avant et après épuration sont illustrés sur la **Figure (V-4)**.

Les teneurs en DCO montrent une nette baisse à l'entrée et à la sortie de la STEP. Les valeurs oscillent entre 297 et 536 mg/l à l'entrée de la station. A la sortie l'évolution de ce paramètre marque une diminution importante pendant le prélèvement de décembre d'un ordre

de 22.5 mg/l à cause de l'élimination de matières les plus grossières (minérales, organiques) lors des procédés de prétraitements (dégrillage, dessablage et dégraissage-déshuilage) et de la dégradation de la matière organique par les microorganismes (traitement biologique).

Les valeurs obtenues sont nettement supérieures aux normes fixées par l'OMS (Tableau 1-Annexe).

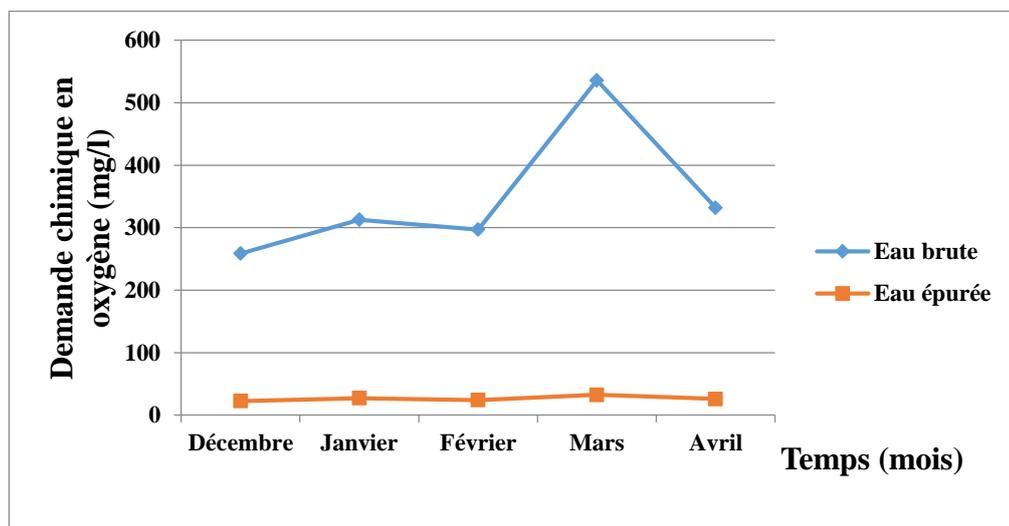


Figure V-4 : Evolution de la demande chimique en oxygène (DCO) en fonction des mois décembre, janvier, février, mars et avril avant et après épuration

V-1-5- Demande biochimique en oxygène DBO₅ (mg/l)

La DBO₅ exprime la quantité d'oxygène nécessaire à la dégradation de la matière organique d'une eau par le développement de microorganisme. Ainsi, les valeurs enregistrées de la DBO₅ pour les mois concernés sont comprises entre 213.6 et 125.74 mg/l à l'entrée et elles varient d'une manière décroissante, elles dépassent largement les normes d'OMS (Tableau 1-Annexe). Après épuration, les teneurs diminuent d'une façon remarquable pour atteindre un maximum de 14.3 mg/l pendant les prélèvements de mars (Figure V-5).

Les teneurs de la DBO₅ à la sortie sont en accord avec les normes des rejets des eaux usées d'OMS (Tableau 1-Annexe).

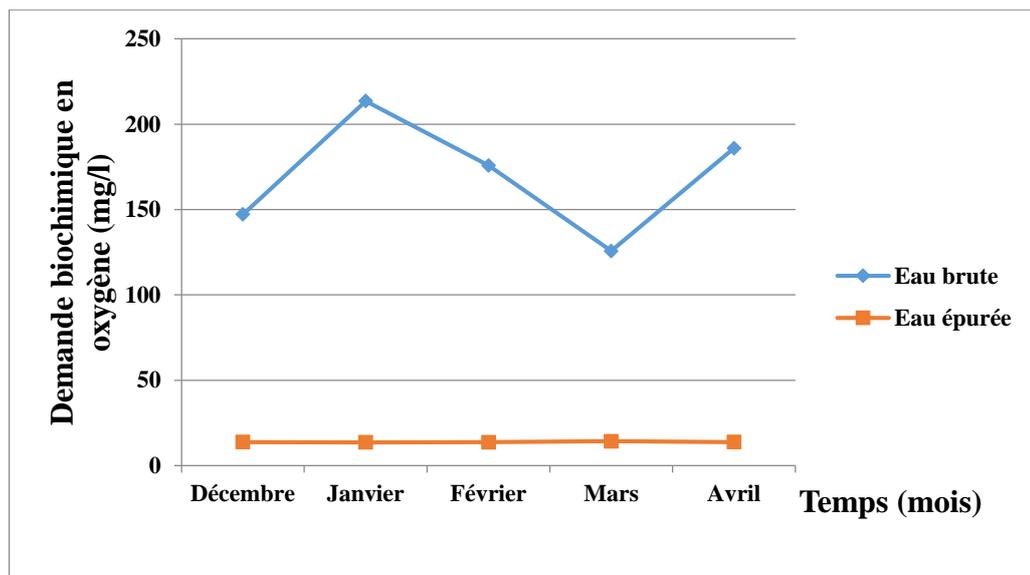


Figure V-5: Evolution de la demande biochimique en oxygène (DBO₅) en fonction des mois décembre, janvier, février, mars et avril avant et après épuration

V-1-6- Matières en suspension MES (mg/l)

Les résultats de l'évolution de la concentration des matières en suspension (MES) en fonction des mois concernés **Figure (V-6)** montrent que : avant épuration, ces concentrations présentent une certaine irrégularité, on note un maximum de 225 mg/l pendant le prélèvement du février. Ces variations sont dues au changement de la charge des effluents d'une part et à l'intensité de la précipitation d'autre part.

A la sortie ces concentrations montrent une baisse remarquable suite à l'élimination des matières en suspension principalement au niveau du bassin d'aération. Les résultats dépassent largement les normes d'OMS (**Tableau 1-Annexe**).

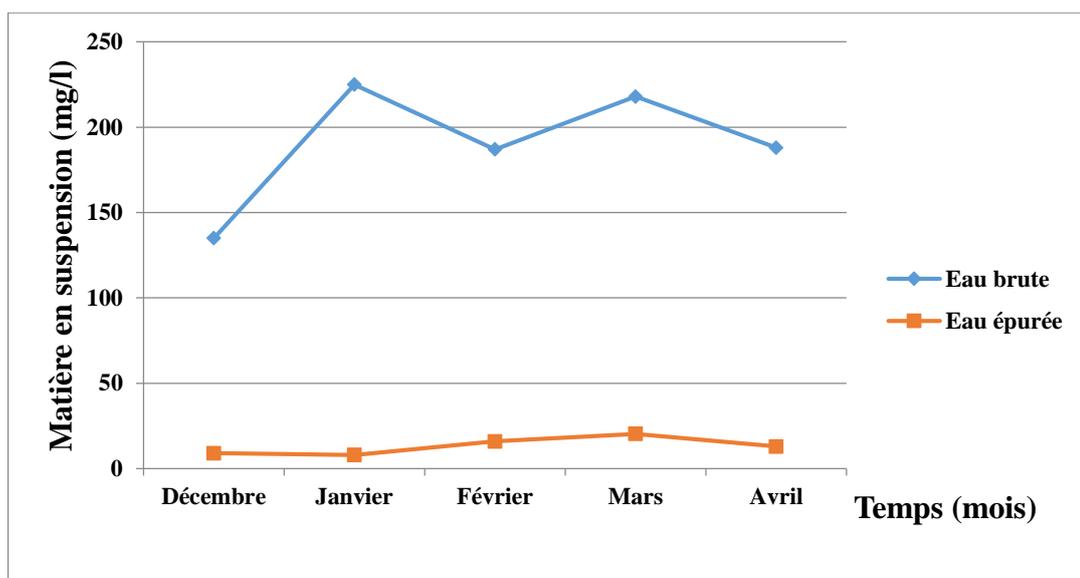


Figure V-6: Evolution des matières en suspension (MES) en fonction des mois décembre, janvier, février, mars et avril avant et après épuration

V-1-7- Ammonium NH_4^+ (mg/l)

Les valeurs de NH_4^+ oscillent entre 20.8 et 53 mg/l à l'entrée de la STEP, on enregistre des teneurs trop élevées durant mars, et après épuration elles passent entre 1.63 et 2.4 mg/l, les teneurs diminuent d'une façon remarquable par rapport à l'entrée (**Figure V-7**).

Donc les résultats obtenus dépassent les normes d'OMS (**Tableau 1-Annexe**).

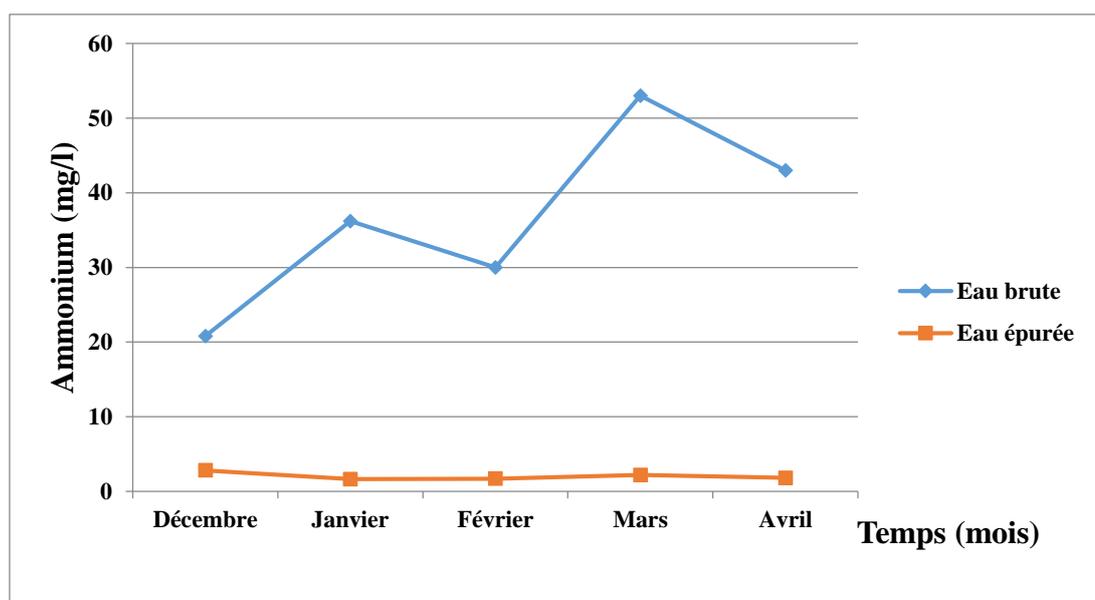


Figure V-7 : Evolution d'ammonium (NH_4^+) en fonction des mois décembre, janvier, février, mars et avril avant et après épuration

V-1-8- Orthophosphates OPO_4^- (mg/l)

La lecture et l'analyse du graphe de la **Figure V-8** permettent de porter le constat suivant : la teneur de l'eau à l'entrée de la STEP en OPO_4^- varie de 2.5 à 3.21 mg/l et de 1.84 à 1.2 mg/l à la sortie. Cette concentration diminue suite au cheminement d' OPO_4^- dans le processus épuratoire.

Les valeurs obtenues sont supérieures aux normes fixées par les normes en Algérie (**Tableau 2-Annexe**).

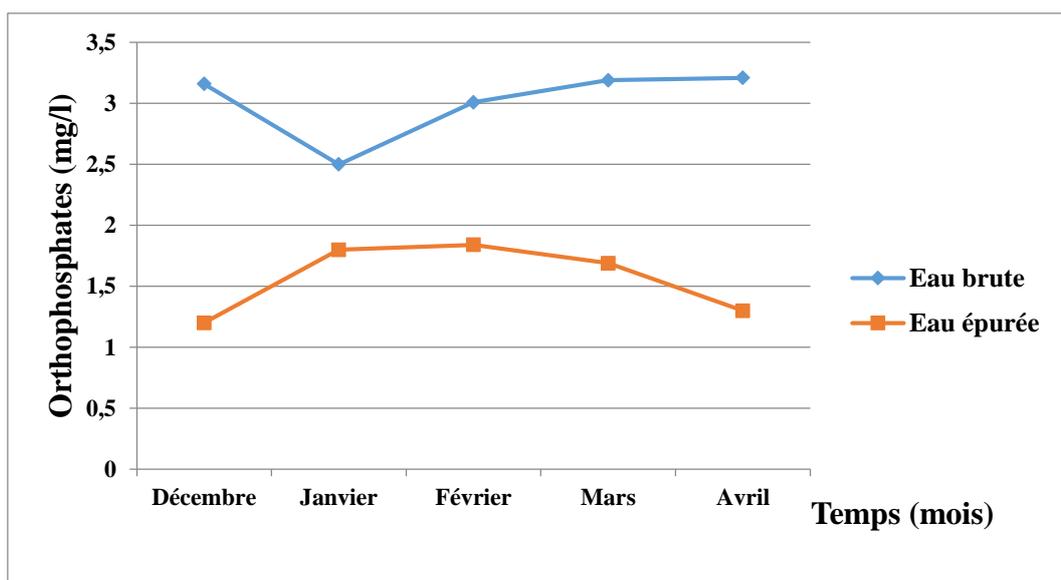


Figure V-8: Evolution des orthophosphates (OPO_4^-) en fonction des mois décembre, janvier, février, mars et avril avant et après épuration

V-2- Résultats des analyses physico-chimiques de l'eau traitée par électrocoagulation

V-2-1- Variation des paramètres en fonction du temps à différents courant

V-2-1-1- Température T (°C)

En suivant la variation de la température de l'eau usée au cours du processus d'électrocoagulation pour un temps de (0 à 60 min) et pour différentes intensités de courant (0.01 à 0.2A) (**Figure V-9**), on remarque que la température augmente progressivement. Elle est passée de 14.6 à 24.4°C pendant 60 min, elle varie d'une manière croissante car l'énergie électrique se transforme en chaleur par effet de Joule à cause de la chute ohmique dans la masse de la solution électrocoagulée.

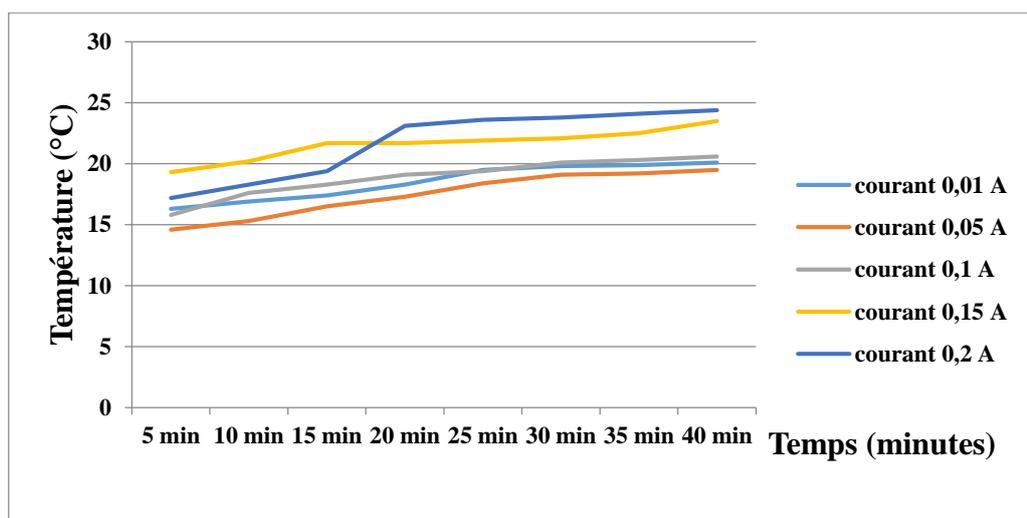


Figure V-9 : Variation de la température en fonction du temps d'E.C

V-2-1-2- Potentiel d'hydrogène (pH)

La Figure (V-10) représente la variation du pH au cours du temps d'EC de (0 à 60 min) pour différentes intensités de courant (0.01 à 0.2A). On remarque que le pH augmente de valeur initiale de 7.56 jusqu'à un pH final maximal de 8.67; cette variation est semblable et similaire pour toute la gamme d'intensités de courant. Cette augmentation est due à la formation des ions hydroxydes produits à la cathode au cours de la réduction de l'eau au niveau de la cathode selon la réaction suivante [58]:

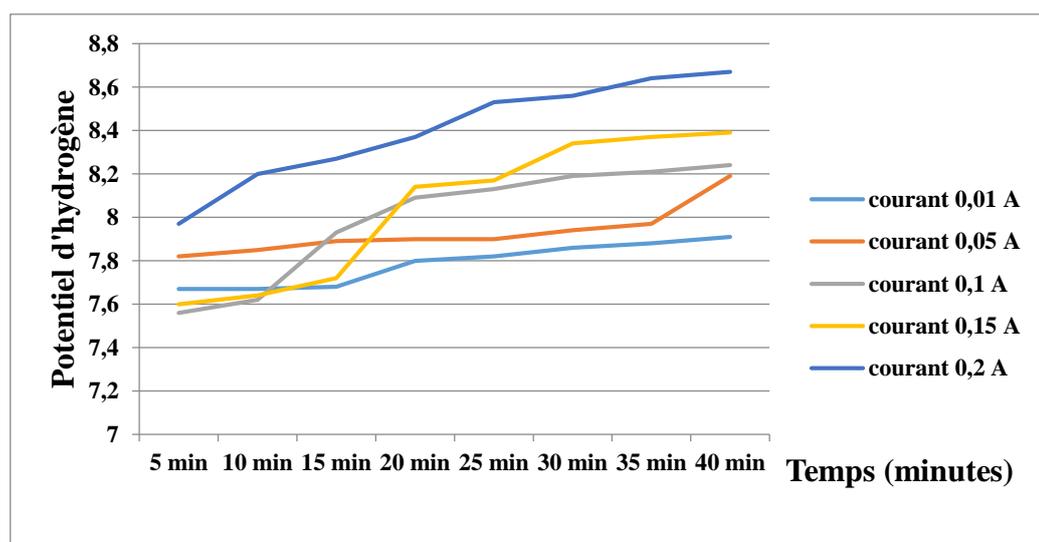
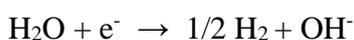


Figure V-10 : Variation du potentiel d'hydrogène en fonction du temps d'E.C

V-2-1-3- Conductivité (ms/cm)

La **Figure (V-11)** représente la variation de la conductivité en fonction du temps d'EC sous l'effet du courant (de 0.01 à 0.2 A). On remarque que la conductivité diminue progressivement en fonction du temps d'électrocoagulation et ceci est valable pour les différentes intensités de courant étudiées.

Cette légère diminution de la conductivité enregistrée est due à la précipitation de l'aluminium sous forme d'hydroxydes $Al(OH)_3$ [69] dans la plage du pH allant de 3 à 12 [60] qui s'interfère avec le domaine de pH de travail.

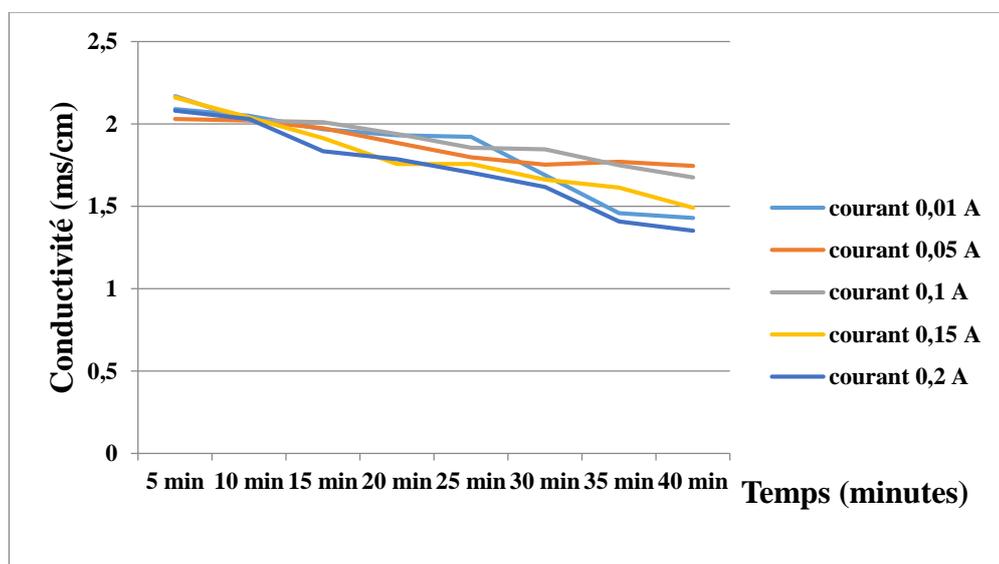


Figure V-11 : Variation de la conductivité en fonction du temps d'E.C

V-2-2- Influence de la filtration sur les paramètres physico-chimiques

V-2-2-1- Température T (°C)

La **Figure (V-12)** représente la variation de la température au cours du temps d'électrocoagulation avant et après filtration. On remarque un léger décalage entre les deux courbes et que la température avant filtration augmente progressivement alors que celle mesurée après filtration est presque constante. Ceci montre que la présence des suspensions colloïdales (flocs) affecte légèrement la variation de la température.

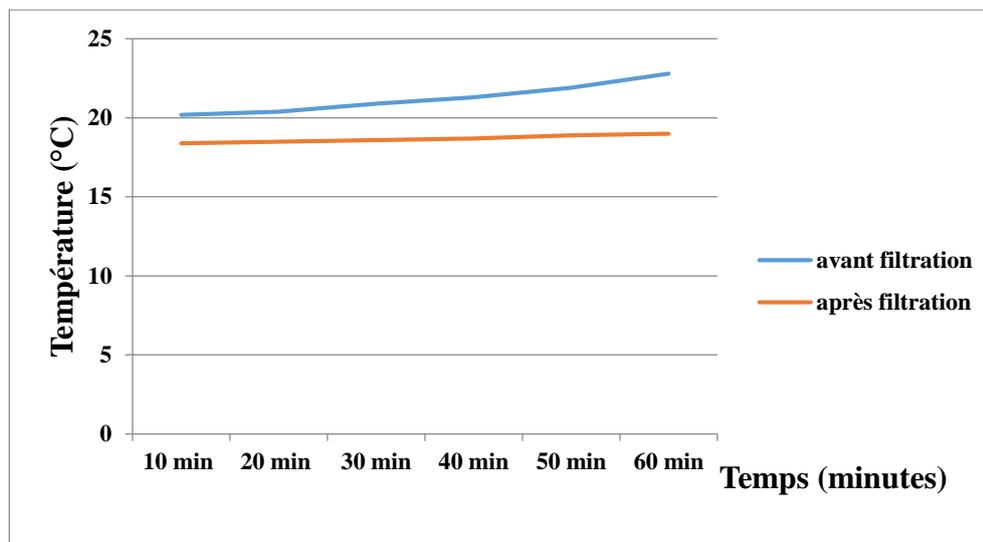


Figure V-12 : Variation de la température en fonction du temps (avant et après filtration)

V-2-2-2- Potentiel d'hydrogène (pH)

Selon la **Figures (V-13)**, on remarque que le pH a augmenté progressivement au cours du temps d'électrocoagulation. Il est passé de 7.68 à 8.14 pendant 60 min d'EC avant filtration et de 7.83 à 8.73 après filtration. Ceci montre que la présence des suspensions colloïdales (flocs) affecte légèrement le pH.

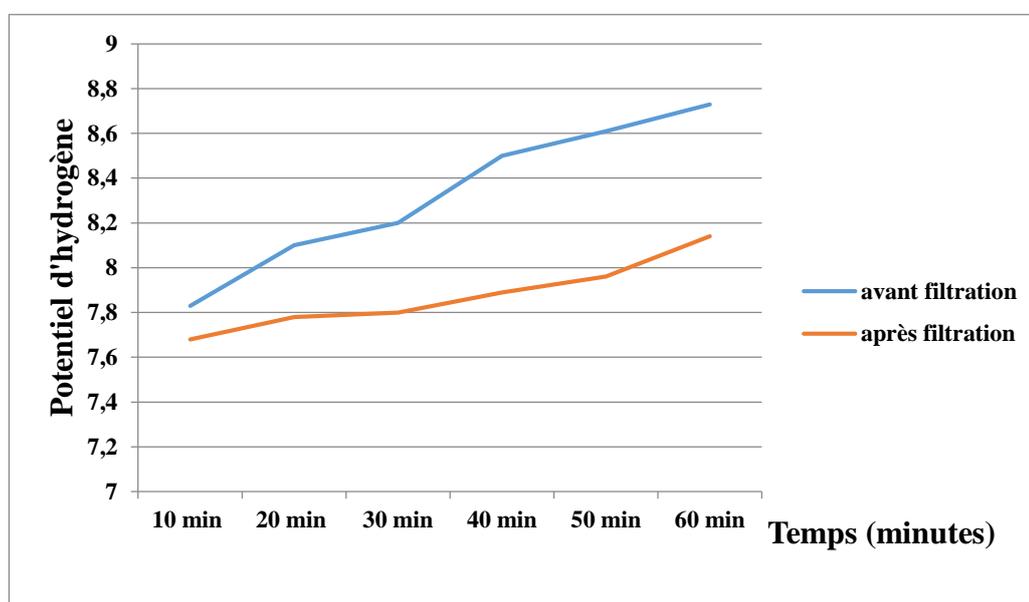


Figure V-13 : Variation de potentiel d'hydrogène en fonction du temps (avant et après filtration)

V-2-2-3- Conductivité

La **Figure (V-14)** montre que la conductivité a diminué au cours du temps d'EC. Elle est passée de 1.775 à 1.165 avant filtration et 1.404 à 1.049 après filtration pendant 60 minutes d'électrocoagulation. Ceci montre que la conductivité est aussi affectée par la filtration.

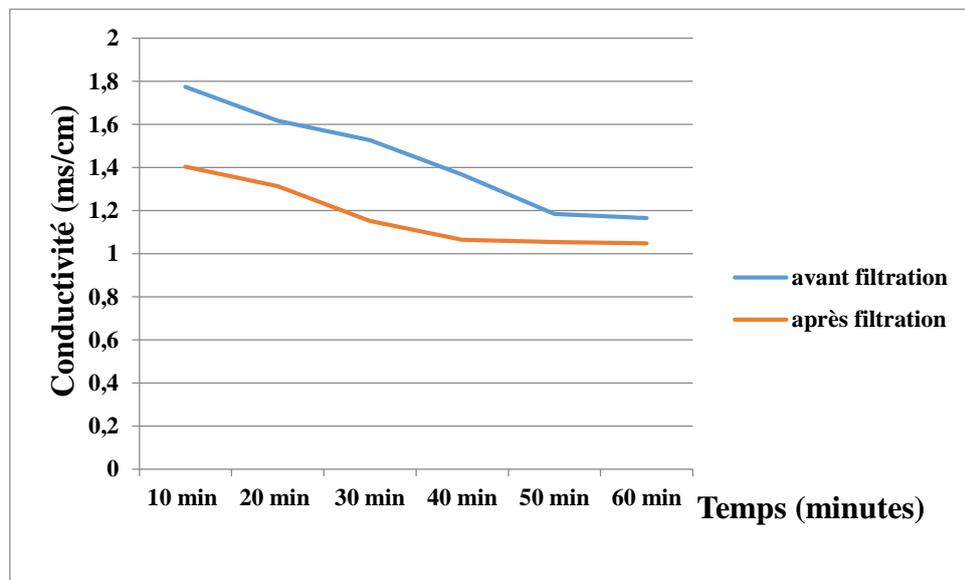


Figure V-14 : Variation de la conductivité en fonction du temps (avant et après filtration)

V-2-3- Variation des paramètres MES, concentration des différents ions en fonction du temps et du courant

V-2-3-1- Matières en suspension MES (g)

Les MES représentent l'ensemble des matières solides visibles à l'œil nu. Aussi, les matières colloïdales flocculées, organiques ou minérales, pouvant être retenues par filtration ou centrifugation. L'excès de MES peut être à l'origine d'une dégradation de la qualité biologique des cours d'eau

Ainsi, les **Figure (V-15) et (V-16)** montrent l'évolution des matières en suspension MES en fonction du temps (0-60min) et du courant (0.01-0.2A) respectivement.

On remarque que les MES augmente d'une manière croissante avec l'augmentation du temps et du courant. Ceci montre que l'augmentation du temps ou l'augmentation du courant d'électrocoagulation encourage la formation d'une grande quantité de floccs (MES) qui vont par la suite flotter et être séparés par filtration.

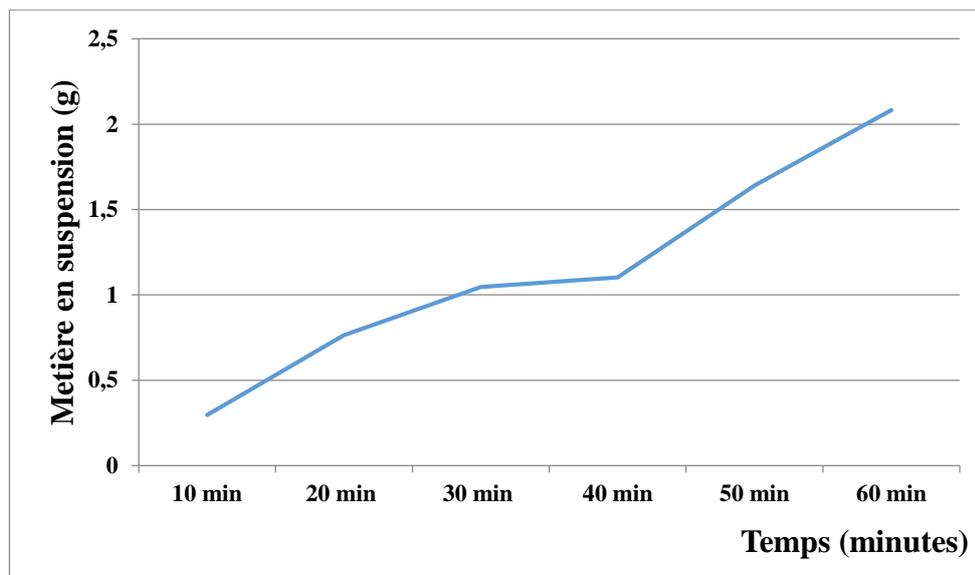


Figure V-15 : Variation des matières en suspension en fonction du temps

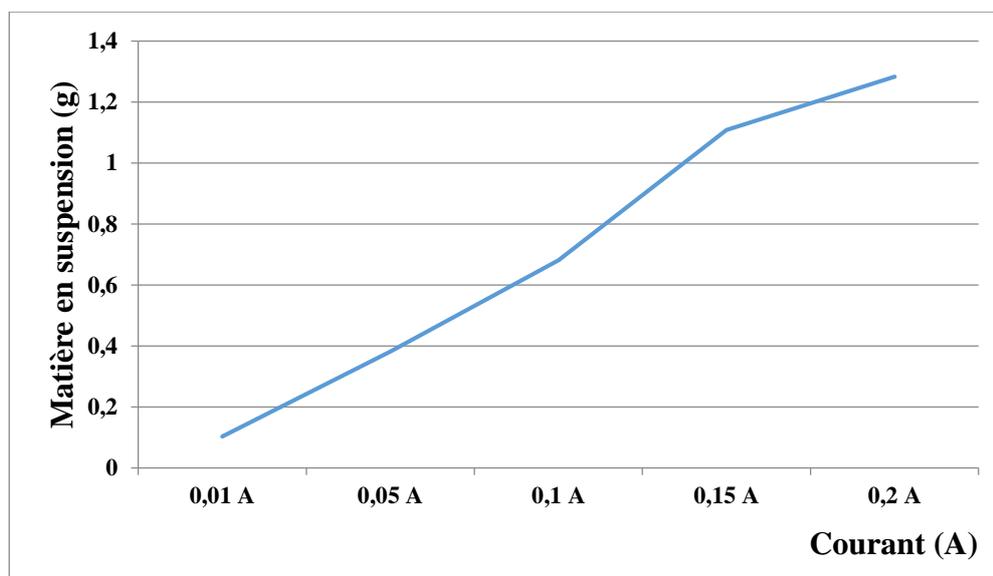


Figure V-16 : Variation de matière en suspension en fonction du courant

V-2-3-2- Variation d'ammonium (NH_4^+) en fonction du temps et du courant

La variation de NH_4^+ au cours du temps (0-60min) (Figure V-17) à des courants (de 0.01 à 0.2A) (Figure V-18) révèle que la concentration de NH_4^+ diminue, cette diminution est due à l'oxydation de l'azote ammoniacal (NH_4^+) en azote nitreux ou nitrite (NO_2^-) puis en nitrate par l'intermédiaire de bactéries nitrifiantes (Nitrosomonas, Nitrobacter) selon les réactions suivantes [49,50] :



Et aussi les charges négatives des colloïdes attirent les ions positifs de NH_4^+ . Ceux-ci sont étroitement collés au colloïde et forment la couche liée couche de STERN, qui attire à son tour des anions accompagnés d'une faible quantité des cations et qui forme la couche diffuse (couche de GOUY).

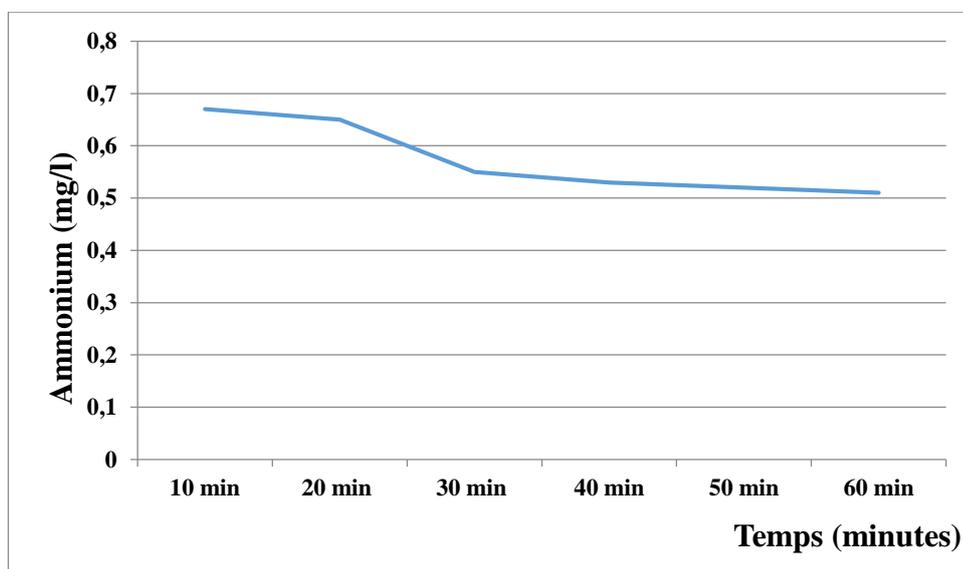


Figure V-17 : Variation d'ammonium en fonction du temps

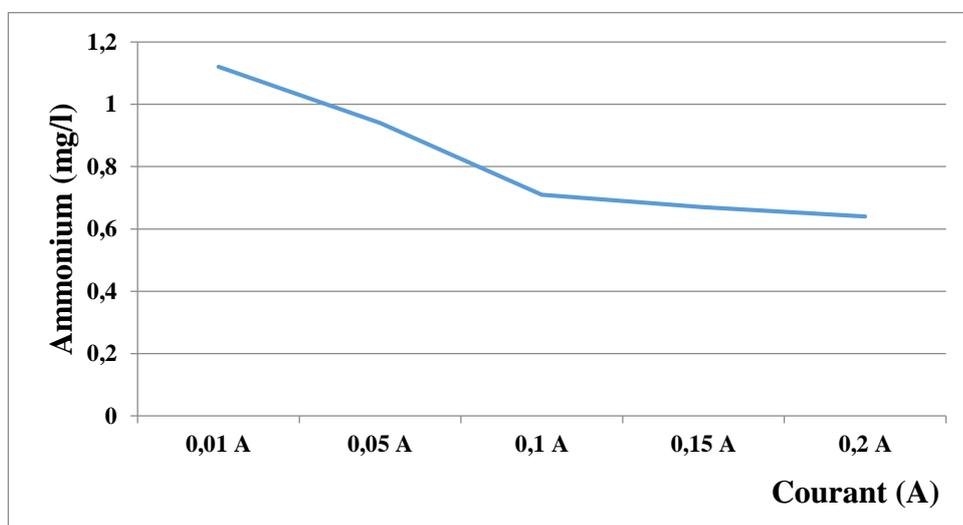


Figure V-18 : Variation d'ammonium en fonction du courant

V-2-3-3- Variation des nitrites (NO_2^-) en fonction du temps et du courant

Les Figure (V-19) et (V-20) représentent la variation des nitrites en fonction du temps et du courant respectivement.

Là encore on remarque que la concentration des ions NO_2^- diminue en fonction du temps ou du courant de manière décroissante. Cette diminution est due à l'oxydation des nitrites en nitrates par les bactéries du genre nitrobacter, selon la réaction suivante [49,50] :



Ou réduction selon la réaction [50]:



Et à leur tour les nitrates se réduisent en azote N_2 [48,50] selon :

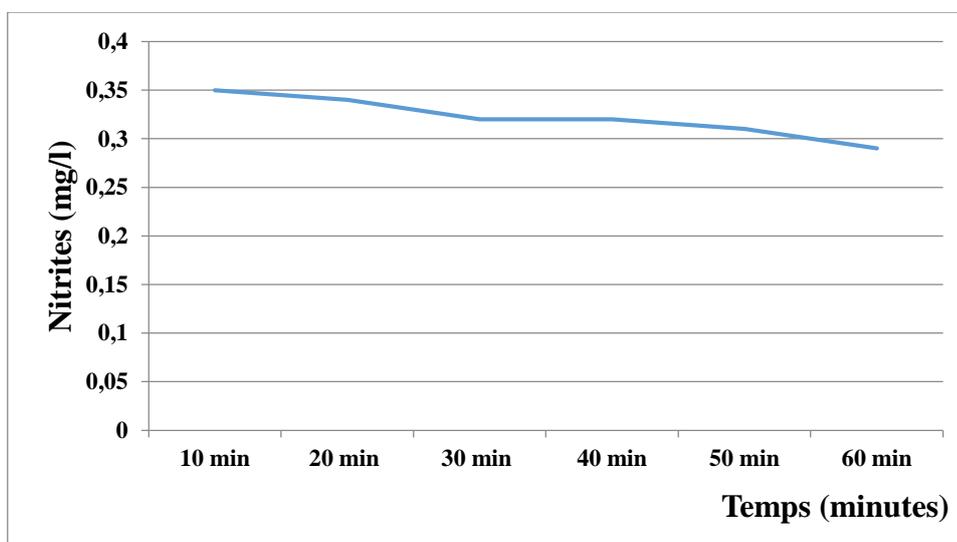


Figure V-19 : Variation des nitrites en fonction du temps

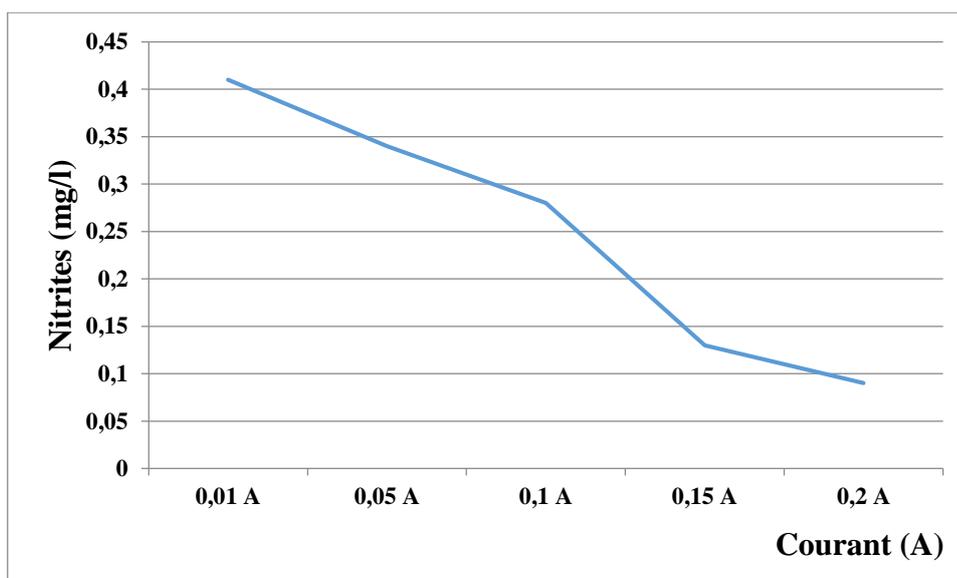


Figure V-20 : Variation des nitrites en fonction du courant

V-2-3-4- Variation des sulfates (SO_4^{2-}) en fonction du temps et du courant

Les deux figures représentent la variation des sulfates en fonction du temps (le temps maximum 60 min) (**FigureV-21**) et en fonction du courant (0,01A- 0,2A) (**figure V-22**). Ces figures montrent que la concentration des sulfates a diminué , cette diminution est due à la combinaison de Al^{3+} avec les ions OH^- pour donner successivement les espèces ioniques suivantes [58] :

$\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ et $\text{Al}(\text{OH})_4^-$. La solubilité de l'aluminium trivalent $\text{Al}(\text{OH})_3$ est quasiment nulle dans la gammes de pH entre 7 et 8 cependant sa réaction avec les OH^- en solution permet la formation de composés solubles tel que les cations $[\text{Al}(\text{OH})_2]^+$ et $[\text{Al}(\text{OH})]_2^+$.

Les ions sulfates SO_4^{2-} se combinent avec l'aluminium Al^{3+} et forment les espèces $[\text{Al}(\text{SO}_4)]^+$ et $[\text{Al}(\text{SO}_4)_2]^-$. Ainsi pour les sulfates on peut proposer deux types de coagulations dans le domaine de pH 7-8 :

La première selon la réaction proposée suivante :



Et la deuxième les sulfates s'adsorbent directement sur l'hydroxyde d'aluminium $\text{Al}(\text{OH})_3$ selon le modèle de la double couche pour donner des composés colloïdaux ou insolubles.

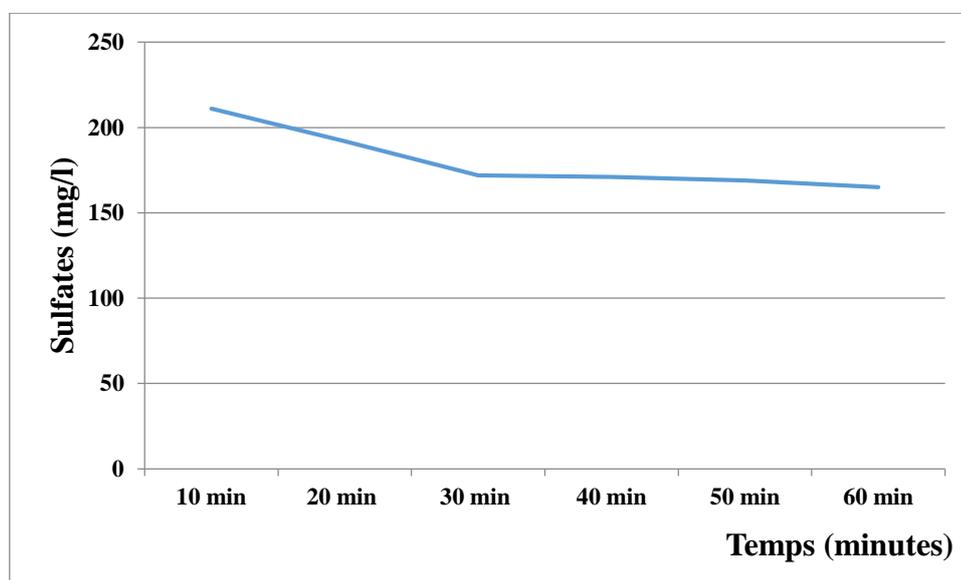


Figure V-21 : Variation des sulfates en fonction du temps

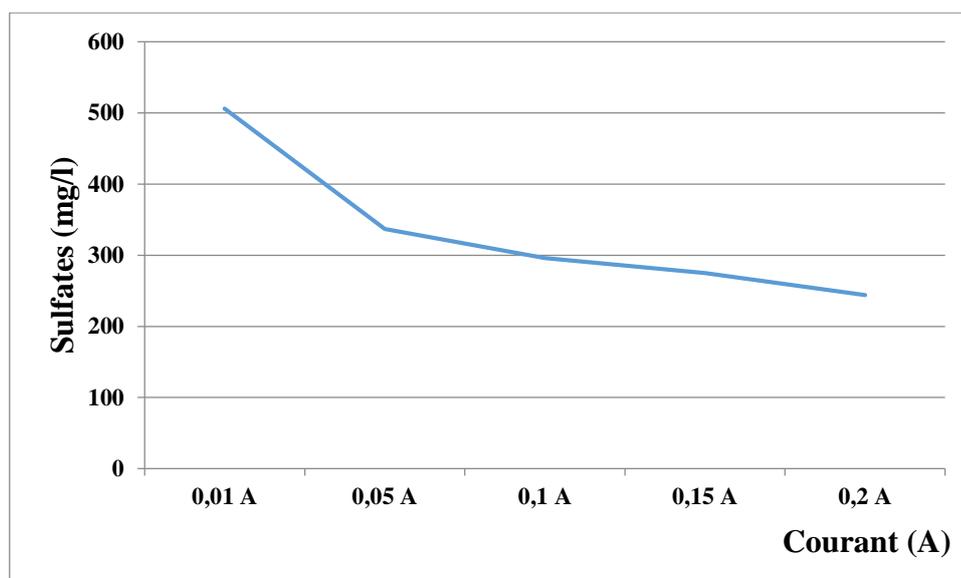


Figure V-22 : Variation des sulfates en fonction du courant

V-2-3-5- Variation des phosphates (PO_4^{3-}) en fonction du temps et du courant

Les **Figure (V-23) et (V-24)** montrent l'évolution des phosphates PO_4^{3-} en fonction du temps (0-60min) et du courant (0.01-0.2A) respectivement.

On observe que les PO_4^{3-} diminuent avec l'accroissement du courant et du temps, cette diminution est due à la précipitation de phosphore insoluble par l'aluminium et leur élimination par flottation.

Les ions phosphate PO_4^{3-} réagissent avec l'aluminium Al^{3+} en milieu neutre ou acide pour former les composés $\text{Al}(\text{PO}_4)$, $\text{AlH}(\text{PO}_4)^+$ et $\text{AlH}_2(\text{PO}_4)^{2+}$ [58].

Aussi, les orthophosphates sont initialement sous la forme H_2PO_4^- ou 3HPO_4^{2-} , ils sont probablement éliminés par précipitation avec les ions aluminium selon les réactions suivantes [79] :



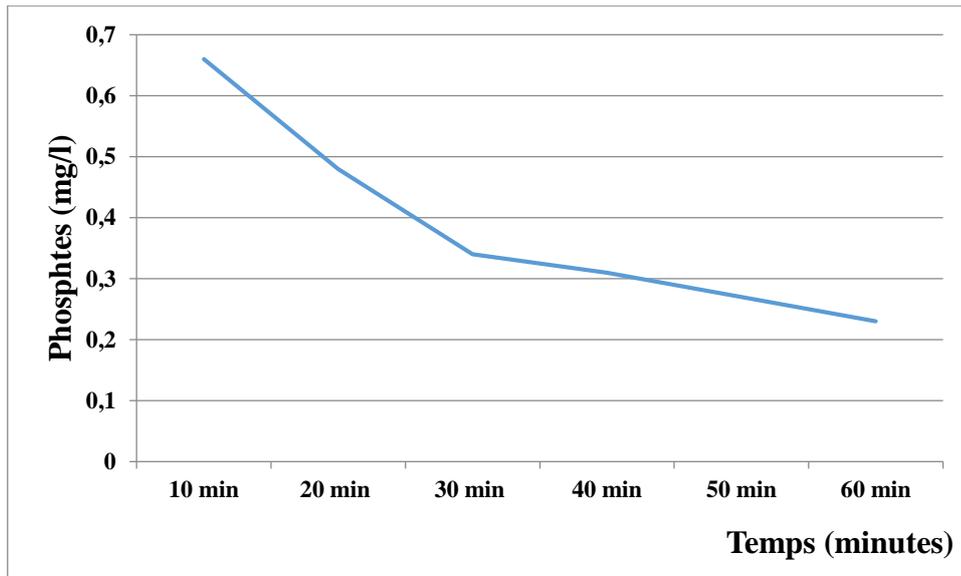


Figure V-23 : Variation des phosphates en fonction du temps

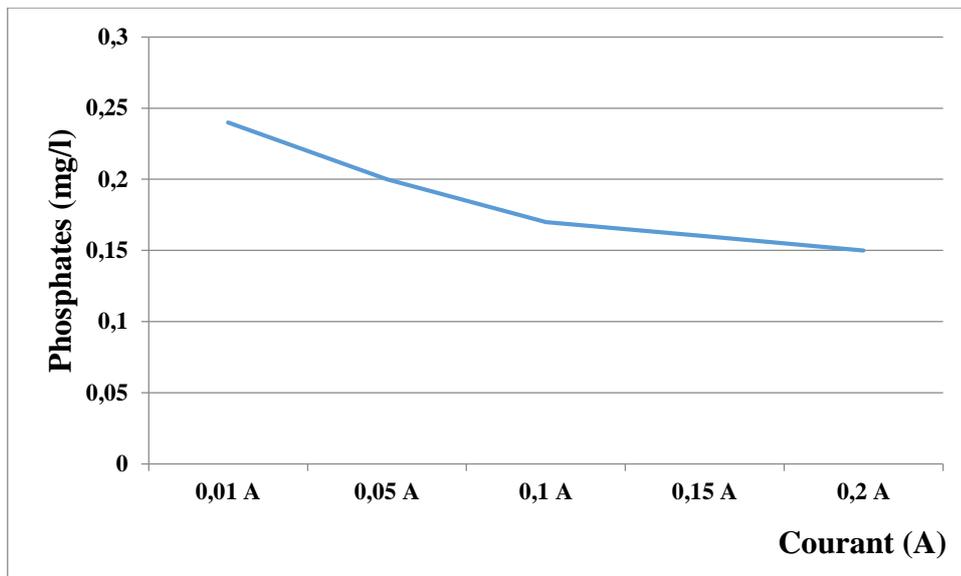


Figure V-24 : Variation des phosphates en fonction du courant

CONCLUSION GENERALE

Notre travail entre dans le cadre d'une étude sur deux méthodes de traitement les plus utilisées l'une par la boue activée et l'autre par électrocoagulation afin de contribuer à améliorer la qualité des eaux usées traitées pour pouvoir élargir le domaine de leur utilisation.

Par conséquent notre travail a été divisé en deux parties essentielles. La première concerne le traitement des eaux usées par la boue activée au niveau de la STEP-Guelma. La deuxième porte sur le traitement par électrocoagulation au niveau du laboratoire d'électrochimie université-Guelma.

Le premier objectif de cette étude a été basé sur l'étude des propriétés physico-chimiques des eaux usées à l'entrée et à la sortie de la station d'épuration de la ville de Guelma.

Les résultats obtenus permettent de confirmer qu'après cinq mois d'expérimentation, les valeurs des paramètres (DCO, DBO₅, orthophosphates, matières en suspension, l'ammonium, conductivité, température, oxygène dissous, et potentiel d'hydrogène pH) étudiés dépassent les normes de rejet à l'entrée de station alors après épuration on observe un accord avec les normes.

Le deuxième objectif de ce travail était le traitement des eaux usées-STEP-GUELMA chargées en matières en suspension (organiques et minérales), sous forme des phosphates (orthophosphates), sulfates, ammonium, nitrates et nitrites etc., par le procédé d'électrocoagulation en utilisant comme électrodes l'aluminium et par la suite analyser et déterminer la variation des différents paramètres en outre : les matières en suspension MES, la température T, le pH, la conductivité, la concentration massique des nitrites, des phosphates, des sulfates et d'ammonium pour des conditions opératoires variables :

- Pour la température on a remarqué qu'elle varie d'une manière croissante qui a été expliquée par la transformation de l'énergie électrique en chaleur par effet de Joule à cause de la chute ohmique dans la masse de la solution électrocoagulée.
- Pour le pH, on a remarqué une augmentation du pH de valeur initiale de 7.56 jusqu'à un pH final maximal de 8.67; cette variation est semblable et similaire pour toute la gamme d'intensités de courant utilisées et elle est due à la formation des ions hydroxydes Al(OH)₃ produits à la cathode au cours de la réduction de l'eau au niveau de la cathode.
- Concernant la conductivité on a remarqué qu'elle diminue progressivement en fonction du temps d'électrocoagulation et ceci est valable pour les différentes intensités de courant étudiées. Cette diminution de la conductivité est due à la précipitation de l'aluminium sous forme d'hydroxydes Al(OH)₃.

- Pour l'évolution des matières en suspension MES en fonction du temps à des courants variés on a remarqué que les MES augmentent d'une manière croissante avec l'augmentation du temps et du courant. Ceci montre que l'augmentation du temps ou l'augmentation du courant d'électrocoagulation encourage la formation d'une grande quantité de floccs (MES) qui vont par la suite flotter et être séparés par filtration.
- Pour les ions NH_4^+ , l'étude a révélé que la concentration de NH_4^+ diminue et cette diminution est due à l'oxydation de l'azote ammoniacal (NH_4^+) en azote nitreux ou nitrite (NO_2^-) par l'intermédiaire de bactéries nitrifiantes.
- Pour les nitrites, la concentration des ions NO_2^- diminue de manière décroissante. Cette diminution est due à l'oxydation des nitrites en nitrates par les bactéries du genre nitrobacter, selon la réaction de nitratisation ou leur réduction électrochimique au niveau de la cathode en dégageant l'azote.
- Pour les sulfates l'étude a montré que la concentration des sulfates diminue au cours du temps et au cours des différents courants appliqués, cette diminution est due à la combinaison des ions sulfates SO_4^{2-} avec l'aluminium Al^{3+} pour former les espèces $[\text{Al}(\text{SO}_4)]^+$ et $[\text{Al}(\text{SO}_4)]^{2-}$ qui vont par la suite coaguler et former des floccs en présence de l'hydroxyde d' $\text{Al}(\text{OH})_3$ selon le modèle de la double couche.
- Pour les phosphates l'évolution des phosphates PO_4^{3-} en fonction du temps et du courant montre que les PO_4^{3-} diminuent avec l'accroissement du courant ou du temps, cette diminution est due à leur élimination par précipitation avec les ions aluminium.

Il en sort que les paramètres : potentiel appliqué (intensité de courant) et le temps d'électrocoagulation jouent un rôle très crucial dans l'élimination des polluants.

Comme perspectives on prévoit élargir l'étude à d'autres paramètres et faire une étude sur les polluants qui ont été éliminés sous forme solide (MES) par différentes méthodes entre autre l'infra-rouge et les rayons X afin de déterminer les constituants principaux.

- [1] **Djeddi H**, Utilisation des eaux d'une station d'épuration pour l'irrigation des essences forestières urbaines, Ecologie végétale, Magister, Constantine : Université Mentouri, 2007, P 12.
- [2] **Annane O**, Amélioration de la technique de défluoruration par le nouveau procédé d'électrocoagulation bipolaire, Magister, Tizi-Ouzou : Université Mouloud Mammeri, 2011, P 01.
- [3] **Saadi M, Lahmar Fares A**, Evaluation de l'efficacité de la station d'épuration de Guelma (N-EST ALGERIE), Hydraulique. Master, Annaba : Université Badji Mokhtar, 2018.
- [4] **Benfiala I, Haouli Z**, Le rendement épuratoire de la station d'épuration de la ville de Guelma. Hydraulique, Master, Annaba : Université Badji Mokhtar, 2017, P 01.
- [5] **Cherif L**, L'influence de la coagulation-floculation et décantation sur le pré traitement des eaux saumâtres, Hydraulique, Master, Tlemcen : Université Abou Bekr Belkaid, 2012, P 01.
- [6] **Bensaid J**, Contribution à la dépollution des eaux usées par électrocoagulation et par adsorption sur des hydroxydes d'aluminium, Electrochimie, Thèse, Tizi-Ouzou : Université Mouloud Mammeri, 2009, P 02.
- [7] **Inoussa Z**, Étude expérimentale et théorique du procédé d'électrocoagulation : application au traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie, Génie des procédés et des produits, Thèse, France : Ecole national supérieure des industries chimiques, 2009, P 05.
- [8] **Abbes M, Messaad A**, Utilisation de l'électrocoagulation pour l'élimination de colorants des eaux usées de colorants des eaux usées de l'industrie textile, Hydraulique, Master, Msila : Université Mouhamed Boudiaf, 2017, P 01.
- [9] **Ahmed Brahim D, TALEB I**, L'étude du fonctionnement de la STEP de Sidi bel Abbes par le principe à boue activées, Hydraulique, Master, Tlemcen : Université Abou Bekr Belkaid, 2014, P 05.
- [10] www.ltbp.org/FTP/BDI22.PDF (Page consultée le 06-04-2019).
- [11] <https://ona-dz.org/article/comprendre-les-eaux-usees.html> (Page consultée le 06-04-2019).
- [12] **Metahri Mohammed S**, Élimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées par des procédés mixtes, Cas de la STEP Est de la ville de Tizi-Ouzou. Agronomie, Thèse de Doctorat, Tizi-Ouzou : Université Mouloud Mammeri, 2012, P 05-06.

- [13] **Tarmoul F**, Détermination de la pollution résiduelle d'une station d'épuration par lagunage naturel "cas de la lagune de béni-messous, DEUA : Institut des Sciences de la Mer et de l'Amenagement du Littoral, 2007, P 03.
- [14] **Yahiatene S, Tahirim El Tiadj**, Réflexion sur la caractérisation physico-chimique des effluents liquides rejetés dans la grande sebkha d'Oran, Licence, Oran : Université de science et technologie USTO MB, 2010, P 04.
- [15] **Bouaicha A, Killani A**, Optimisation des paramètres de la récupération du phosphate des eaux usées et sa valorisation dans la synthèse de l'acide phosphorique de Bejaia, Mines et Géologie, Master, Bejaia : Université Abderrahmane Mira, 2017, P 05.
- [16] **Zeghoud Mohamed S**, Etude de système d'épuration des eaux usées urbaines par lagunage naturel de village de Méghibra, Hydraulique, Master, EL-Oued : Université EL-Oued, 2014, P 16.
- [17] www.1h2o3.com/...eaux-usees/quelles-sont-les-caracteristiques-des-eaux-usees (Page consultée le 07-04-2019).
- [18] **Dekhil Soror W, Ziabet M**, Traitement des eaux usées urbaines par boues activées au niveau de la ville Bordj Bou Arreridj effectué par la station d'épuration des eaux usées ONA, Chimie, Master, Bordj Bou Arreridj : Université Mohamed El Bachir elibrahimi, 2013, P 18.
- [19] **Ghazali D.1, Zaid A**, Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de la source Ain Salama-Jerri (Region de Meknes-Maroc) Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 12, Janvier 2013, p28.
- [20] www.eau-pro.com/upload/useruploads/files/Paramètre%20phisicochimiques (Page consultée le 07-04-2019).
- [21] **Ajeroud K**, Etude physico chimique et organique des eaux usées de la ville d'Ain Beida et leur impact sur l'irrigation, Hydraulique, Master, Oum El Bouaghi : Université Larbi Ben M'hidi, 2016, P 10.
- [22] www.anhydre.eu/wtw/conductivite (Page consulté le 07-04-2019).
- [23] **Lakhdari B**, Effet de la coagulation- floculation sur la qualité des eaux épurées de la STEP de Ain El Houtz, Chimie, Diplome de Magister, Tlemcen : Université Abou Bekr Belkaid, 2011, P 37.
- [24] **Hadef B**, L'effet des sels minéraux sur l'élimination du phénol par coagulation-floculation, Génie de l'environnement, Master. Biskra : Université Mohamed Khider, 2015, P 11.
- [25] hmf.enseiht.fr/travaux/CD0304/optsee/bei/5/binome5/paraman.htm (Page consultée le 03-04-2019).

- [26] **Arouche L, Touil T**, Contribution à l'Etude de la Performance de la Station d'Épuration (STEP) de Souk El Tenine Bejaia, Biodiversité et Sécurité Alimentaire, Master, Béjaia : Université A. MIRA, 2018, P 07.
- [27] **Hadef D, Hasni M**, Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de l'Oued de Boutane région de Khemis-Miliana W.Ain Defla, Chimie, Master, Khemis Miliana : Université Djilali Bounaâma, 2017, P 07.
- [28] www.ahlbourn.pagesperso-orange.fr/docspdf/1502-1503 (Page consultée le 04-04-2019).
- [29] **Nectaire Lié Nyamsi T**: Effets des rejets d'une usine de traitement de la cellulose sur la qualité des eaux du Ntsomo: Etude hydrologique et biologique du cours d'eau, Hydrobiologie et environnement, DEA : Université de yaoundé, 2004.
- [30] **Sari H**, Contribution à l'étude de la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau de la source «Attar » (Tlemcen), Sciences des aliments, Master, Tlemcen : Université Abou Bekr Belkaid, 2014, P 17.
- [31] **Rodier J**, (2005). «L'analyse d'eau». 5ème édition.
- [32] **Beldjilali F, Arab A**, Etude comparative des paramètres physico-chimiques et bactériologique ; des eaux de barrage Kramis et des eaux de source naturelle Ain Sidi Abd Elkader, Microbiologie Fondamentale, Mostaganem : Université Abdelhamid Ibn Badis, 2018, P 14.
- [33] **Ben Chehem M, Bouazza H, Labbaz L**, Inventaire des études scientifiques relatives à la réutilisation des eaux usées dans le domaine piscicole. Sciences de la nature et de la vie, Licence, Ouargla : Université Kasdi Marbah, 2014, P 04.
- [34] **Bennana M**, Etude de la pollution de l'eau et du littoral du lac de Hassi ben Abdellah, Génie des Procédés, Master, Ouargla : Université Kasdi Marbah, 2013, P 06.
- [35] **Kesbi R**, Etude des performances épuratoires d'une STEP de l'ouest Algérien cas de la nouvelle STEP d'Ain Témouchent. Technologie de traitement des eaux, Tlemcen : Université Abou Bekr Belkaid, 2016, P 04.
- [36] **Belhamadi M, Seddik O**, Etude de la biodégradation du 2.4 dichlorophénol par le microbiote des effluents d'entrée et de sortie de la station d'épuration des eaux usées d'ibn Ziad.Biochimie et Microbiologie, Majister en microbiologie, Constantine : Université Mentouri, 2010, P 13.
- [37] **Merzougui W**, Etude de performance d'un dessableur « station d'épuration de la ville d'Ain Beida, Hydraulique, Master, Oum-El-Bouaghi : Université Larbi Ben M'hidi, 2017, P 06.

- [38] **Djeddi H**, Utilisation des eaux d'une station d'épuration pour l'irrigation des essences forestières urbaines, Ecologie végétale, Magister, Constantine : Université Mentouri, 2007, P 12.
- [39] Station d'épuration de Guelma 2010 (Fiche technique).
- [40] **Grosclaude, Gérard, dir.** (1999) L'eau, tome 1 : Milieu naturel et maîtrise et tome 2 : Usages et polluants, Versailles, Institut National de la recherche Agronomique (Coll. « Un point sur ... »), 204 p. et 210 p. (ISBN 2-7380-0855-0 et 2-7380-0864-X).
- [41] www.cours-examens.org/...traitement/traitement-Eaux (Page consultée le 24-04-2019).
- [42] www.eaudumaroc.com/2017/11/traitement-de-leau_20.html (Page consultée le 01-07-2019).
- [43] **Boukhateb A**, Étude de la qualité des eaux rejetées par la maïserie de maghnia, Hydraulique, Master, Tlemcen : Université Abou bakr Belkaïd, 2018, P 38.
- [44] **Bouaissa M**, Traitement des boues de la station d'épuration d'Al-Hoceima, Génie de l'Eau et de l'Environnement, Licence. Université d'Al-Hoceima ,2015.
- [45] **Chadli B**, Réutilisation des eaux usées épurées en irrigation cas de la step d'el bayadh, Hydraulique urbaine, Master, Saida : Université de Dr Moulay Tahar, 2017, P26.
- [46] **Chenini A, Chaouche O**, Contribution A La Désinfection Des Eaux Usées Traitées Par L'utilisation De L'huile De Cade (Cas De La STEP de SAID OTBA Ouargla), Hydraulique, Master, Ouargla : Université Kasdi Merbah, 2016, P 12.
- [47] **Bensabri S**, Etude expérimentale sur la station d'épuration des eaux usées d'Ain Tolba-Wilaya de Ain Temouchent, Eau, Sol et Aménagement, Master, Tlemcen : Université Abou Bekr Belkaid, 2017, P 15.
- [48] **Abibsi N**, Réutilisation des eaux usées épurées par filtres plantes (Phytoepuration) pour l'irrigation des espaces verts application a un quartier de la ville de Biskra, Hydraulique Urbaine et Ouvrages Hydrotechniques, Majister, Biskra : Université Mohamed Khider, 2011, P 12.
- [49] **Cherif H, Ramdani Ch**, Efficacité du traitement de l'azote dans les stations d'épuration à boues activées: cas de la STEP de Ain El Houtz, Eau, Sol et Aménagement, Master, Tlemcen : Université Abou Bekr Belkaid, 2016, P 05, P 34.
- [50] **Mammeri L**, Etude de la réaction de dénitrification par l'utilisation du succinate de sodium comme source de carbone, Chimie de l'environnement, Majister, Constantine : Université Mentouri, 2001, P 06.

- [51] **Zahir B**, Traitement des eaux usées par des procédés biologiques classiques expérimentation et modélisation, Génie Chimique, Majister, Algerie : Université Ferhat Abbas-Sétif UFAS, 2007, P 46.
- [52] **Ourtelli S, Brahimi S**, Contribution à l'étude de l'efficacité du traitement des eaux usées de la station d'épuration de corps gras de Bejaia (CO.G.B) Labelle après ensemencement, Environnement et Sécurité Alimentaire, Master, Bejaia : Université Abderrahmane MIRA, 2013, P 15.
- [53] **Amari S, Berkane S**, Etude génotoxique des boues des eaux usées de la ville de Guelma, Biologie, Master, Guelma : université 8 Mai 1945,2015, p9.
- [54] **Abdelli N, Azzouz Z**, Effet des boues activées sur quelques paramètres morpho-physiologiques de jeunes plants de faba var minor, Sciences de l'environnement, Master, Bejaia : Université A. MIRA, 2016, P 10.
- [55] **Chibani S**, Analyse physico-chimique et rhéologique des boues d'épuration des eaux usées de la ville de Guelma, Majister, Guelma : Université 8 Mai 1945,2010, P 17.
- [56] **Ahlem S**, Etude comparative entre coagulation –floculation et électrocoagulation-électroflottation, Hydraulique, Bejaia : Université Abderrahmane MIRA, 2016, P 35.
- [57] **Salmi D, Slimani K**, Application de l'èctroflottation-électrocoagulation pour l'élimination d'un colorant textile cas du bleu d'indanthrène RS, Hydraulique, Master, Bejaia : Université A.MIRA, 2014, P17.
- [58] **Bennajeh M**, Traitement des rejets industriels liquide par électrocoagulation /électroflotation en réacteur airlift, Génie des procédés et de l'environnement, Thèse, École doctorale : Mécanique, énergétique, génie civil, procédés, 2007, P 11 et P 26-27.
- [59] **Zodi S**, Étude de l'épuration d'effluents de composition complexe par électrocoagulation et des couplages intervenants entre le traitement électrochimique et l'étape de séparation : application à l'industrie textile et papetière, Génie des Procédés et des Produits, Thèse, France : Université de Lorraine, 2012, P28.
- [60] www.chimix.com/an10/bts10/eau02.html (Page consulté 23-06-2019).
- [61] **Miquel J**, L'épuration électrolytique des eaux résiduaires industrielles, Technique Moderne 1 (1977), P 31-33.
- [62] **Persin F, Rumeau M**, Le traitement électrochimique des eaux et des eaux des effluents, Tribune de l'eau 3 (1989), P 45-56.
- [63] **Poteaux G**, Epuration des eaux résiduaires par électrolyse, Technique Moderne 70,1 (1978), P 42-44.

- [64] **Gousmi N**, Etude paramétrique du traitement de microémulsions d'huile de coupe par le procédé d'électrocoagulation, Génie de l'environnement, Magister : Université des sciences et de technologie Houari Boumediene, 2011, P 27.
- [65] **Tir M**, Utilisation des techniques électrochimiques dans le traitement des émulsions hydrocarbures/Eau, Pétrochimie, Thèse, Boumerdès : Université Mohamed Bougara, 2009, P 60.
- [66] **Chikh F, Touahri N**, Etude cinétique et modélisation par les plans d'expériences de la taylosine par le procédé d'électrocoagulation, Génie de l'environnement, Master, Bejaia : Université A.MIRA, 2014, P 14.
- [67] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/colloides> (Page consulté 21-06-2019)
- [68] https://www.editions-ellipses.fr/PDF/9782729861872_extrait.pdf (Page consulté 21-06-2019)
- [69] **Alem S**, Etude comparative entre coagulation-floculation et electrocoagulation-electroflottation, Hydraulique, Master : Bejaia Université Abderrahmane MIRA, 2016, P 21.
- [70] **Traore B**, Le traitement des eaux usées industrielles par electroflottation, Pathologie des écosystèmes, Master. Bejaia : Université A.MIRA, 2012, P 25.
- [71] hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0304/optsee/bei/5/binome4/coag.htm
- [72] www.editions-ellipses.fr/PDF/9782729861872_extrait (Page consultée 23-06-2019)
- [73] **Zerrouki D**, Assemblages colloïdaux organisés, Chimie, France : Université Pierre et Marie Curie – Paris VI, 2007, p11.
- [74] **Mallorie T**, Caractérisation et comportement de suspensions de nanoparticules sous: Application aux processus d'agrégation et de rupture, Génie des Procédés et de l'Environnement, Master, École doctorale : Transferts, Dynamique des Fluides, Énergétique et Procédés, 2006, p 20.
- [75] hmf.enseeift.fr/travaux/beiepe/book/export/html/1273 (Page consultée le 23-06-2019).
- [76] **Ezziane S**, Traitement des eaux de rejets de l'unité CERMIT « TENES ».Génie de procédés, Magister, Chlef : Université Hassiba Ben Bouali, 2007, P 49.
- [77] **Moulai F**, Allilat M, Evaluation de l'efficacité de la station de potabilisation des eaux de TICHY HAF : Analyse des eaux et des boues issues du traitement et considération d'un coagulant et d'un floculant naturels en substitution au traitement actuel, Master, Bejaia : Université A. MIRA, 2016, P 10.
- [78] **Bengana N, Boudaa T**, Application de la photocatalyse combinée avec l'electroflottation pour le traitement des effluents de l'industrie textile, Hydraulique urbaine, Bejaia : Université d'A.MIRA, 2014, P 57.

- [79] **Hanafi F, Sadif N, Assobhei O & Mountadar M.** (2009), Traitement des margines par électrocoagulation avec des électrodes plates en aluminium, *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 22 (4), 473–485. <https://doi.org/10.7202/038326ar>.

Tableau 1 : Normes des rejets internationales

Paramètre	Unités	Normes utilisée (OMS)
pH	-	6,5-8,5
DBO₅	mg/l	<30
DCO	mg/l	<90
MES	mg/l	<20
NH₄⁺	mg/l	<0,5
NO₂	mg/l	1
NO₃	mg/l	<1
P₂O₅	mg/l	<2
T	°C	<30
Couleur	-	Incolore
Odeur	-	Incolore
Conductivité	ms/cm	1 à 2

Tableau 2 : Normes des rejets des eaux usées en Algérie

Paramètre	Normes
T°C	30
pH	6,5-8,5
DBO₅ mg/l	30
DCO mg/l	90
O₂ mg/l	5
MES mg/l	30
PHOSPHATES mg/l	2