

Mémoire du Projet de fin d'étude
2^{ème} Année Master



735

Département : Génie des Procédés
Spécialité : Génie chimique

Présenté par :
Lekhzoum foued
Guenis abderrazak



**Thème : Modélisation du traitement des eaux usées de la
STEP Khenchela par Électrocoagulation**

Sous la Direction de :
Dr. BENDJABALLAH Malek

Juin 2011

Dédicace

A nos chers parents



A nos frères et sœurs

A nos amis

A nos enseignants

A tous ceux qui nous sont chers



INTRODUCTION GENERALE

Les eaux usées qu'elles soient d'origine domestique ou industrielle, sont collectées par un réseau d'assainissement complexe pour être traitées dans une station d'épuration avant d'être rejetées dans le milieu naturel. Les traitements varient en fonction de la nature de ces eaux usées et de la sensibilité à la pollution du milieu récepteur.

Aujourd'hui, les usines de traitement des eaux usées sont devenues des usines de dépollution, compactes, couverts, désodorisées, automatisées, elles mettent en œuvre des traitements de plus en plus performants, capable d'éliminer à la fois la pollution carbonée, l'azote et le phosphore.

Les eaux usées doivent donc subir, avant leur rejet dans le milieu naturel, un traitement d'épuration qui conduit la production des boues résiduelles.

La production des boues, augmente bien sur avec le développement des stations d'épuration. Les boues sont composées d'éléments recueillis à différents stades d'épurations d'une eau usée: matières minérales en suspension, matière organique non biodégradables et microorganismes, ces dernières résultantes de l'épuration biologique. Il devient donc nécessaire de trouver des traitements plus performant permettant de réduire la production des boues.

L'objectif de ce mémoire est consacré à l'étude du procédé d'électrocoagulation pour le traitement des eaux usées (STEP kenchela).

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). A des valeurs de pH proches de la neutralité ou légèrement acide (4 à 7), l'aluminium et le fer dissous sous forme cationique, réagissent avec l'eau pour former des complexes de type $Al_2(OH)^{5+}$, $Al_2(OH)_2^{4+}$, ou des hydroxydes peu solubles $Al(OH)_3$, $Fe(OH)_2$ ou $Fe(OH)_3$, Ce sont ces dernières formes qui jouent le rôle de coagulant ; des agrégats de particules sont alors formés et peuvent décanter pour laisser place à une eau claire et "épurée".

Le champ électrique régnant dans la cellule d'électrolyse entraîne la migration des particules colloïdales vers l'anode, ce qui a pour effet d'accroître leur probabilité de



rencontre, donc de favoriser la coagulation - floculation. L'électrolyse de l'eau entraîne aussi la formation de petites bulles d'oxygène et d'hydrogène (dont la taille moyenne est inférieure à 100 micromètres) respectivement à l'anode et à la cathode.

Ces bulles sont principalement constituées d'hydrogène car la formation d'oxygène est une réaction secondaire et souvent d'une importance négligeable à l'anode.

Ces microbulles s'adsorbent alors sur les matières floculées et peuvent provoquer leur ascension. Ce phénomène est parfois favorisé pour récupérer les boues par flottation. La mousse formée peut être de stabilité médiocre et les matières oxydables retombent au fond de la cuve. Malgré ce fait, de nombreuses particules légères et lourdes restent en suspension et il faut recourir à leur séparation par décantation ou par filtration.

Poteaux (1978) a proposé une classification de la pollution en trois classes :

- La matière décantable et donc éliminable par un simple traitement physique tel que la décantation ou la flottation naturelle sans ajout de réactifs.
- La matière colloïdale : Rovel (1947) la définit comme l'ensemble des particules qui ne sont pas directement sédimentables et de faible taille ($< 20 \mu\text{m}$). Ces particules sont caractérisées par une charge électrique de surface généralement négative qui provoque une répulsion inter particule et empêchent toute agrégation. Selon le même auteur, pour obtenir une agrégation, il faut prévoir une double action de coagulation (annulation des charges négatives) et de floculation (assemblage de particules).
- La matière soluble qui est souvent la plus difficile à éliminer.

Ce procédé peut être très compétitif par rapport au procédé classique de coagulation chimique (par ajout de sel d'aluminium ou de fer) pour le traitement des eaux (Stuart 1946), les travaux les plus récents de Manuel A. Rodrigo (2008, 2009, 2010)) pour le traitement des eaux usées urbaines.

Malgré ces différentes études, plusieurs zones d'ombres subsistent sur les mécanismes tels que les modes d'actions sur les particules polluantes et les types de réactions chimiques et électrochimiques de l'électrocoagulation.

CHAPITRE I

DESCRIPTION DE LA *S.T.E.P*

DE LA VILLE DE KHENCHELA



I.1.Présentation

La S.T.E.P de Khenchela est une station récemment réalisée par convention franco-algérienne et nous avons ici quelques informations sur la station :

- Domiciliation : **2 km** au nord de la ville de **Khenchela**.
- La mise en service : Janvier 2009.
- Le type de station : boue activée à faible charge.
- La surface de la station : **8 hectares**.
- La capacité de la station : **4400 m³/j** pour **192000 eq/hab**.
- Le milieu récepteur des eaux épurées : **oued Baghai**.

I.2. Les phases d'épuration

Le processus de traitement est composé de quatre phases de traitement : trois traitements pour la filière (eau) et un traitement pour la filière (boue).

Les trois phases de traitement pour la filière eau sont comme suit :

- Phase 1: prétraitement ou traitement préliminaires.
- Phase 2 : traitement secondaire ou traitement biologique.
- Phase 3 : traitement tertiaire, la chloration.

Après décantation ; la phase de traitement de la filière boue est constituée de deux principales étapes :

- étape 1 : épaissement (bassins d'épaissement).
- étape 2 : déshydratation naturelle (lits de séchage des boues).

Après cette phase de traitement ; les boues seront mise à la décharge.

I.3.Les caractéristiques de l'effluent final à la sortie de la station

Les caractéristiques de l'effluent final pour une charge nominale organique de 192000 équivalent /habitants et pour un débit moyen de 467 m³/h, après chloration, doivent répondre aux valeurs limites ci après :

- **DBO₅** ≤ 30 mg / l sur 24 h.



- **DCO** ≤ 90 mg / l sur 24 h.
- **MES** ≤ 30 mg / l sur 24 h.
- **pH** compris entre 6.5 et 8,5.
- **Coliformes totaux** < 20000 / 100 ml.
- **Coliformes fécaux** < 12000 / 100 ml.
- **Streptocoques fécaux** < 2000 / 100 ml.

I.4. Schéma représentatif de la station d'épuration de Khenchela

Les différentes phases d'épuration des eaux usées sont résumées dans le schéma suivant :

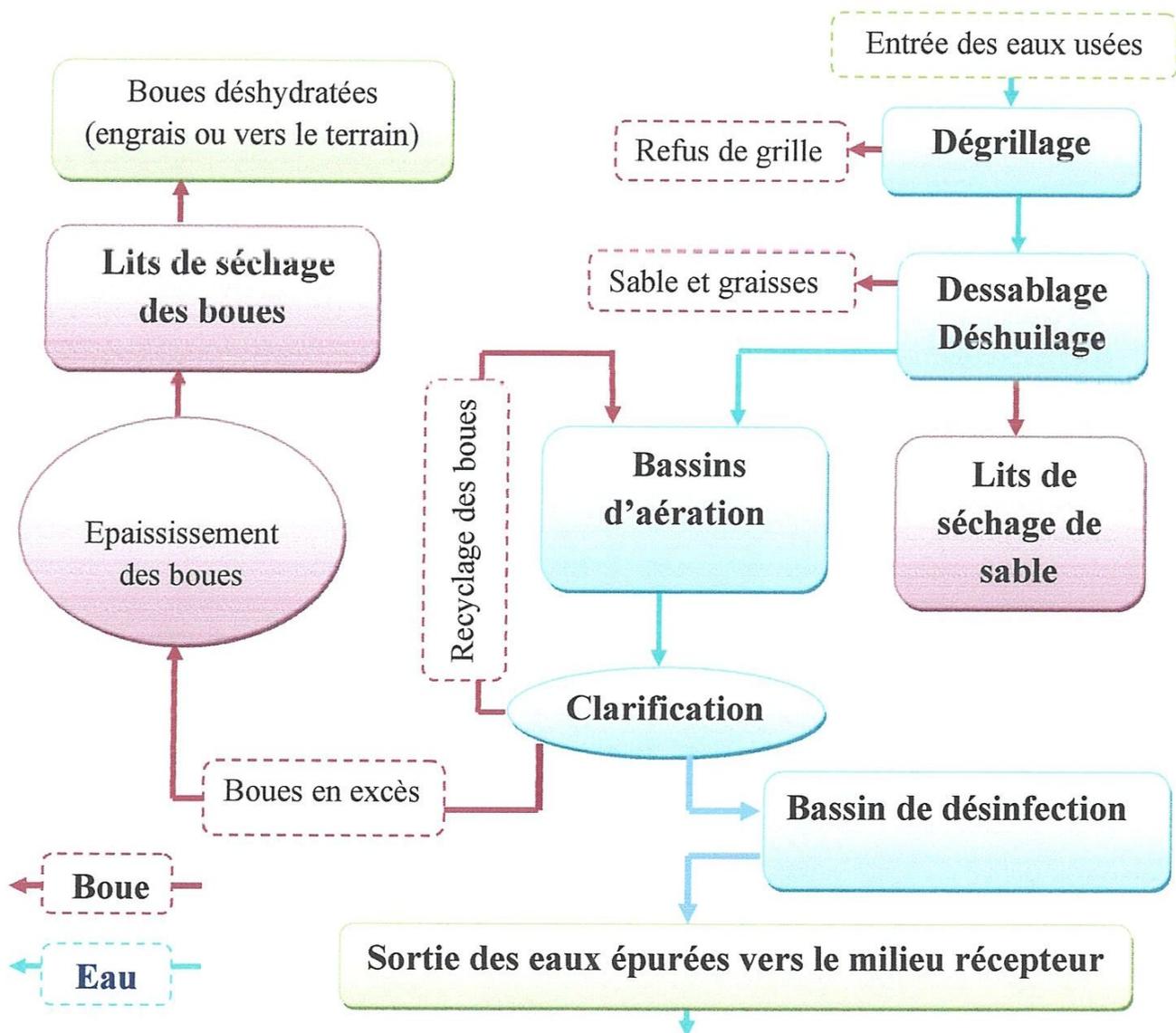


Figure I.1 : schéma simplifié de la station d'épuration de KHENCHELA



I.5. Description du fonctionnement de la S.T.E.P

Le procédé de traitement commence au de la de l'arrivé des eaux polluées des deux collecteurs de la ville (Moussa reddah et oued Bougheguel)

I.5.1. Le relevage

Le transport des eaux usées dans les collecteurs se fait généralement par gravité, sous l'effet de leurs poids. Une station de relevage permet d'acheminer les eaux dans la station d'épuration lorsque ces dernières arrivent à un niveau plus bas que les installations de dépollution. Cette opération de relèvement des eaux s'effectue grâce à des pompes submersibles ou à **vis d'Archimède**.



Photo I.1 : La station de relevage

I.5.2. Le dégrillage grossier

A l'arrivée des eaux usées à la station, ils doivent subir un dégrillage grossier permettant de séparer et évacuer les matières volumineuses (déchets) qui pourrait nuire à l'efficacité des traitements suivants ou en compliquer l'exécution et amener de risque de bouchage et d'obstruction dans les différents unités de l'installation.

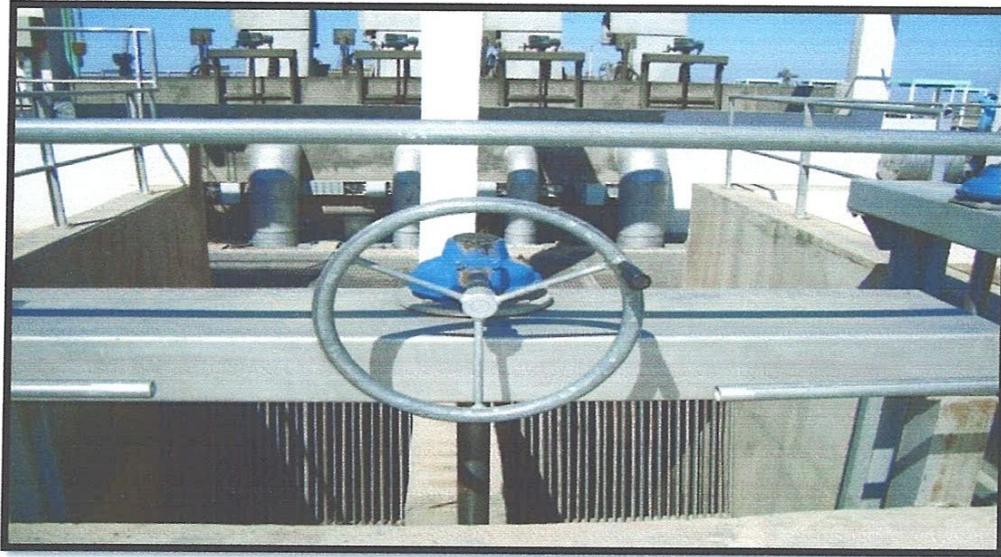


Photo 1.2 : le compartiment de dégrillage grossier

Le compartiment de dégrillage grossier comportant de :

- deux entrées des eaux usées à écoulement gravitaire par deux collecteurs ; chaque entrée est équipée par une vanne pour (l'ouverture et fermeture) permet d'isoler le compartiment pour la maintenance et nettoyage de la grille grossière.
- Une grille grossière de type barreaux plats en acier inoxydable et d'une largeur de 150 cm, la distance entre les barreaux est 4 cm (maille 4.4 cm). L'inclinaison de la grille est 60° et le nettoyage effectué manuellement.

La station d'épuration équipée par un système BY – PASS en cas d'orage vers l'oued, à partir du regard amont au poste de relevage de station pour protéger la station d'épuration contre des eaux de pluies.

L'objectif principal de la phase de dégrillage grossier est :

- Elimination des déchets volumineux.
- Protection de la station d'épuration.

I.5.3. Le pompage

Après le dégrillage grossier les eaux sera pompées vers le dégrilleur fin



La bête est équipée de 04 pompes de relevage submersible :

Deux pompes chacune est équipée d'un variateur de fréquence et ayant les caractéristiques ci-après :

- Type : submersible.
- Débit de refoulement : $800 \text{ m}^3 / \text{h}$.
- HMT : 6 m.

Les autres pompes fonctionnent à vitesse fixe les caractéristiques ci-après :

- Type : submersible.
- Débit de refoulement : $1600 \text{ m}^3 / \text{h}$.
- La hauteur manométrique totale (HMT) : 5,5 m.

Le mode de fonctionnement des pompes est manuel par l'opérateur ou automatique par l'armoire de commande.



Photo I.3 : Les pompes de relevage

I.5.4. Le dégrillage fin

En amont du dessableur-déshuileur est installée quatre (04) grilles fines sont du types grille inclinée, à nettoyage mécanisé sur le canal d'amené.



Pour assurer la continuité du fonctionnement de la station en cas d'arrêt de la grille mécanique deux vannes murales permettent d'isoler cette grille mécanique.

Le dimensionnement de la grille mécanique :

- Capacité : 790 L/S.
- L'inclinaison : 15°.
- Largeur de canal : 1500 mm.
- Epaisseur des barreaux : 6 mm.
- Ecartement : 10 mm.
- Hauteur de rejet : 1500 mm.



Photo I.4 : Le dégrilleur fin

Le mode de fonctionnement de dégrilleur fin

Les déchets retenus au niveau des barres sont soulevés par la benne dégrilleur qui est entraînée en mouvement alterné par deux chaînes.

Le dégrilleur est nettoyé lors de la remontée de la benne par les dents du râteau, monté sur la benne qui passent entre les barreaux.

Avant d'arriver en butée haute, une lame en plastique permet de vider la benne et dégager les déchets accumulés.



Après un arrêt au point mort (haut), la benne reprend la course en sens inverse vers le bas, tout en éloignant le râteau du champ du dégrillage, par contre au point (bas), la benne reprend sa course ascendante en approchant le râteau du champ du dégrilleur.

Un détecteur de niveau permet, par la mesure de l'écart entre les niveaux amont et aval du dégrilleur, de lancer le cycle de nettoyage de la grille, et ce jusqu'à ce que cet écart soit à une valeur minimale prééglée.

Les transporteurs à vis

Les rejets du dégrilleur sont convoyés par un transporteur à vis vers un conteneur de stockage de 1.1 m³.



Photo I.5 : Les transporteurs à vis

Le dimensionnement de transporteur à vis :

- Largeur de vis : 300 mm.
- Longueur de vis : 900 mm.
- Rendement : 3 m³/h.

I.5.5. Le dessablage –désuilage

Pour éviter la décantation de sable dans le bassin biologique, et pour éliminer les huiles et les graisses contenues dans l'eau brute, un dessableur-déshuileur est installé en aval du dégrilleur fin.

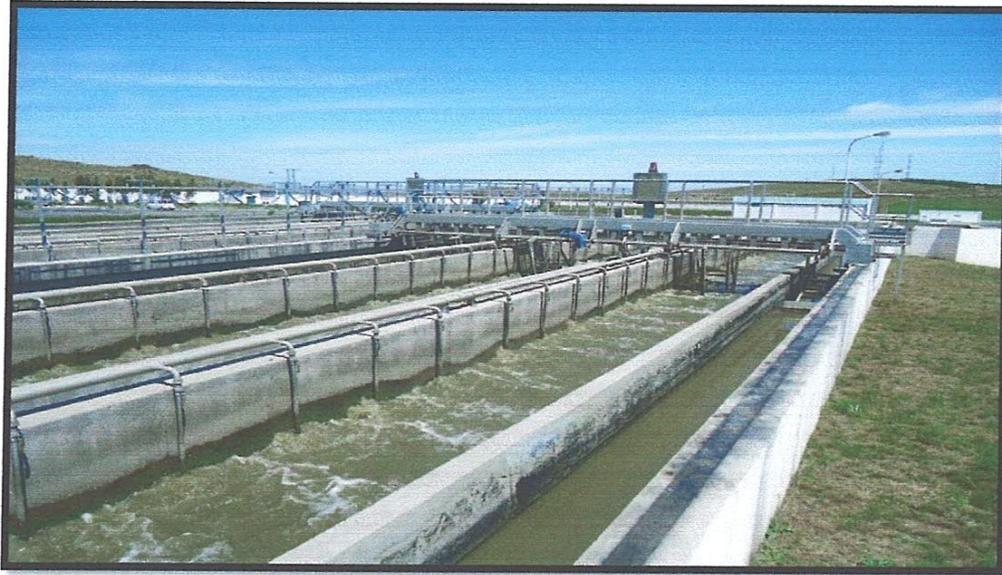


Photo I.6 : Le bassin dessableur-deshuileur

Les caractéristiques d'ouvrage

a) Dimensions :

- nombre de bassin : 2.
- longueur de bassin : 27 m.
- largeur : chambre à graisse : 0,95 m, chambre à sable : 1,90 m.
- profondeur de bassin : 3,10 m.

b) Pompe à sable :

- marque : submersible.
- capacité : 42,7 m³/h.

c) Pont racleur :

- longueur du pont : 9,90 m.
- largeur du pont : 1,2 m.
- charge : 200 Kg/m.
- tôle à graisse : 3240 × 920 mm.
- lame de diversement E×L×H : 3×1950×170 mm.

**d) Suppresseur à piston :**

- nombre : 2.
- capacité : 850 m³/h.



Photo I.7 : Les supprimeurs d'air (a piston)

Le principe de fonctionnement de dessableur- déshuileur

Les deux bassin aérés de dessablage-déshuilage ont une forme rectangulaire et se composent respectivement de trois chambres et d'un pont roulant.

Le sable se déposé au fond des bassins, est raclé en tête de bassin, puis évacué via une pompe à sable vers les lits de séchage du sable.

Les pompes à sable sont protégées contre la marche à sec par des détecteurs de niveau à flottant.

L'air injecté par les supprimeurs entraine l'accumulation des graisses à la surface de l'eau, ces dernières sont raclées par des lames montées sur le pont roulant vers le collecteur à graisse.

Les graisses et les écumes sont collectées à la surface du bassin, elles seront évacuées dans un réservoir de stockage des graisses.



I.5.6. Le traitement biologique

L'objectif de traitement biologique

- Elimination la pollution organique et azotée.
- Elimination biologiquement de phosphore.
- Eviter le gonflement des boues dans les décanteurs.

Les bassins biologiques



Photo I.8 : Les bassins biologiques (bassins d'aération)

Les caractéristiques techniques des bassins d'aération

a) Les bassins biologiques :

- nombre de bassin : 2 en parallèle.
- volume totale des bassins : 15525 m³.
- volume totale pour chaque bassin : 7763 m³.
- volume de compartiment aérobie : 1940 m³.
- Age des boues anaérobie : 9 jours.
- Age des boues totales : 11 jours.

**b) les aérateurs des compartiments :**

- Nombre des aérateurs : 8 aérateurs (un aérateur pour chaque compartiment).
- Apport oxygène par aérateur : 60,5 Kg/h.
- Diamètre de turbine : 1700 mm.

Mode de fonctionnement

Le traitement biologique est de type boue activées à faible charge fonctionnement en aération prolongée.

Le traitement biologique est effectué dans les bassins d'aération à l'aide de processus aérobie par lequel les bactéries provoquent une oxydation directe des matières organique des eaux usées à partir de l'oxygène dissous dans l'eau.

Les aérateurs de surface assurer la quantité d'oxygène nécessaire et bonne agitation de l'eau qui crée un contact optimal, entre les micro-organismes et l'eau à épurer.

Chaque bassin d'aération est équipé de deux sondes à oxygène (oxy-mètre) pour contrôlée la quantité d'oxygène dissous dans les bassins d'aération (quantité d'oxygène entre 0,80 et 2 mg/l).



Photo I.9 : L'oxy-mètre de bassin d'aération



Après un séjour suffisamment long, cette liqueur mixte est envoyée vers les quatre clarificateurs gravitaire pour assurer la séparation solide liquide par gravité, améliorée par mécanismes racleurs de fond et de surface.

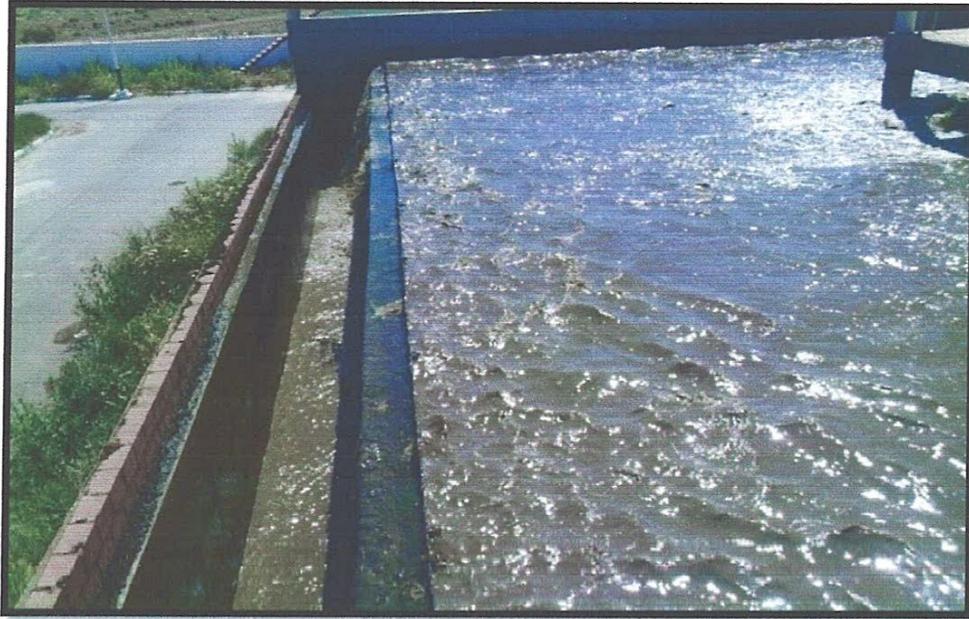


Photo I.10: sortie de liqueur mixte des bassins d'aération

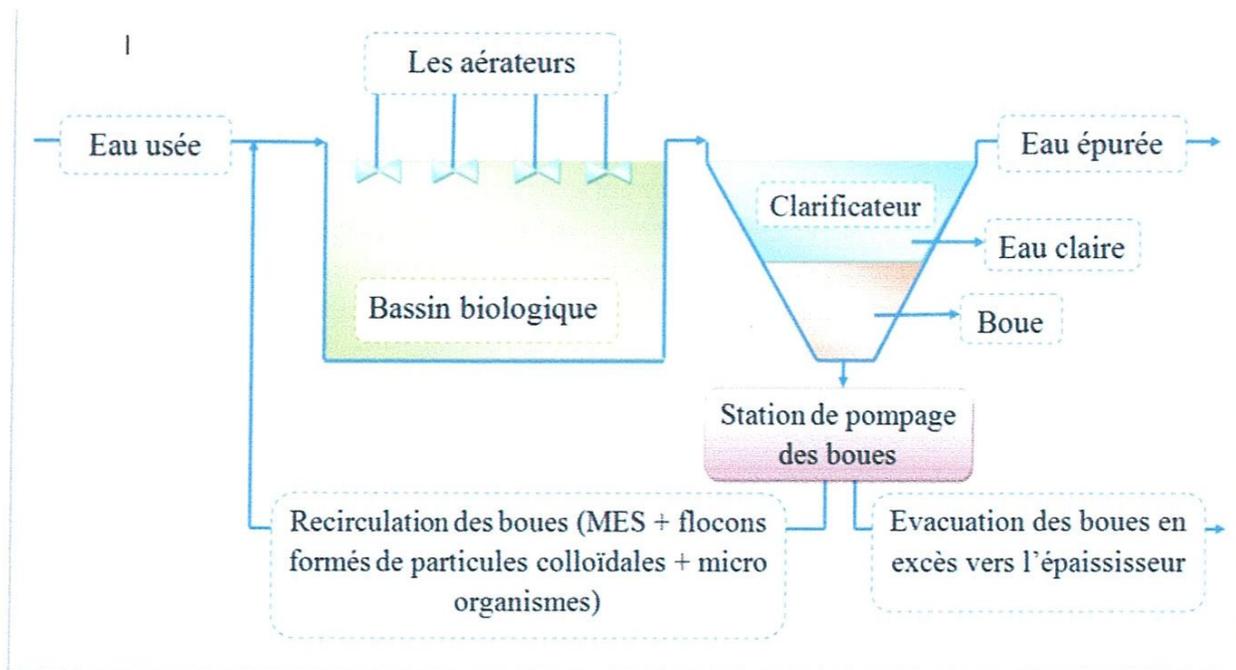


Figure I.2: schéma de recirculation des boues activées



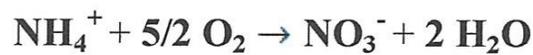
Le bassin d'anoxie

L'élimination des composés azotés dans une station d'épuration par boues activées en aération prolongée n'implique que les phases de nitrification et dénitrification.

La zone anoxie est installée à l'amont immédiat du bassin d'aération.

La nitrification

La nitrification c'est l'oxydation de l'azote ammoniacal en nitrites, puis en nitrates par les bactéries nitrifiantes.



La réaction de nitrification

La dénitrification

La dénitrification c'est une réduction des nitrates en azote gazeux par les bactéries anaérobies hétérotrophes.



La réaction de dénitrification

La déphosphatation biologique

Le principe du déphosphatation biologique repose sur l'aptitude de certains micro-organismes présents dans la station à ré-larguer leur réserves en phosphore lorsque les conditions de vie sont difficiles (le phosphore est alors évacué de la cellule) et à reconstituer des réserves au maximum lorsque les conditions redeviennent favorables, ces conditions défavorables puis favorables sont créées par l'établissement d'une zone anaérobie suivie d'une zone aérobie.

Le phosphore se retrouve finalement concentré dans les boues le rendement se situe entre 60 % et 80 %.



La déphosphatation physico-chimique

Le déphosphatation physico-chimique consiste à ajouter des cations métalliques (sels de fer ou d'aluminium) dans le bassin d'aération pour provoquer la précipitation de phosphore.

Remarque :

Dans la station d'épuration de KHENCHELA l'élimination des composés azotés et de phosphore est effectuée biologiquement.

Le bassin anoxique est créé par l'arrêt des aérateurs certains temps (ce procédé est appliqué dans l'été).

I.5.7. La décantation (clarification)

L'objectif de décantation et de recirculation des boues

La décantation permet la séparation solide-liquide (les boues activées de l'eau épurée).

Le test de décantation (V_{30}) et l'indice de MOHLMAN (I_M)

La procédure consiste à déterminer la concentration en MES et la décantabilité des boues en utilisant une éprouvette de 1000 ml, ce volume prélevé dans le bassin d'aération (compartiment dernière à la sortie) laisse décanter la boue pendant 30 minutes.

Les caractéristiques techniques d'ouvrage

a) Les décanteurs :

- Nombre : 4.
- L'indice de MOHLMAN : 150 ml/g.
- Diamètre intérieur : 30 m.
- Diamètre de tambour central : 3 m.
- Surface de décantation : 717 m².
- Hauteur d'eau moyenne : 3,68 m.
- Volume : 2200 m³.
- Inclinaison de fond : 1/12 mm.



Photo I.18 : Le bassin d'épaississement (épaisseur)

Après cette étape on met les boues dans les lits de séchage

Pour utiliser ces boues comme des engrais on doit les conservées pendant une année

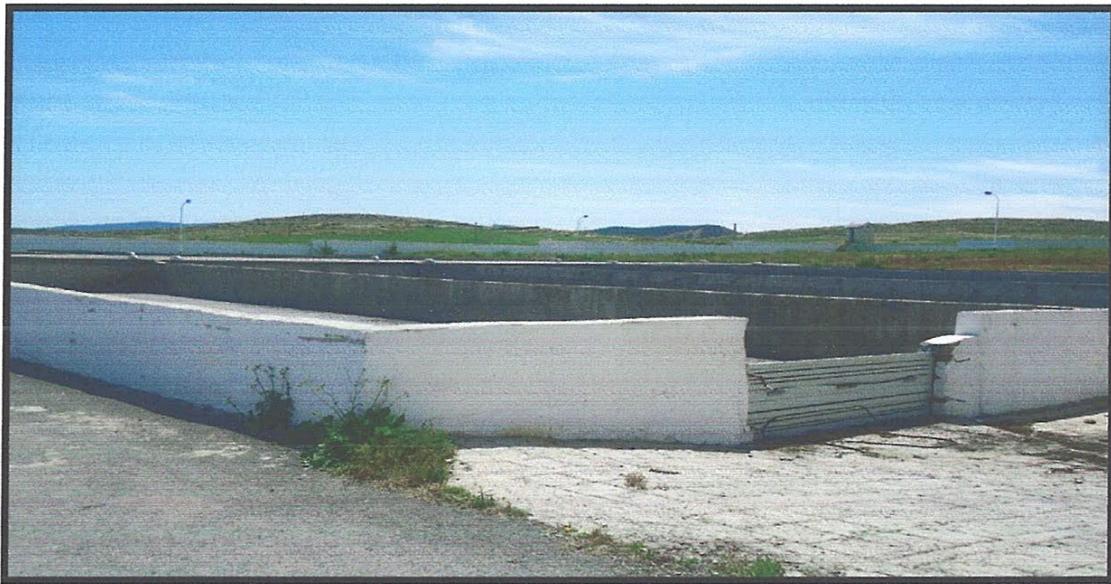


Photo I.19 : Les lits de séchage



Conclusion

Le Rôle d'une station donc, est de rendre propre l'eau que nous salissons, et comme ça, nous contribuerons à la protection de notre environnement, qui est la mission principale de l'ONA et le devoir de tout un chacun

CHAPITRE II

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE



INTRODUCTION

Le terme de pollution désigne l'ensemble des rejets de composés toxiques que l'homme libère dans l'écosphère, mais aussi les substances qui, sans être vraiment dangereuses pour les organismes vivants, exercent une influence perturbatrice sur l'environnement.

Polluer signifie étymologiquement profaner, souiller, salir, dégrader.

Parmi les définitions données, nous retiendrons la suivante :

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

II.1. La Pollution de l'eau

La distinction entre eau polluée et eau non polluée est souvent relative et dépend des exigences d'utilisation. Les experts assimilaient la pollution à *“une composition ou à un état directement ou indirectement modifiés du fait de l'activité de l'homme de telle façon que cela se traduit par une moindre utilisation de l'eau”.*

Cette définition met bien en évidence la responsabilité humaine dans la pollution des eaux et les inconvénients qui en résultent.



II. 2. L'épuration

Epurer les eaux usées, c'est dans la mesure du possible, éviter au milieu extérieur de subir des conséquences néfastes de l'activité humaine. L'homme doit remettre en circuit les molécules qu'il fabrique à son propre usage; molécules qui dans un premier temps ont été conçue pour résister au plus possible "d'agents naturels" comme les teintures, lessives, pesticides, et autres. Tous ces produits se trouvent, peu ou prou, dans les eaux usées, sont alors confiés au spécialiste de l'épuration qui est sommé de les faire disparaître, en prenant a son compte une série de paramètres physico-chimiques tel que: le débit, température, pH, conductivité, DBO₅, DCO, azote, phosphore, et autres. L'épuration des eaux usées consiste, en premier lieu, de séparer des eaux résiduaires tout ce qui peut précipiter avec ou sans traitement et d'oxyder des matières réductrices en solution, sous réserve parfois du cas particulier des matières azotées. En deuxième lieu, cela consiste à épurer ce qui a été précipité sous forme de boues de manière à rendre le résidu apte à une mise en dépôt, ou à un usage extérieure: c'est le traitement des boues.

II. 3. Les différents types des eaux usées

L'urbanisation actuelle se traduit par une forte concentration d'êtres vivants avec adduction d'eau et implantation d'entreprises agricoles et industrielles.

De nombreuses substances sont déversées dans les eaux utilisées qui deviennent des eaux usées. Ces dernières doivent être éliminées de l'environnement urbain.

La pollution des eaux usées est produite par des matières minérales et organiques, indésirables ou toxiques qui sont en suspension, en solution, en émulsion.

Les matières en suspension qui produisent un trouble (la turbidité) Ce sont:

- des matières minérales : sables, argiles, particules solides insolubles;
- des matières organiques : débris organiques divers, organismes et micro-organismes.

Les matières en solution et émulsion sont:

- des sels de métaux (dont métaux lourds);
- des composés organiques: détergents, solvants, pesticides, matières grasses, hydrocarbures...



La charge polluante est importante dans les eaux usées, mais également dans les eaux de ruissellement en ville (entraînement des débris de pneus et des hydrocarbures sur les chaussées, des débris accumulés sur les toitures...) La pollution induite est de trois types:

- Pollution physique: élévation de température;
- Pollution chimique: composés chimiques indésirables;
- Pollution bactériologique: coliformes et streptocoques fécaux, micro-organismes pathogènes variés (dont virus).

Il faut donc traiter ces eaux pour lutter contre la pollution des milieux naturels où elles sont déversées.

II. 3.1. Les eaux usées domestique

On inclut dans cette catégorie, les eaux ménagères (lavage corporal et du linge, eaux de cuisine... etc), les eaux de vanne chargées de fèces et d'urines, les eaux de lavage de voirie, et eaux pluviales. Les eaux industrialisation de la municipalité de raccordement au réseau d'égout de la ville. Le tableau II.1 résumé les caractéristiques moyennes d'un rejet domestique.



Tableau II.1 : Caractéristiques moyennes d'un rejet domestique.

Paramètres	Maximale	Moyenne	Minimale
Ph	7.5	7.2	6.8
Matières décantables (mg/l)	6.1	3.3	1.8
Matières solide totales (mg/l)	640	453	322
Matières volatiles totales (mg/l)	388	217	118
MES (mg/l)	258	145	83
Matières volatiles en suspension (mg/l)	208	120	62
DCO (mg de O₂/l)	436	288	159
DBO₅ (mg de O₂/l)	276	147	75
Chlorure (mg/l)	45	35	25

II. 3.2. Les eaux pluviales

Ce sont des eaux de ruissellement qui se forment après une précipitation. De plus, les nombreuses surfaces imperméables (routes, toitures) des villes empêchent l'infiltration des précipitations. Ces eaux de ruissellement ou eaux pluviales doivent également être éliminées.

Les eaux de pluie s'écoulant dans les réseaux unitaires préviennent du ruissellement accompagnant et suivant les précipitations. Elles peuvent être particulièrement polluées. Sur tout en début de pluie, par deux mécanismes:

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

Les eaux de ruissellement emportent des substances nocives comme des sels de déglçage, des métaux lourds, des huiles, des excréments d'animaux, des sédiments excédentaires, des pesticides, des engrais et des résidus de végétation.



II. 3.3. Les eaux industrielles

Il est difficile de faire une classification complète de ces eaux en raison: Des différences importantes qui existent dans les rejets d'établissement industriels de même branche d'activité (dilutions, volume des pollutions... etc.) et de diversité des activités industrielles.

La qualité de pollution est par fois très importante, elle peut être organique, minérale ou toxique selon l'activité de l'industrie. Chaque procédé industriel concédé est caractéristique et il émet le plus souvent un effluent contenant des matières brutes, des produits intermédiaires, des produits finis et des sous-produits particuliers.

II. 3.4. Les matières de vidange

Appartenant essentiellement aux rejets de toilettes chargés de diverses matières organiques azotées, et germes pathogènes. Les matières de vidange; l'évacuation et le traitement de ces matières de vidange font partie de l'assainissement. Leur traitement, simultanément à celui des eaux usées, peut être envisagé, à condition que la station d'épuration comporte une fosse de réception de ces matières qui alimente progressivement la station d'épuration pour éviter de surcharger le système de traitement des eaux usées .

II. 4. L'application des eaux usées épurées

Les eaux d'irrigation, y compris les eaux usées traitées, peuvent être appliquées de cinq façons différentes:

- a) par submersion (irrigation au calant):** la surface est presque entièrement recouverte d'eau,
- b) par infiltration:** une partie seulement de la surface est recouverte d'eau.
- c) par aspersion:** le sol et les cultures sont arrosés à peu près de la même façon que par la pluie.
- d) par irrigation souterraine:** la surface est à peine arrosée, mais le sous-sol est saturé, et
- e) par irrigation localisée (goutte à goutte):** l'eau est appliquée à la racine de chaque plante, avec un débit variable.



**Tableau II.2 : Les caractéristiques moyennes des eaux usées domestiques ;
Concentrations moyennes des polluants.**

Paramètres	Echelle de variation	Fraction décantable
pH	5.5 à 8.5	
MES totales (mg/l)	100 à 400	50 à 60%
DBO ₅ (mg/l)	150 à 500	25 à 30%
DCO (mg/l)	300 à 1000	30%
NTK (mg/l)	30 à 100	< 10%
N-NH ₄ ⁺ (mg/l)	20 à 80	0%
N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	< 1	0%
N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	< 1	0%
Détergents (mg/l)	6 à 13	
P total (mg/l)	10 à 25	10%

II.6. Mesure de la pollution

II.6.1. Prise d'échantillon

L'évaluation des caractéristiques de pollution se fait sur des échantillons qui ont été correctement prélevés. Les analyses du laboratoire n'ont guère de valeur si l'échantillon n'est pas vraiment représentatif des conditions ou de la qualité existant réellement dans la pratique.

En matière d'eaux usées, les difficultés sont accrues car le débit et la composition instantanée varient dans de grandes proportions. Pour cela, il est important de réaliser des échantillons moyens sur 24h, asservis au débit pour déterminer le flux journalier de pollution.



II.6.2. Mesure de débits

Faibles débits : 0 à 25 m³/h : méthode utilisant une capacité étalonnée et un chronomètre.

Débits moyens : 25 à 400 m³/h : déversoirs en parois minces, triangulaires ou rectangulaires.

Au-delà de 700 m³/h : moulinets dans portion de canal calibré.

II.6.3. les normes de mesure de pollution

Méthode normalisée :

- **DBO5** : norme NF T 90-103
- **DCO** : norme NF T 90-101
- **MES** : norme NF T 90-105 (2)
- : norme NF EN 872
- **NTK** : (azote Kjeldahl) qui correspond à la somme de l'azote sous forme ammoniacale et organique, norme EN 25663
- **NH4** : norme NF T 90-015
- **NO3** : norme NF T 90-045
- **PT** : norme NF EN 1189

À côté de ces méthodes normalisées, il existe des **méthodes « rapides »** réalisées sur des volumes d'échantillons réduits et qui font souvent appel, en final, à une mesure par colorimétrie. Ces analyses rapides sont proposées par Hach, Merck, Hydrocure...

II.7. Notion d'équivalent habitant

L'équivalent habitant (**éq.h**) correspond à la quantité de pollution rejetée par un habitant quotidiennement.

L'arrêté du **10 décembre 1991** définit les quantités journalières suivantes pour chaque habitant :

- **90 g** de matières en suspension ;
- **57 g** de matières oxydables ;
- **15 g** de NTK ;
- **4 g** de phosphore total.



Les matières oxydables (**MO**) correspondent à une moyenne pondérée de la **DCO** et de la **DBO₅**, mesurées après une décantation de **2 h**, suivant la formule :

$$MO = \frac{DCO + 2 DBO_5}{3}$$

II.8. Qu'est ce qu'une station d'épuration (STEP) ?

Une station d'épuration (**STEP**) est un ensemble d'installations et procédés où sont dirigées les eaux usées pour éliminer les différents polluants. Le traitement biologique est le plus utilisé pour des stations de taille moyenne à importante (plus de **2000** équivalents habitant). Cette filière est schématisée sur la Figure II.1.

Ainsi, d'abord, on sépare les matières grossières des eaux par dégrillage, puis on fait un dessablage et déshuilage-dégraissage dans un bassin où les sables décantent et les graisses sont séparées par flottation.

L'ensemble des deux dernières opérations (**nommés prétraitements**) produit des déchets dont on ne parlera pas dans ce travail. Il y a ensuite parfois une décantation primaire qui génère une boue dite « **primaire** » (particules de taille supérieure à 200 microns) qui compte pour **50-70%** des **MES** des eaux usées.

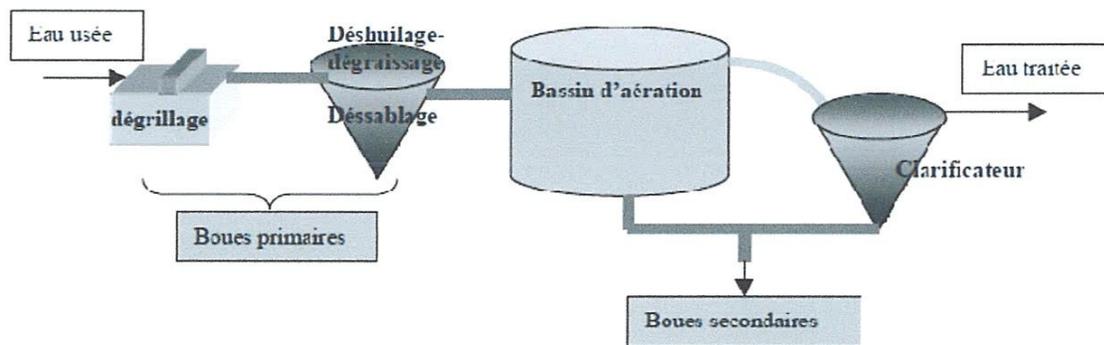


Figure II.1. Représentation schématique du procédé de production des boues primaires et secondaires (STEP type boues activées)



INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est de donner des connaissances principales et l'histoire de l'électrocoagulation ; il décrit le principe de ce procédé, la comparaison de différentes électrodes. Enfin on a rappelé les principes physico-chimiques de base de la coagulation-floculation chimique et la comparaison de cette dernière avec l'électrocoagulation.

III.1. Historique du procédé

L'électrocoagulation (EC) est une technique de traitement développée avant le 20ème siècle. Un pilote a été construit à Londres en 1889 pour traiter de l'eau de mer par électrolyse. Une demande de licence a été déposée par A.E. Dietrich en 1906 pour le traitement des eaux usées de manufactures.

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

En 1940, un « coagulateur électronique » qui consistait à faire dissoudre une anode en aluminium pour ensuite former avec les hydroxydes produits à la cathode, des hydroxydes d'aluminium qui flocculent et coagulent en entraînant les matières en suspensions et purifient l'eau.

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

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



Tableau III.1: Historique des applications du procédé d'électrocoagulation

Date	Auteurs	Types d'électrodes	Applications
1909	Harries	Al + Fe + sel de cuivre	Eaux usées urbaines
1947	Bonilla	Al	
1956	Holden	Al	Eau de surface
1970	Sadek	Al+Fe	Eau riche en phosphates
1974	Beck et al		Effluents de l'industrie agroalimentaire
1984	Vik et al	Al	Eau très chargée en substances humiques
1985	Pazenko et al	Al+Fe	Emulsions d'huiles
1988	Rcnk		Eau riche en sable bitumeux et schiste pétrolifère
1989	Ryan et al		Suspension d'argile
1992	Shen et al		Eau de teinture et d'impression
1996	Lin et al	Al	Effluents de l'industrie textile
2000	Chen et al	Al	Rejets liquides des industries de restauration
2002	Abuzaid et al		Eau riche en dérivés des nitrates
2003	Shen et al	Al	Eau industrielle chargée en fluors

III.2.Principes de l'EC

L'électrocoagulation est une méthode de traitement des eaux basée sur la dissolution électrochimique d'un métal sacrificiel qui, une fois dans l'effluent et moyennant les autres réactions connexes telle que l'électrolyse de l'eau, donne des complexes d'hydroxydes métalliques qui vont assurer l'adsorption puis la floculation des particules et des composés polluants dissous.

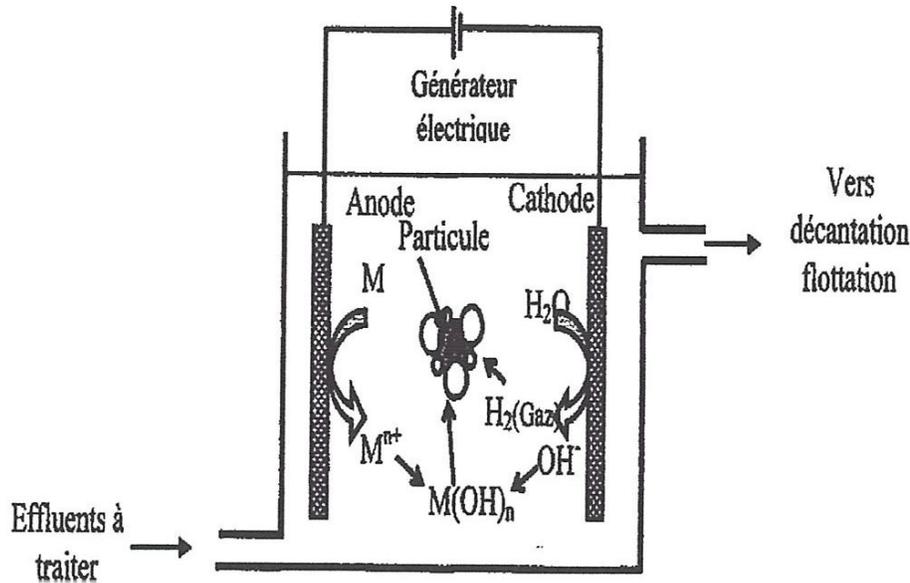


Figure III.1 : Schéma du principe de l'électrocoagulation-électroflotation

La séparation de la masse aqueuse est réalisée par flottation ou par décantation.

Ce processus résume comme suit.

- a) La formation des coagulants par l'oxydation électrolytique de métaux sacrificiels
- b) La déstabilisation des contaminants, des polluants, des matières en suspension et la cassure des émulsions
- c) L'agrégation des phases déstabilisées pour former les flocs.

Cette dernière étape peut être résumée par les sous étapes suivantes :

- Présence forte de la double couche diffuse autour des espèces chargées obtenues grâce aux interactions des ions métalliques provenant de la dissolution de l'anode sacrificielle;
- Neutralisation des espèces ioniques présentes dans l'eau par les cations ;
- Formation de flocs comme le résultat de l'agglomération des particules et des colloïdes autour des espèces coagulées.

Le procédé d'électrocoagulation peut être utilisé seul ou en série avec d'autres procédés dans une chaîne de traitement des eaux.



III.3. Les différents matériaux utilisés pour les électrodes

Les électrodes les plus couramment utilisées sont celles en *fer* et en *aluminium*. Cependant des essais ont été conduits sur d'autres types d'électrodes.

Le tableau suivant illustre quelques couples d'anode/cathode qui sont utilisés en électrocoagulation.

Tableau III.2: Matériaux d'électrodes utilisés en EC

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



L'effluent passe à l'intérieur d'une cellule formée d'un ou plusieurs couples d'électrodes entre lesquelles est appliqué un courant continu. Les principales réactions à l'intérieur de la cellule sont des réactions électrochimiques.

A l'anode, lieu d'oxydation, le métal va passer de l'état solide à l'état ionique selon la réaction:



Suivant la nature du métal, on peut avoir l'une ou l'autre des réactions suivantes :



Du fait du potentiel standard très négatif du couple Al/Al^{3+} , l'aluminium réagit avec l'eau en présence d'anions tels que les chlorures.



A la cathode, lieu de réduction, le solvant, en l'occurrence l'eau, se réduit suivant la réaction :



Les cations métalliques forment des complexes avec les ions hydroxydes. L'espèce majoritaire dépend du pH du milieu. Dans le cas de l'aluminium, on trouve une multitude de complexes anioniques et cationiques (Murugunathan *et al.* 2004):

- Les mono complexes tel que $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)_2^{+}$, $Al(OH)_4^{-}$
- Les polycomplexes tel que $Al_2(OH)_4^{2+}$, $Al_2(OH)_5^{+}$, $Al_6(OH)_{15}^{3+}$, $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$
- Les espèces amorphes et très peu solubles tel que $Al(OH)_3$, Al_2O_3

Les complexes s'adsorbent sur les particules et annulent aussi leurs charges colloïdales, ce qui conduit à déstabiliser l'émulsion. Cela se passe de cette manière dans le cas de la coagulation chimique. On note les différences au niveau de la source de coagulant chimique et électrochimique et au niveau de la présence du champ électrique dans le cas de l'électrocoagulation qui facilite la migration des espèces.



A la cathode, la réduction de l'eau conduit à la formation d'hydrogène dont le dégagement permet la flottation des particules floculées. La taille des microbulles est assez faible et estimée entre 20 et 30 micromètres. Ces bulles empêchent ou réduisent la formation des dépôts sur la cathode et donc augmentent le rendement de l'EC quel que soit le type d'électrode utilisé.

Dans le cas des électrodes en fer, l'oxydation de l'eau à l'anode par la formation d'oxygène contribue à oxyder les ions ferreux en ferriques pour rendre efficace la flottation .

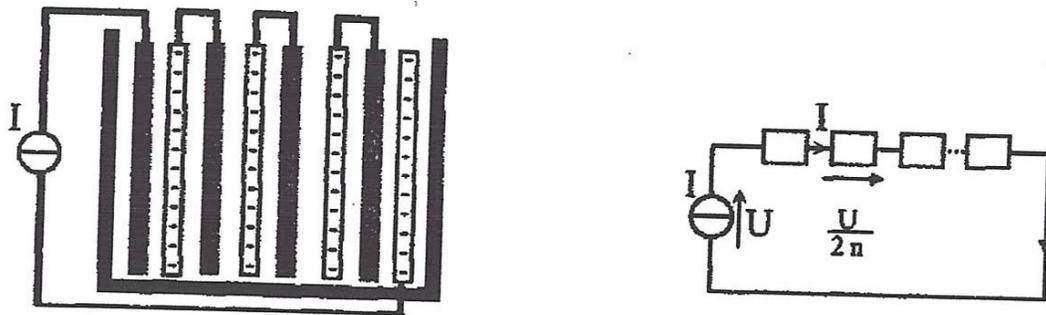
Le rendement faradique très supérieur à l'unité lorsque les électrodes d'aluminium sont utilisées peut s'expliquer par l'oxydation chimique de l'aluminium par les ions OH^- produits selon (Khemis, 2005) ou bien par la présence de Cl^- qui réduit la passivation de l'aluminium (Khemis, 2005).

III.4. Les différents types d'électrodes et de connexions électriques

Plusieurs technologies d'électrocoagulation existent. Les cellules électrochimiques peuvent être montées en série ou en parallèle seules ou associées à d'autres types de procédés tels que les méthodes biologiques, les filtres presses, des décanteurs ou d'autres méthodes physiques de traitement.

Au laboratoire ou en industrie, on trouve diverses géométries de plaques telles que les plaques planes, cylindriques, des lits fixes de billes sphériques, et des électrodes rotatives. Les électrodes planes offrent un montage et un nettoyage faciles des plaques surtout lorsque la dimension du réacteur atteint une certaine taille.

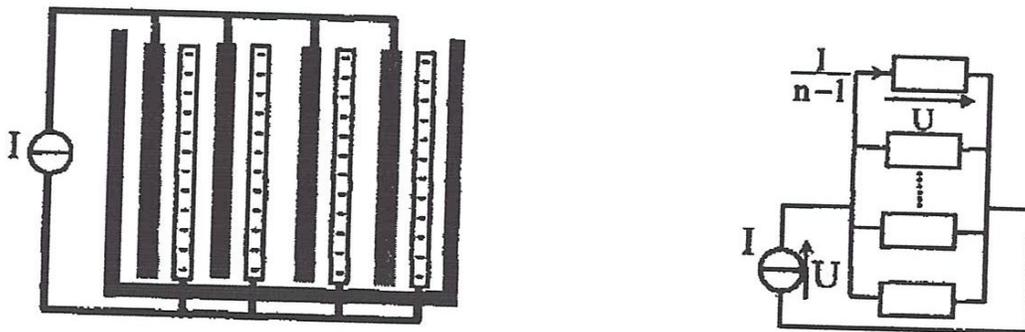
On distingue trois modes de connexion électrique : (a) *le mode monopolaire en série*, (b) *le mode bipolaire série*, (c) *le mode monopolaire en parallèle*.



(a): Connexion mono polaire en série et équivalent électrique.



(b): Connexion bipolaire et équivalent électrique.



(c): Connexion monopolaire en parallèle et équivalent électrique.

Figure III.2 : Connexion électrique des cellules d'électrocoagulation.



La différence entre les trois modes se trouve dans la connexion entre les électrodes qui entraîne une différence des expressions des tensions et des intensités de courant dans les cellules.

1. La connexion monopolaire en série montre que l'utilisation de n électrodes présentent $n/2$ résistances (chacune définie par l'ensemble anode, électrolyte et cathode) en série. Si le générateur fournit une tension U et une intensité I , chaque résistance traversée par un courant I est soumise à une tension $\frac{U}{2n}$

2. Le mode bipolaire présente des caractéristiques électriques proche de celles du monopolaire en série. Le même courant I passe à travers les résistances qui sont soumises à la tension. $\frac{U}{n-1}$

On remarque toutefois une différence dans le nombre de résistances. Pour n électrodes, le mode bipolaire présente $(n-1)$ résistances.

3. Pour le mode monopolaire en parallèle, n électrodes présentent $(n-1)$ résistances qui sont reliées en parallèle. Si le générateur fournit une tension U et une intensité I , les cellules sont soumises à la même tension U . L'intensité passant à travers chaque résistance vaut $\frac{I}{n-1}$

III.5.Principales lois de l'électrolyse

Le procédé d'électrocoagulation met en œuvre plusieurs types de phénomènes tels que les réactions chimiques inter-ioniques, les réactions électrochimiques d'oxydoréduction, les phénomènes physiques de transfert de charge à l'interface électrode solution, les adsorptions physiques ou chimiques entre hydroxydes et polluants et adsorption chimique entre les ions métalliques et la pollution, l'hydrodynamique dans l'espace inter électrodes, les interactions gaz-liquide plus précisément entre les gaz produits et la solution.

La compréhension de tous ces phénomènes est indispensable pour la maîtrise et l'optimisation du procédé. Cela se fait par la maîtrise d'un certain nombre de lois :

- Cinétique de transfert de charge ou loi de Butler-Volmer
- La loi de Faraday
- L'expression de la tension de cellule



- Energie consommée et rendements d'électrolyse

III.5.1. La cinétique de transfert de charge ou loi de Butler-Volmer

La cinétique de transfert de charge et de matière qui se produit à l'interface électrode-solution régit les courbes courant-potentiel. On distingue essentiellement dans la réaction, le transfert de l'espèce A du sein de la solution vers la surface d'électrode, l'adsorption chimique ou physique de A selon sa nature à la surface de l'électrode, le transfert de charge entre la surface et l'espèce adsorbée conduisant à la formation de B, la désorption de l'espèce B et le transfert de l'espèce B depuis la surface vers l'électrolyte. La figure III.3 illustre les étapes de transfert de matière dans une cellule électrochimique.

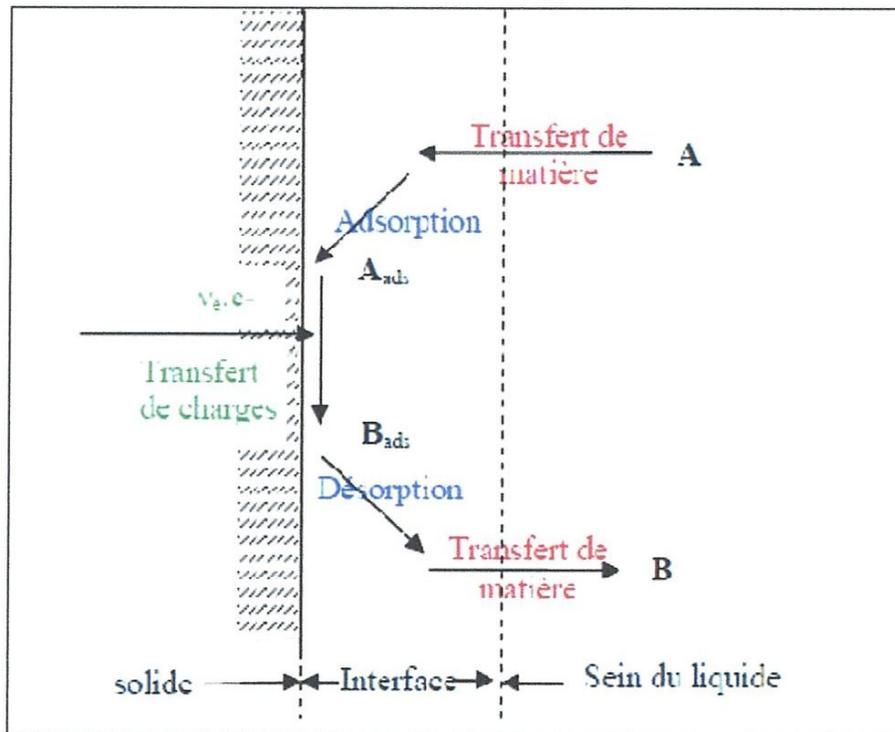


Figure III.3 : Les étapes de transfert de matière dans une cellule électrochimique (Khemis, 2005)

L'équation de Butler-Volmer donne la variation de la densité de courant en fonction de la surtension en absence de limitation par le transfert de matière et dans le cas d'une réaction réversible. Sa formule est donnée par la relation (III-1) :



$$i = i_0 \left[\exp \left(a \cdot \frac{v_e \cdot F}{RT} \right) - \exp \left(-(1 - a) \cdot \frac{v_e \cdot F}{RT} \right) \right] \quad (\text{III-1})$$

Où i_0 , la densité de courant d'échange est donnée, selon cette théorie, par :

$$i_0 = nFk^0 (C_{Red}^0)^a (C_{Ox}^0)^{1-a} \quad (\text{III-2})$$

Où k^0 est le coefficient de transfert de charge.

La relation (III-1) peut être simplifiée dans les cas suivants :

- a. A faible valeur de surtension au voisinage de l'équilibre thermodynamique, la densité de courant est exprimée par une relation linéaire simple :

$$i = i_0 \cdot \frac{v_e \cdot F}{RT} \cdot \eta \quad (\text{III-3})$$

- a. A forte valeur absolue de surtension, l'expression de la densité de courant s'exprime par :

$$\text{➤ Pour l'anode : } i = i_0 \exp \left(a \cdot \frac{v_e \cdot F}{RT} \cdot n a \right) \quad (\text{III-4})$$

$$\text{➤ Pour la cathode : } i = -i_0 \cdot \exp \left(-(1 - a) \cdot \frac{v_e \cdot F}{RT} n c \right) \quad (\text{III-5})$$

$$\text{La surtension s'exprime par la relation de Tafel : } \eta = a + b \ln|i| \quad (\text{III-6})$$

III.5.2. La loi de Faraday

La quantité de matière produite ou consommée lors d'une réaction électrochimique se calcule par la loi de Faraday et est fonction de la durée de l'opération Δt et de l'intensité du courant I .

$$m = \frac{I \cdot \Delta t \cdot M}{v_e \cdot F} \quad (\text{III-7})$$

Où M est la masse molaire de l'espèce considérée. Cette relation (III-7) suppose que les électrons échangés ont servi effectivement à la réaction considérée.



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

Soit la réaction suivante :



Le rendement faradique est donné par :

$$= \frac{\nu_e \cdot F \cdot m_B}{Q \cdot M_B} \quad (\text{III-9})$$

Avec Q, la charge électrique et m_B la masse de l'espèce B formée.

III.6.Exemples d'effluents traités par électrocoagulation

Un grand nombre de travaux fondamentaux ou plus appliqués ont été entrepris pour le traitement de nombreux effluents liquides. Le tableau III.3 en donne quelques exemples significatifs.



Les ions hydroxyles proviennent de l'électrolyse de l'eau ou de l'ajout d'une solution basique à l'effluent.

En ne considérant que les espèces mononucléaires, les réactions de l' Al^{3+} sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau III.4: Réactions de réduction d' Al^{3+}

Réactions	pk _i
$Al^{3+} + H_2O \leftrightarrow Al(OH)^{2+} + H^+$	5.03
$Al(OH)^{2+} + H_2O \leftrightarrow Al(OH)_2^+ + H^+$	3.7
$Al(OH)_2^+ + H_2O \leftrightarrow Al(OH)_3 + H^+$	6.5
$Al(OH)_3 + H_2O \leftrightarrow Al(OH)_4^- + H^+$	8.1

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, Al_2O_3 hydraté, Al_2O_3 anhydre et $Al(OH)_3$; les espèces ioniques Al^{3+} et AlO_2^- 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 (zone comprise entre les courbes a et b). Figure III.4

En présence de solutions très acides, l'aluminium décompose l'eau pour former de l'hydrogène en se dissolvant sous forme d'ions trivalents Al^{3+} ; Vargel (1999) estime que les principales réactions possibles dans l'eau sont :

En milieu acide : oxydation du métal et formation d'hydrogène



En milieux alcalins : l'aluminium décompose l'eau pour former de l'hydrogène et de l'aluminate AlO_2^-



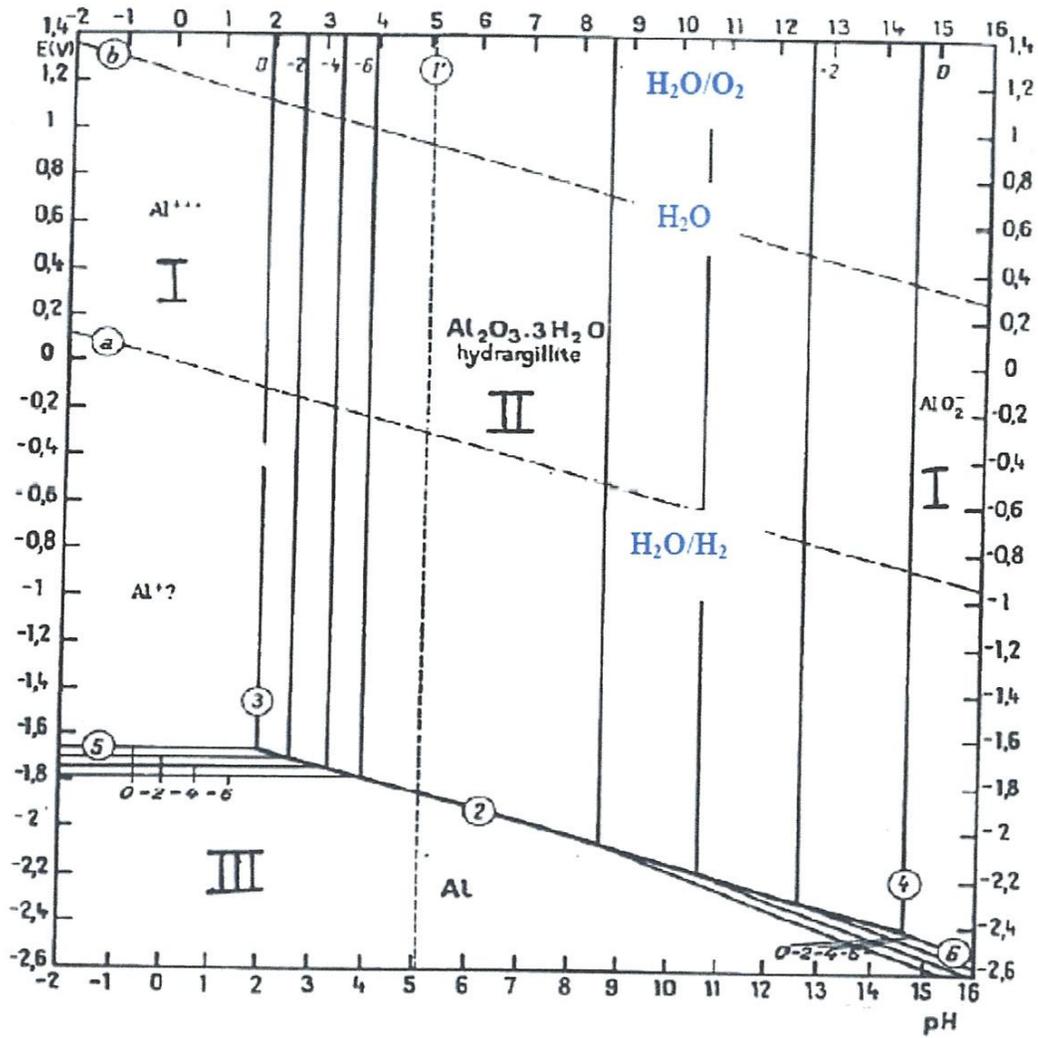


Figure III.4: Diagramme de Pourbaix de l'aluminium (Bensadok et al, 2007)

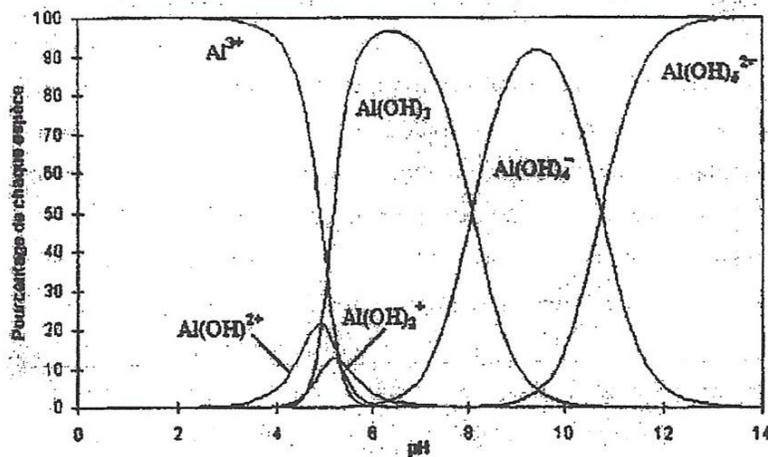


Figure III.5 : Diagramme de prédominance des espèces d'aluminium et effet de pH.



III.8. La coagulation chimique

La coagulation-floculation facilite l'élimination des MES (Matières En Suspension) et des colloïdes en les rassemblant sous forme de floccs dont la séparation s'effectue par décantation, flottation et/ou filtration.

La coagulation est la déstabilisation des particules colloïdales par addition d'un réactif chimique, le coagulant, qui apporte au milieu des cations multivalents, libres ou liés à une macromolécule organique. Ces cations sont attirés et adsorbés sur la couche de Stern. Le potentiel zêta s'annule ou avoisine le zéro avec la neutralisation de toutes les charges avoisinantes. Il faudra donc que le coagulant se disperse dans l'eau pour obtenir une répartition homogène avant toute précipitation d'hydroxyde.

Cela demande une forte agitation en un temps court ou, en d'autres termes, utiliser un gradient de vitesse très élevé.

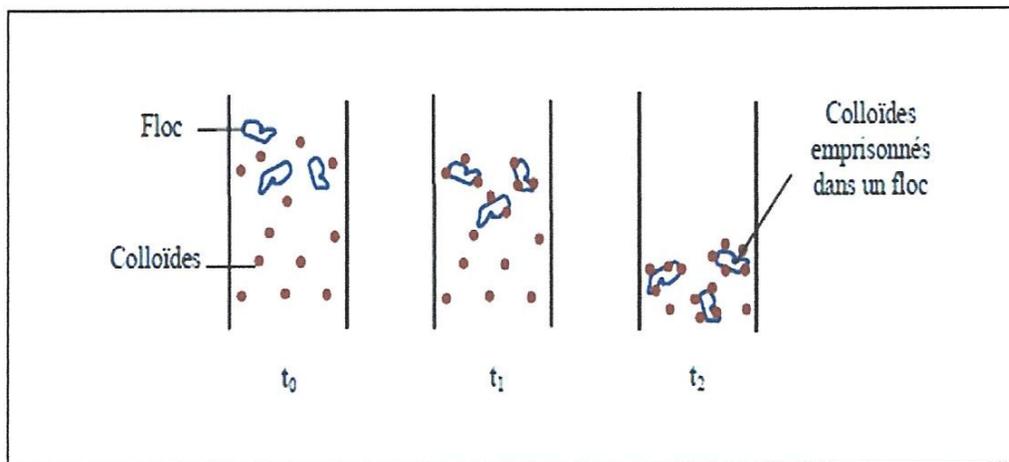


Figure III.6 : Emprisonnement des particules dans les floccs pendant la décantation (Bensadok, 2007)

Quand les particules préalablement déchargées s'agglomèrent en microflocs par partage, soit par les hydroxydes résultant de l'hydrolyse du coagulant minéral, soit par les macromolécules de polyélectrolytes cationiques, on parle de floculation. En effet les microflocs s'agrègent en floccs plus volumineux et décantent. Il arrive qu'un adjuvant de floculation soit ajouté.

L'agrégation successive des particules est régie par des phénomènes de transport de la floculation :



L'EC permet l'élimination de certains composés tels que le chrome (Zongo *et al.* 2009 ; Heidmann *et al.* 2007), les nitrites, les sulfures, les cyanures, les sulfites, et les ions fluor (Zuo *et al.* 2008).

Dans le cas d'huiles de coupe, l'abattement du COT est plus important en début de traitement avec la CC que l'EC mais à la fin, on obtient une meilleure efficacité avec l'EC (Khemis, 2005).

Le temps de traitement semble être plus contrôlable et réduit en EC qu'en CC.

La nécessité d'avoir un effluent conducteur commande l'ajout d'électrolyte NaCl.

L'utilisation de l'énergie électrique, assez coûteuse, et le coût des électrodes consommables constituent un désavantage pour le procédé d'EC.

Malgré les inconvénients de l'EC indiqués, on peut dire que, de nos jours, les bonnes raisons de son utilisation l'emportent sur le reste. En effet, avec la rigueur antipollution, les composés minéraux et les colorants sont facilement éliminables par l'EC.

Une autre de leur ressemblance est que les deux méthodes ont des efficacités équivalentes au même pH (Canizarès *et al.* 2008 ; 2009).

Par ailleurs l'EC et la CC ne permettent pas de séparer des solutions parfaitement miscibles comme les mélanges eaux-benzène ou eau-solvants oxygénés.

Conclusion

L'électrocoagulation est une méthode de traitement des eaux usées qui a montré beaucoup d'efficacité. Après avoir été délaissée pendant quelques années, elle reprend de l'importance à partir des années 90 comme le montrent les nombreuses publications sur cette technique. Cette technologie s'est bien adaptée pour le traitement primaire des effluents complexes pour lesquels les traitements biologiques ont montré leur limite.

CHAPITRE IV

PARTIE EXPERIMENTALE



Rappelons que cette étude a pour objectif l'évaluation de l'efficacité du traitement par l'électrocoagulation comme alternative au procédé conventionnel de coagulation chimique pour le traitement des eaux usées au niveau de STEP de la ville de Khenchela qui utilise le procédé de traitement par boues activées visant l'élimination simultanée de la pollution organique exprimée par l'abattement de la demande chimique en oxygène (DCO), la charge microbiologique de l'eau usée exprimée par l'abattement de la demande biologique en oxygène (DBO), les matières en suspensions (MES) et enfin la turbidité.

IV.1. Présentation du laboratoire de la S.T.E.P (Khenchela)

Le laboratoire de la STEP de KHENCHELA est équipé des certains instruments et appareils afin d'assurer le suivi des paramètres physico-chimiques nécessaire pour connaître la qualité de l'eau épurée et l'efficacité d'épuration.

Le tableau IV.1.représente quelques appareils que disposent le laboratoire ;

Tableau IV.1: Instruments et équipements de laboratoire

Nom	Marque	Référence	L'utilisation
Spectrophotomètre d'absorption moléculaire	HACH (LANGE)	DR 2800	Mesure la (MES, nitrates, nitrites, DCO,)
pH mètre	HACH	SENSION 3	Mesure l'alcalinité et l'acidité de l'eau
Oxymètre	HACH-HG10	SENSION 5	Mesure la concentration d'oxygène dissous
Conductimètre	HACH		Mesure la conductivité
Réacteur	WTW	CR 2200	Echauffement des solutions
Colorimètre	HACH	DR 1890	Mesure la DCO
DBO mètre	VTH OXYTOP	IS 6	Mesure la DBO ₅
Distillateur	-	-	Produire l'eau distillée
Microscope optique	-	-	Observation des micro-organismes
Four à moufle	-	-	La calcination



IV.2. Méthode d'échantillonnage des eaux usées

IV.2.1. Le préleveur automatique

Les préleveurs automatiques sont placés à l'entrée et à la sortie de la station d'épuration, et ils doivent respecter les critères d'implantation suivants :

- Le préleveur doit être positionné le plus proche possible du point de prélèvement.
- La hauteur d'aspiration doit être la plus faible possible, mais toujours positive (préleveur placé au-dessus de l'écoulement).
- Le tuyau de prélèvement doit présenter une pente toujours ascendante sans point bas au siphon.
- L'emploi d'une crépine est à proscrire le diamètre du tuyau sera compris entre 8 et 15 mm (vitesse comprise entre 0,5 et 0,8 m/s).
- Le préleveur doit être protégé des intempéries et à l'abri du soleil.

Remarque :

À l'absence d'un préleveur automatique le prélèvement est effectué au moyen de flacon ou récipient à l'aide d'une chaînette ou d'une corde manuellement.

Cette procédure est appliquée à l'ensemble des stations des épurations ne disposant pas des préleveurs automatiques.

IV.2.2. Les types d'échantillons

On distingue deux types d'échantillons :

➤ ***Échantillon ponctuel :***

Echantillon prélevé de façon manuelle ou automatique, ou l'ensemble du volume constituant l'échantillon est prélevé en une seule fois.

➤ ***Échantillon composite:***

Echantillon préparé par mélange de plusieurs échantillons ponctuels, ou par prélèvement d'une fraction continue de l'effluent résiduaire.



IV.2.3. Les conditions de prélèvement

Parmi les conditions essentielles on peut citer les suivantes :

- Utiliser des flacons propres.
- Rincer plusieurs fois les flacons avec l'eau prélevée.
- Identifier les flacons par étiquette (la date, l'heure, nom d'échantillon).
- Le transport des échantillons au moyen des glacières.
- L'échantillon composite doit être conservé dans le réfrigérateur à 4 C°.

Certains paramètres (pH, température, oxygène dissous, conductivité) sont déterminés par échantillon ponctuel et les paramètres (MES, DBO₅, DCO, NO₃⁻) sont déterminés par échantillon composite.

IV.3. Les paramètres mesurés (S.T.E.P Khenchela)

IV.3.1. Mesure la conductivité (méthode électrochimique)

Le but: détermination de la minéralisation de l'eau usée d'entrée et l'eau épurée de sortie de la station exprimée en $\mu\text{s}/\text{cm}$.

a) Matériels nécessaire :

- La conductimètre.
- Deux échantillons (eau d'entrée et eau de sortie).

b) Mode opératoire :

- Prend l'électrode de l'appareil et plonger le dans l'échantillon.
- Mélanger doucement par l'électrode puis lire le résultat.

IV.3.2. Mesure de l'oxygène dissous (méthode électrochimique)

Le but : détermination de la quantité d'oxygène dissous dans l'eau usée d'entrée et l'eau épurée de sortie de la station exprimée en mg/l.

a) Matériels nécessaire :

- L'oxy – mètre.

**b) Les réactifs :**

- Deux échantillons (eau d'entrée et eau de sortie).
- Une solution tampon.

c) Mode opératoire :

- Etalonner l'électrode de l'appareil par une solution tampon.
- Plonger l'électrode dans l'échantillon et mélanger doucement puis lire le résultat.

IV.3.3. Mesure de pH (méthode électrochimique)

Le but : détermination de l'alcalinité ou l'acidité de l'eau usée d'entrée et l'eau épurée de sortie à la station.

a) Matériels nécessaire :

- pH – mètre.

b) Les réactifs :

- Deux échantillons (eau d'entrée et eau de sortie).
- Une solution tampon.

c) Mode opératoire :

- Etalonner l'électrode de l'appareil par la solution tampon.
- Plonger l'électrode dans l'échantillon et mélanger doucement puis lire le résultat.

IV.3.4. Mesure des matières en suspension (méthode spectrophotométrie)

Le but : détermination de la quantité des matières en suspensions éliminée et la qualité de l'eau épurée exprimée en mg/l.

a) Matériels nécessaire :

- Le spectrophotomètre.
- 2 pipettes de 10 ml.
- 2 flacons de spectrophotomètre.

b) Les réactifs :

- Deux échantillons (eau usée d'entrée et eau épurée de sortie).



IV.3.6. Mesure de la DCO (méthode colorimétrique)

Le bute : détermination de la quantité d'oxygène exprimée en mg/l nécessaire pour l'oxydation de toutes les matières contenue dans l'eau usée quelques soit biodégradable ou non.

a) Matériels nécessaire :

- Le colorimètre.
- Le réacteur.
- 2 pipettes de 2 ml.
- Port tube.

b) Les réactifs :

- Deux échantillons (eau usée d'entrée et eau épurée de sortie).
- 2 tubes de bichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7 + H_2SO_4$), tube (1) C = 1500 mg/l et tube (2) C = 150 mg/l.

c) Mode opératoire :

- Prend les deux tubes de bichromate de potassium et verser 2 ml de l'eau d'entrée à l'aide d'une pipette propre dans le tube (1) (C = 1500 mg/l de $K_2Cr_2O_7 + H_2SO_4$) et 2 ml de l'eau de sortie dans le tube (2) (C = 150 mg/l de $K_2Cr_2O_7 + H_2SO_4$).
- Boucher et Agiter doucement les deux tubes et placer les deux tubes dans le réacteur (chauffer à 150 C° pendant 2 heures).
- Après 2 heures refroidir les deux tubes et lire les résultats par le colorimètre.

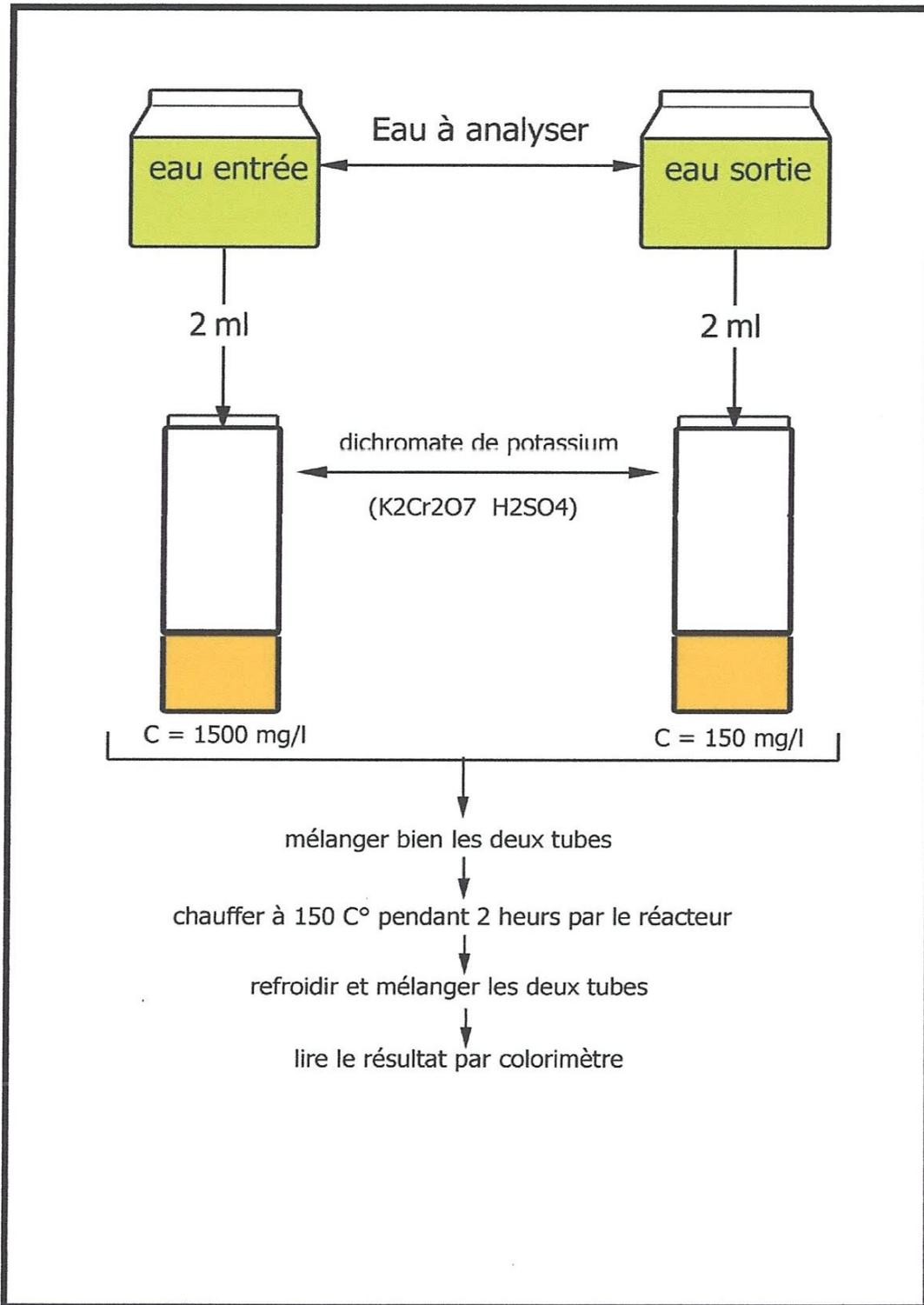


Figure IV.3 : mesure de DCO



IV.3.7. Mesure de la DBO₅ (méthode manométrique)

Le but : détermination de la quantité d'oxygène exprimée en mg/l consommé par les bactéries épuratrices pour la dégradation de la pollution organique dans les bassins biologiques pendant 5 jours.

a) Matériels nécessaire :

- DBO – mètre (2 flacon brun, 2 barreaux magnétique, 2 support de caoutchouc, 2 oxytop, agitateur magnétique, incubateur).
- 2 fioles jaugées de volume (432 ml et 164 ml).
- Entonnoir.

b) Les réactifs :

- Deux échantillons (eau usée entrée et eau épurée sortie).
- Inhibiteur (C₄H₈N₂S).
- NaOH sous forme comprimé.

c) Mode opératoire :

- Prend les deux échantillons et mesurer 164 ml de l'eau d'entrée et 432 ml de l'eau de sortie à l'aide de fiole jaugée, verser les deux volumes d'eau dans chaque flacon de DBO – mètre.
- Ajouter dans chaque flacon un barreau magnétique.
- Ajouter l'inhibiteur (C₄H₈N₂S), 3 gouttes dans le flacon de l'eau d'entrée et 9 gouttes dans le flacon de l'eau de sortie pour inhiber les bactéries nitrifiant.
- Mettre 2 comprimés de (NaOH) avec un support de caoutchouc à l'intérieur de chaque flacon pour capter le CO₂ produisez par les bactéries épuratrices.
- Boucher les deux flacons par l'oxytop et régler les deux oxytops à zéro (0-0).
- Placer les deux flacons sur l'agitateur magnétique dans l'incubation à 20 C° pendant 5 jours.
- Lire les résultats après 5 jours par l'oxytop.



Les valeurs de la température de l'effluent à l'entrée de la station sont très voisines ne dépassant pas $18.7C^{\circ}$, elles sont étroitement liées à la température de la saison, ces valeurs étant très acceptables, car le fonctionnement de certains ouvrages et la chaîne de traitement nécessite que l'effluent présente une température inférieure à $30C^{\circ}$.

Les valeurs de température de l'effluent à la sortie de la station sont très voisines variant entre $4.2C^{\circ}$ et $18.7C^{\circ}$, ce qui est conforme aux normes qui préconisent une température maximale $30C^{\circ}$.

b) le pH

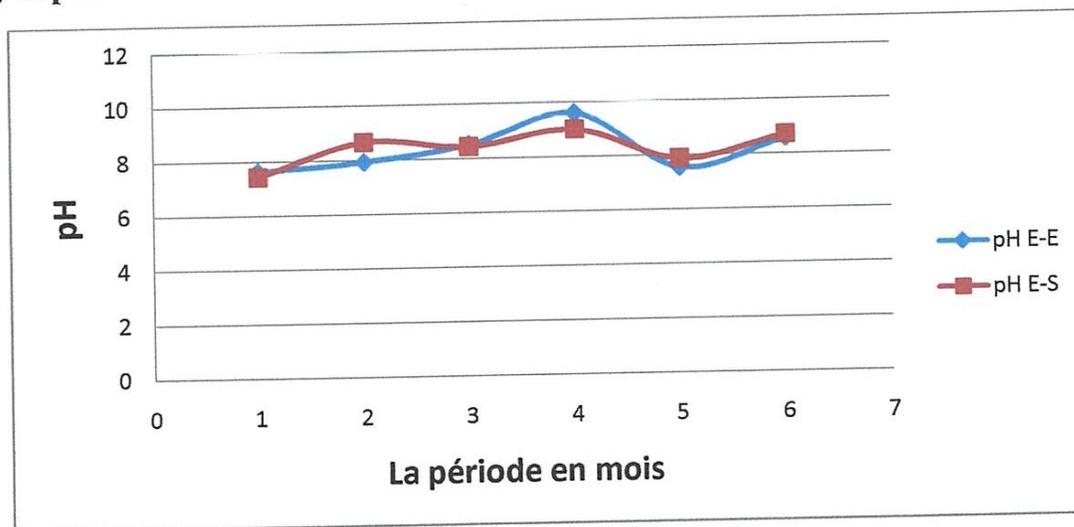


Figure IV.6 : les valeurs moyennes de pH (6 Mois)2011

Les eaux brutes à l'entrée de la station sont relativement basiques avec un **pH** maximum de **8,36** on constate une diminution progressive du **pH** de l'eau épurée, ceci est dû à des réactions chimiques et ou biologiques qui produisent des ions acides ou consomment des ions basiques, d'ailleurs les réactions de nitrification entraînent une acidification du milieu d'une part, par consommation des ions bicarbonates et d'autres part, par production d'ions H^+ , ce qui fait diminuer le **pH** jusqu'à atteindre des valeurs entre **7.43** et **9.6** à la sortie de l'eau épurée, ceci étant conforme aux normes de rejet dont les valeurs du pH doivent être comprises entre **5,5** et **8,5**



c) Les MES

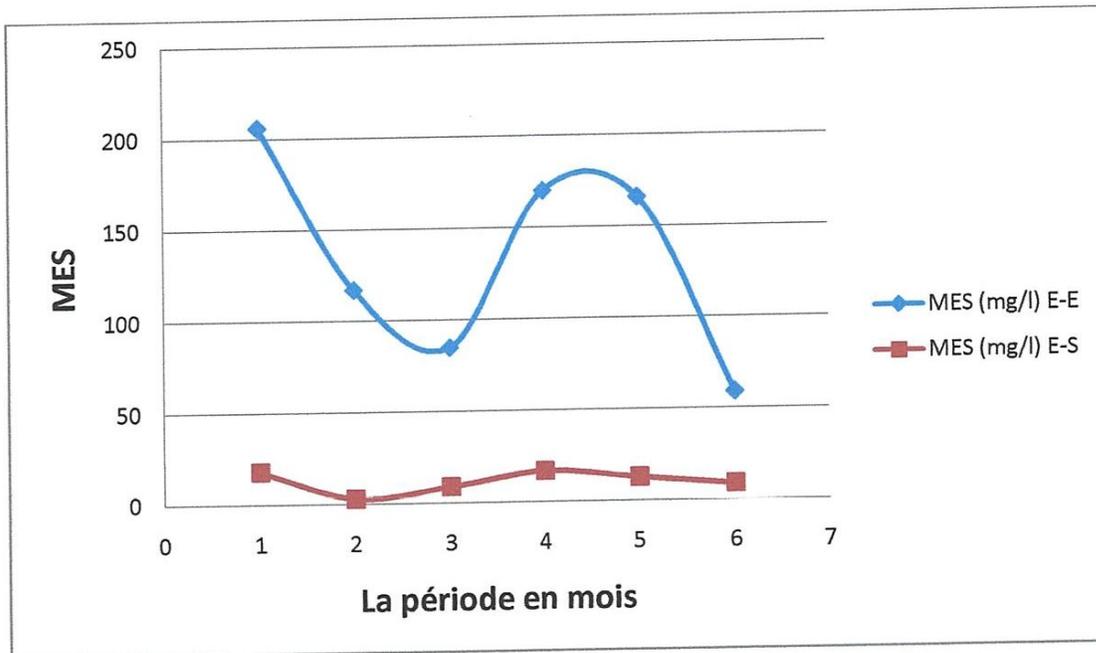


Figure IV.7 : les valeurs moyennes des MES (6 Mois)2011

Les valeurs des **MES** a l'entrée sont trop élevées et même doubles par rapport à ceux de référence pour dimensionnement de la **STEP (206 mg/l)**, mais malgré ce problème le résultat des analyses d'eaux de sortie (épurées) sont très bonnes et même dans les normes et cela explique le bon fonctionnement et l'état des ouvrages de la **STEP** (la bonne coagulation de la boue et bonne décantation).



d) La DCO

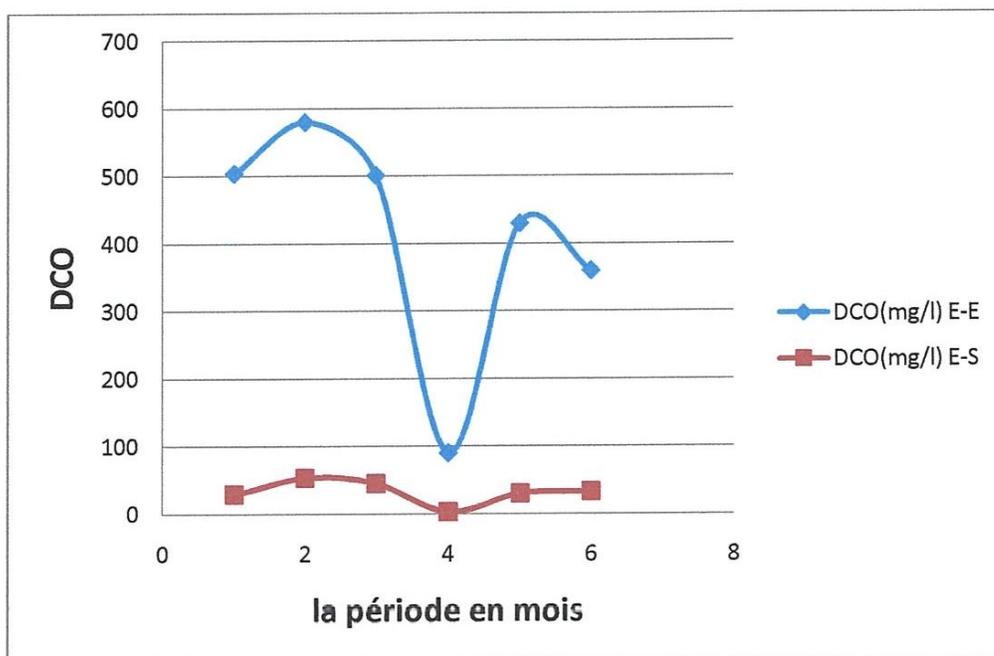


Figure IV.8 : les valeurs moyennes de la DCO (6 Mois)2011

La DCO de sortie de cette courbe est vraiment homogène, la DCO a diminuer jusqu'a une valeur de **3 mg/l** (mois de Janvier). Le rendement d'élimination de la DCO est élevé (**92.19%**).



e) La conductivité

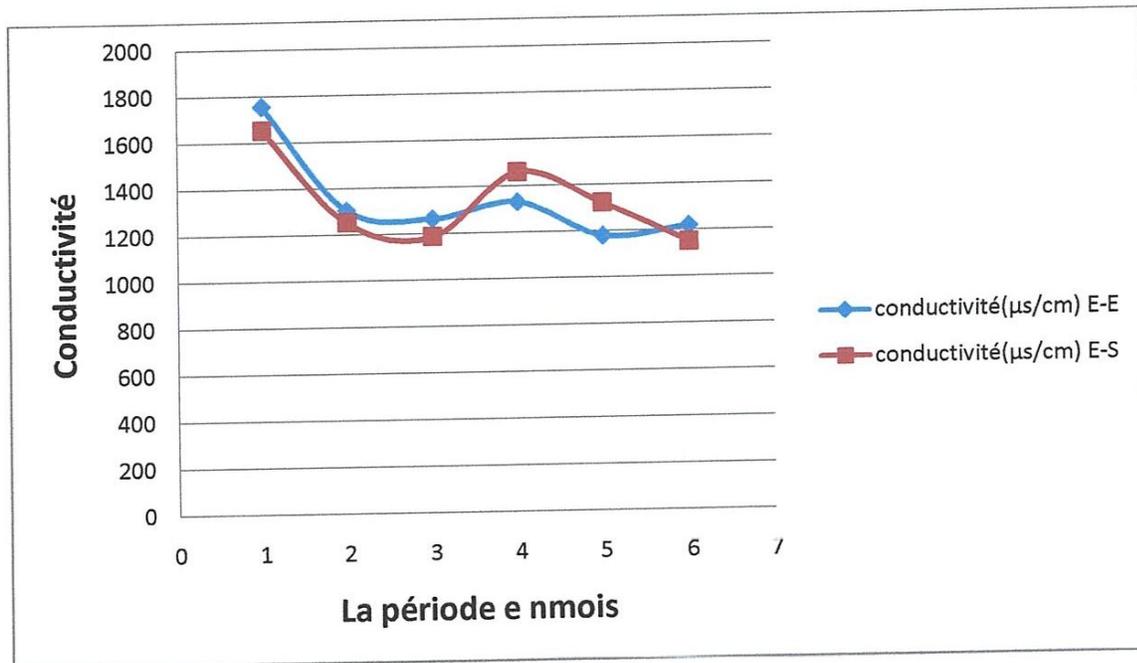


Figure IV.9 : les valeurs moyennes de la Conductivité (6 Mois)

Les valeurs de la conductivité n'ont pas une grande variation parce que les eaux usées contiennent une large gamme des ions qui ont la difficulté d'élimination.

Ces valeurs de conductivité ont un intervalle étroit compris entre **1150** et **1755 µs**.

IV.6.L'électrocoagulation

La technologie des procédés d'électrocoagulation étant très diverse, nous avons choisi de travailler avec un système simple, maniable et de volume réduit ; nous le présentons dans dispositif expérimental illustré par la photo IV.1. Il consiste en un réacteur électrochimique à plaques parallèles en alliage d'aluminium entre lesquelles nous avons appliqué une différence de potentiel à l'aide d'un générateur de courant continu (alimentation stabilisé). Un échantillonnage nous permet d'effectués plusieurs mesures de différents paramètres tel que ($T^{\circ}C$, pH, conductivité, turbidité, MES, DCO)



IV.6.1. Description du montage expérimental

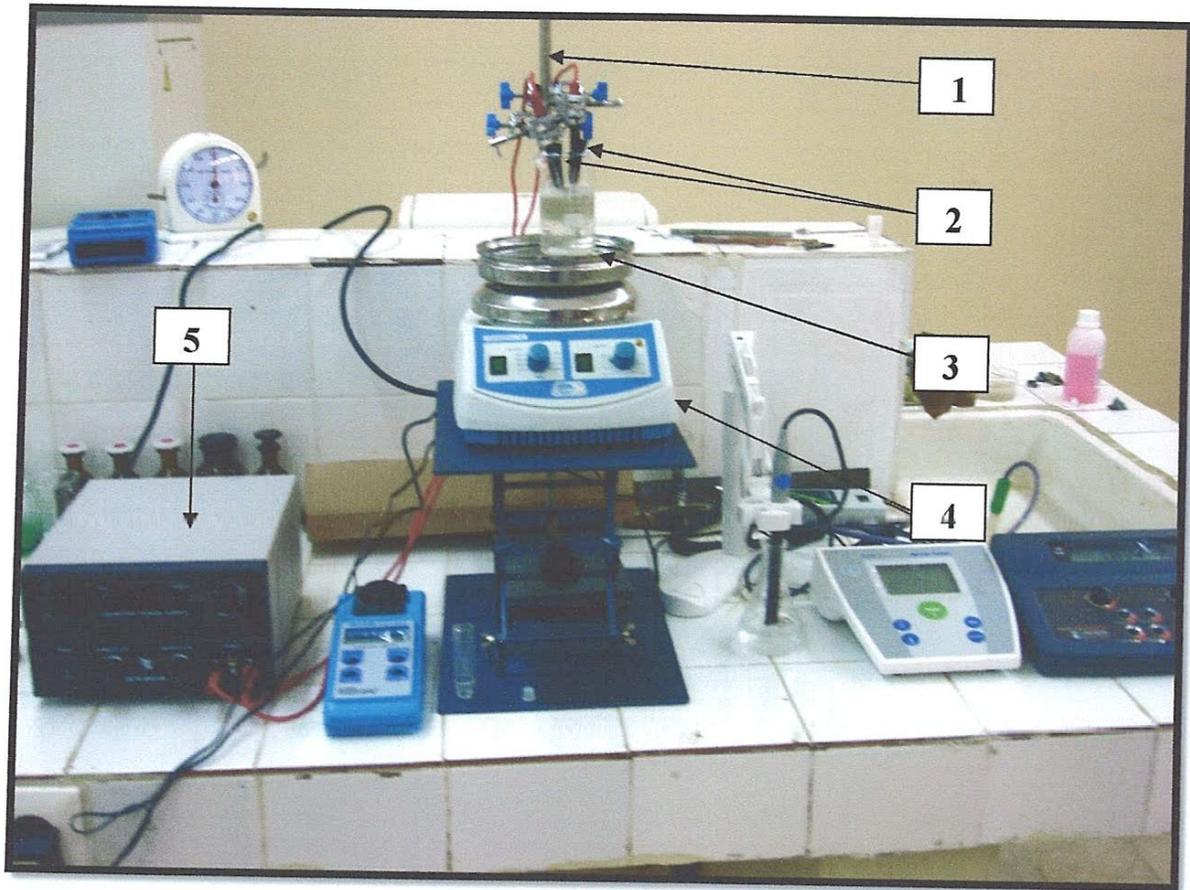


Photo IV.1. le dispositif expérimental d'électrocoagulation

Le dispositif expérimental qu'on a travaillé avec (d'après la photo en dessus) a une composition comme suit :

- 1-un statif support.
- 2-deux électrodes en aluminium (plaques parallèles).
- 3- Réacteur électrochimique (bécher 100ml).
- 4-agitateur magnétique.
- 5-générateur de courant continue (alimentation stabilisée).



IV.6.2. Le mode opératoire de l'EC

Dans le réacteur (bêcher 100ml) on introduit 98 g de l'échantillon a traité par l'électrocoagulation et complété le poids à 100 g par l'ajout d'une solution de NaCl de $10^{-2}M$.

On prépare plusieurs échantillons de la même façon.

On traite les échantillons sur l'intervalle de temps [5-30 min].

IV.6.3. Mesure des paramètres

Pendant les essais, un échantillonnage est effectué. Des échantillons de 20 ml sont prélevés à l'aide d'une pipette à intervalles réguliers de 5 minutes pendant toute la durée de l'essai.

IV.6.3.1. Suivi de température

La température est exprimée à l'aide d'un appareil de mesure multi paramètres. L'eau à analyser est introduite dans un bêcher qui a été plusieurs fois lavé avec de l'eau de robinet puis avec de l'eau distillée, la sonde de mesure de température est ensuite immergée dans le bêcher. La valeur obtenue de la température est exprimée en degré Celsius ($^{\circ}C$).

IV.6.3.2. Suivi de pH

La mesure de pH est effectuée à l'aide d'un pH- mètre de paillasse étalonné à la température ambiante grâce à la solution KCl. La mesure du pH se fait en plongeant la sonde dans l'eau à analyser. Les mesures sont alors affichés sur l'écran pH- mètre.

IV.6.3.3. Suivi de la conductivité électrique

Rincer plusieurs fois la cellule à conductivité avec de l'eau distillée puis la plonger dans un récipient contenant de l'eau à examiner; faire la mesure dans un deuxième récipient en prenant soin que les électrodes de platine soient complètement immergées.



Agiter le liquide (barreau magnétique) afin que la concentration ionique entre les électrodes soit identique à celle du liquide ambiant. Cette agitation permet aussi d'éliminer les bulles d'air sur les électrodes. Le résultat est donné directement en mS/cm.

IV.6.3.4. Suivi de la turbidité

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

Les unités utilisées pour la turbidité sont les Unités Jackson (JTU), la Nephelometric Turbidity Unit (NTU) et la Formazine Turbidity Unit (FTU) ou SiO_2 (mg/l).

On a utilisé un turbidimètre portable de type Hanna qui est basée sur l'absorption ou la diffusion des rayons lumineux par les particules en suspension les résultats sont exprimées par (FTU).

IV.6.3.5. La mesure de DCO

Mode d'opérateur

Préparation de l'essai :

- Dans un ballon de 500 ml de DCO, introduire :
 - 10 ml d'eau à analyser ;
 - 10 ml d'eau distillée ;
 - 0.2g de sulfate de mercure cristallisé.
 - 1 ml d'acide sulfurique –sulfate d'argent catalyseur agité jusqu'à dilution.
 - 5 ml de solution dichromate de potassium oxydant.
 - Ajouter quelques granules régulateurs d'ébullition et homogénéiser et agiter soigneusement.
 - Ajouter lentement et avec précaution 14 ml d'acide sulfurique –sulfate d'argent et raccorder immédiatement la fiole au réfrigérant.
 - Mettre le réfrigérant et porter à ébullition pendant (2) heures avec reflux dans un chauffant.

**Détermination de la DCO :**

- Refroidir la fiole immédiatement dans l'eau froide à environ 60°C. Enlever le réfrigérant et la refroidir à la température ambiante.
- Titrer l'excès de $K_2Cr_2O_7$ par la solution de sel de Mohr 0.25 N (sulfate de fer sulfate d'Ammonium) en présence de 1 à 2 gouttes de ferroïne (virage bleu-vert au rouge).

La demande chimique en oxygène, DCO, exprimée en milligrammes d'oxygène par litre, est donnée par

$$DCO = 8000.C (V_0 - V_1)/P_e$$

C ; Est la concentration, exprimée en moles par litre, de la solution de sel de Mohr déterminée par étalonnage.

P_e ; Volume de prise d'essai en ml.

V_0 ; Volume de solution de sel de Mohr nécessaire à blanc (ml) ou ($V_0 = 4.6$ ml).

V_1 ; Volume de solution de sel de Mohr nécessaire au dosage (ml).

IV.6.3.6. Mesure des matières en suspension (méthode spectrophotométrie)

La quantité des matières en suspensions éliminée et la qualité de l'eau épurée exprimée en mg/l.

d) Matériels nécessaire :

- Le spectrophotomètre.
- 2 pipettes de 10 ml.
- 2 flacons de spectrophotomètre.

e) Les réactifs :

- Deux échantillons (eau usée d'entrée et eau épurée de sortie).

f) Mode opératoire :

- Programmer le spectrophotomètre sur la mesure des matières en suspensions.



- Etalonner le spectrophotomètre par l'eau distillée (flacon contient 10 ml de l'eau distillée).
- Verser 10 ml de l'eau d'entrée à l'aide d'une pipette propre dans le premier flacon et 10 ml de l'eau de sortie dans le deuxième flacon.
- Boucher et nettoyer bien les deux flacons.
- Placer le premier flacon puis le deuxième dans l'appareil et lire les résultats.

IV.6.4. Discussion des résultats obtenus par électrocoagulation

a) La température

Tableau IV.4 : Résultats de mesure de température

temps(min)	T°C(i=0,1A)	T°C(i=0,15A)	T°C(i=0,2A)	T°C(i=0,25A)	T°C(i=0,3A)	T°C(i=0,4A)
0	15,7	15,7	15,7	15,7	15,7	15,7
5	17,4	22,5	22,6	24,7	25,6	26,1
10	19,6	24,2	24,1	24,9	27,2	27,4
15	19,8	24,2	24,4	26,7	27,4	28
20	20	24,7	27,7	27,3	28,4	29,9
25	21,2	25,9	28,5	28,9	29,7	31,8
30	22,4	27	30,5	31,3	32,1	35,3

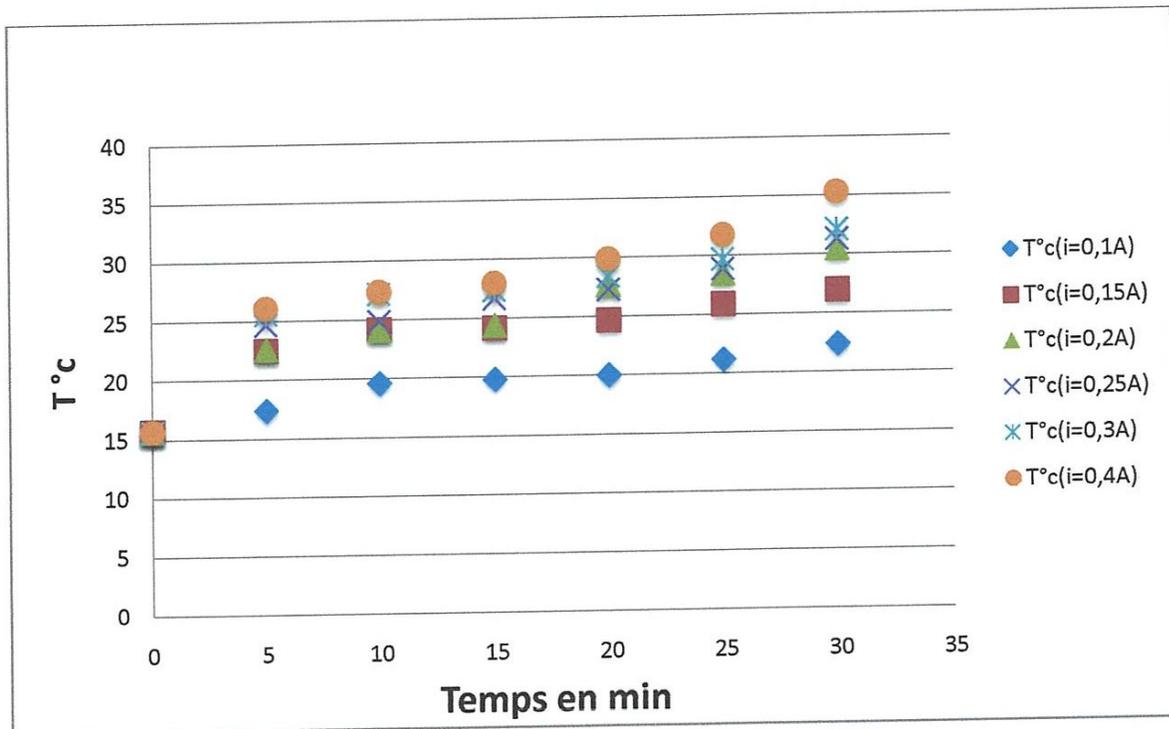


Figure IV.10 : Evolution de T ° C au cours du temps d'EC

L'augmentation de la température est due à l'augmentation de l'intensité du courant d'une part et au temps de traitement d'autre part et aux réactions électrochimiques sur les électrodes d'aluminium

b) Le pH

Tableau IV.5 : Résultat de mesure de pH

temps(min)	pH(i=0,1A)	pH(i=0,15A)	pH(i=0,2A)	pH(i=0,25A)	pH(i=0,3A)	pH(i=0,4A)
0	7,64	7,64	7,64	7,64	7,64	7,64
5	7,78	7,73	7,66	7,54	7,7	7,75
10	7,94	7,77	7,82	7,56	7,82	7,78
15	8,01	8,02	7,96	7,95	7,85	7,85
20	8,13	8,03	7,96	8,01	7,94	8,03
25	8,18	8,21	8,12	8,19	7,98	8,33
30	8,24	8,41	8,34	8,25	8,36	8,5

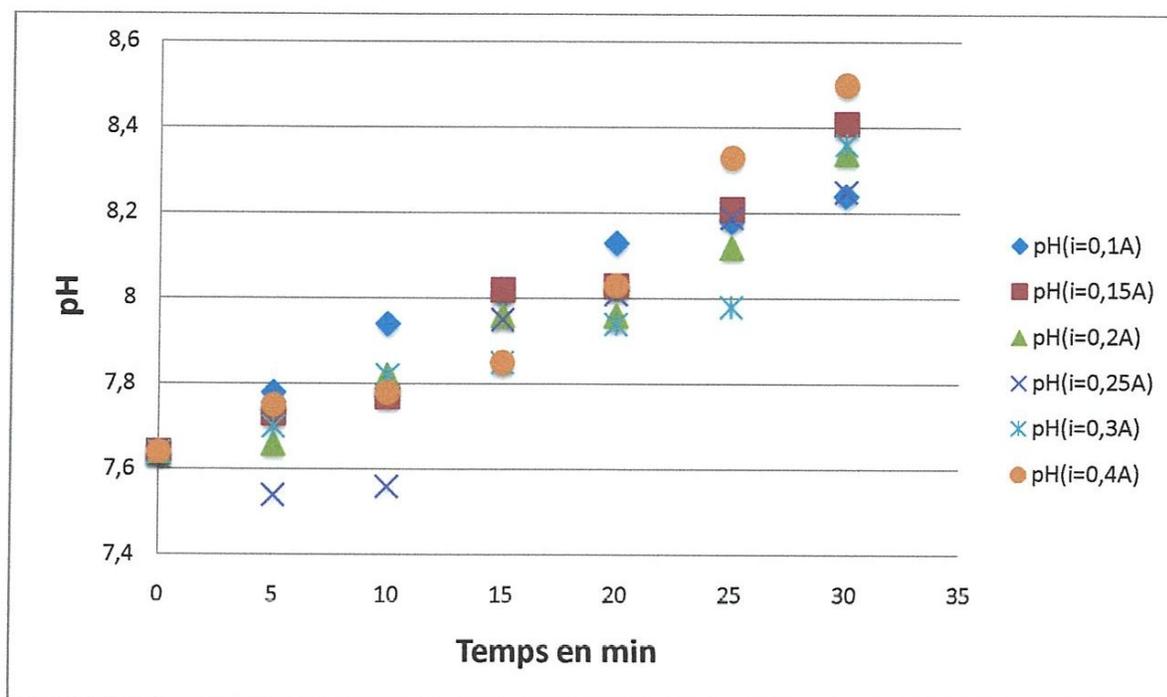


Figure IV.11: Variation de pH au cours du temps d'EC

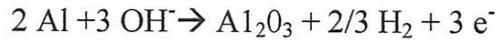
La figure IV.11 relative à la variation du pH de l'eau usée électro-coagulée au cours du temps de (0 à 30 min) pour différentes intensités de courant (0,1 à 0,4A), nous remarquons que le pH augmente légèrement de sa valeur initiale de 7,64 jusqu'à un pH final maximal de 8,56 pour atteindre un pallier; cette variation est semblable et similaire pour toute la gamme d'intensités de courant. D'après ce qui a été présenté dans notre partie bibliographique, ce paramètre conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques des espèces formées au cours d'électrocoagulation (diagramme de prédominance des espèces d'hydroxyde d'aluminium respectivement: figure III.5) où à l'anode, lieu d'oxydation, le métal qui est l'aluminium va passer de l'état solide à l'état ionique selon la réaction:

Anode en aluminium :

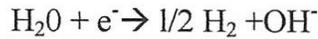




et la réaction de formation d'hydrogène:



A la cathode, lieu de réduction, le solvant, en l'occurrence l'eau, se réduit suivant la réaction :



Les cations métalliques forment des complexes avec les ions hydroxydes. L'espèce majoritaire dépend du pH du milieu qui est dans notre cas très favorable à la stabilité de telles espèces formées. Dans la zone de pH comprise entre 5 et 8, l'espèce la plus répandue en solution est l'hydroxyde d'aluminium amorphe ($\text{Al}(\text{OH})(\text{s})_3$) avec un maximum de 98,65% vers $\text{pH}=7,2$ (Zongo, 2009). Il existe également les cations $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ et $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$.

Ces complexes jouent le rôle de coagulants ; Ils s'adsorbent sur les particules et annulent ainsi les charges colloïdales ce qui conduit à déstabiliser l'eau usée. Ce rôle est similaire à celui des coagulants chimiques dans les traitements chimiques classiques. La différence réside donc dans la source des réactifs qui est chimique pour les procédés classiques et électrochimiques pour l'électrocoagulation. L'électrocoagulation se distingue des traitements physico-chimiques classiques par la présence d'un champ électrique pendant le traitement. Il facilite la migration des espèces chargées et leur adsorption sur les particules polluantes. A la cathode, la réduction de l'eau conduit à la formation de microbulles d'hydrogène. Leur taille moyenne est de l'ordre de 10-20 μm au voisinage de l'électrode (Khemis, 2006). Ces microbulles s'adsorbent à leur tour sur les espèces floculées et entraînent ainsi leur flottation. Les microbulles diminuent la formation de dépôts sur la cathode.



c) La conductivité

temps(min)	cond(i=0,1A)	cond(i=0,15A)	cond(i=0,2A)	cond(i=0,25A)	cond(i=0,3A)	cond(i=0,4A)
0	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4
5	14,7	17,4	19,3	21,6	23	24,08
10	15,2	18,9	21,7	24,2	28,54	29,92
15	19,5	21,6	24,4	29,7	31,75	33,25
20	36	26,2	27,11	31,5	35,24	37,48
25	37,3	28,5	30,6	36,8	35,68	37,51
30	28,3	30,1	35,8	38,1	37,83	40,47

Tableau IV.6 : Résultat de mesure de la conductivité.

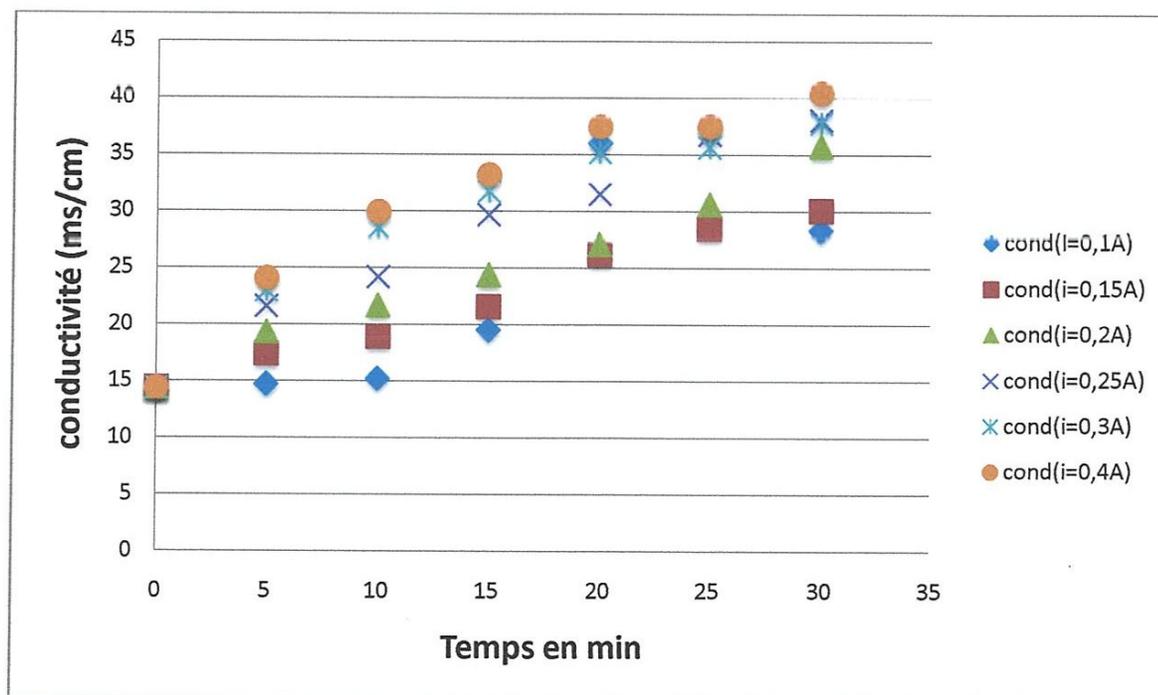


Figure IV.12: Courbe d'évolution de la conductivité au cours du temps.

L'élévation de la conductivité résulte de la dissolution de l'anode qui produit les ions Al^{+3} et OH^- à la cathode, ce qui traduit l'augmentation de la conductivité.



d) La turbidité

Tableau IV.7 : Résultat de mesure de la turbidité.

temps(min)	turb(i=0,1A)	turb(i=0,15A)	turb(i=0,2A)	turb(i=0,25)	turb(i=0,3A)	turb(i=0,4A)
0	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8
5	24,95	22,32	19,89	18,03	15,3	12,63
10	21,51	20,1	17,6	16,47	14,49	9,01
15	17,56	17,9	14,95	13,98	12,33	5,12
20	15,16	14,2	13,61	11,65	9,57	3,94
25	12,97	14,1	12,6	11,09	9,19	2,86
30	12,8	10,4	10,1	9,43	5,9	1,27

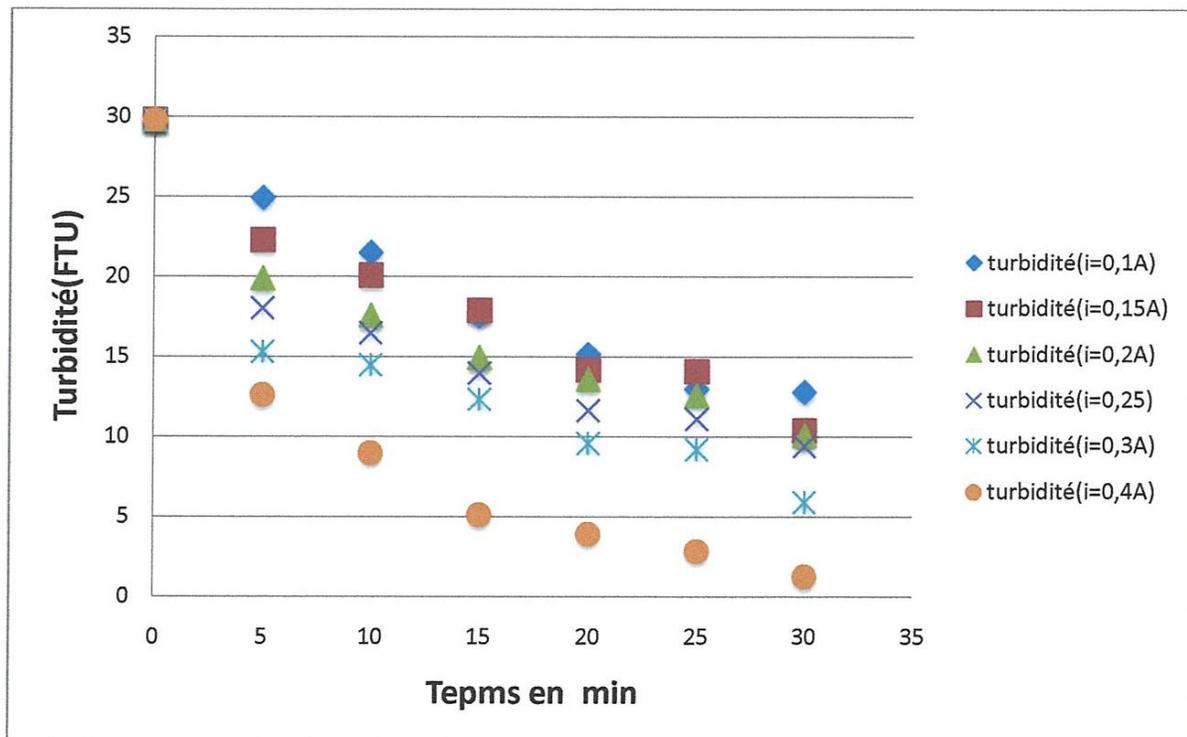


Figure IV.13: Courbe d'évolution de la turbidité au cours du temps.



Nous constatons une baisse de la turbidité au cours du temps. La turbidité diminue très rapidement en fonction du temps pour s’annuler. Cette diminution est d’autant plus rapide que la densité de courant est élevée.

e)La demande chimique en oxygène

Tableau IV.8 : Résultat de mesure de la DCO.

temps(min)	DCO(i=0,1A)	DCO(i=0,15A)	DCO(i=0,2A)	DCO(i=0,25A)	DCO(i=0,3A)	DCO(i=0,4A)
0	430	430	430	430	430	430
5	300	280	220	100	40	35
10	220	210	210	80	36	25
15	200	180	140	70	30	12
20	140	90	80	50	20	7
25	80	80	70	50	12	4
30	80	70	50	30	6	1

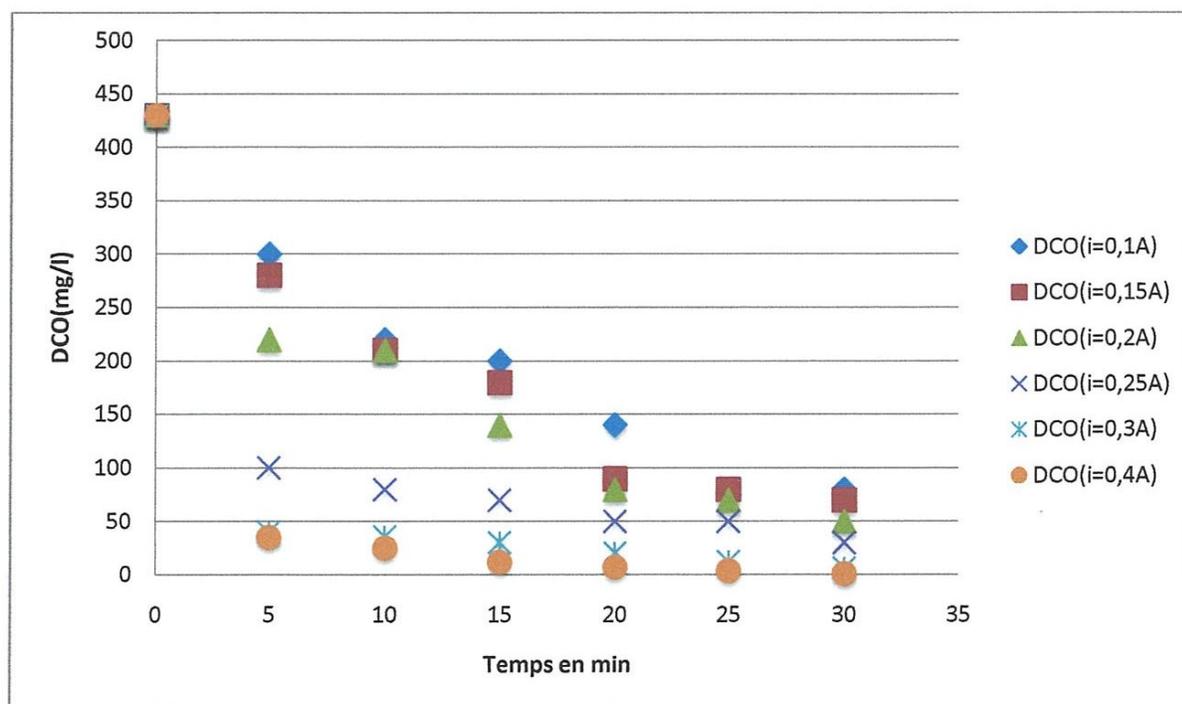


Figure IV.14: Evolution de la DCO au cours du temps



La DCO de notre échantillon diminue de façon régulière avec le temps de traitement pour atteindre une valeur résiduelle supérieure à 0. Plus la densité de courant appliquée est élevée et plus cette valeur résiduelle de DCO est atteinte rapidement.

L'abattement maximal en DCO semble d'autant plus élevé que la densité de courant est élevée.

f) Les matières en suspension

Tableau IV.9 : Résultat de mesure de les MES.

temps(min)	MES(i=0,1A)	MES(i=0,15A)	MES(i=0,2A)	MES(i=0,25A)	MES(i=0,3A)	MES(i=0,4)
0	166	166	166	166	166	166
5	54	45	37	30	16	9
10	38	32	30	23	12	5
15	31	22	21	19	9	3
20	19	18	18	15	7	1
25	17	17	16	13	5	1
30	14	11	9	8	5	1

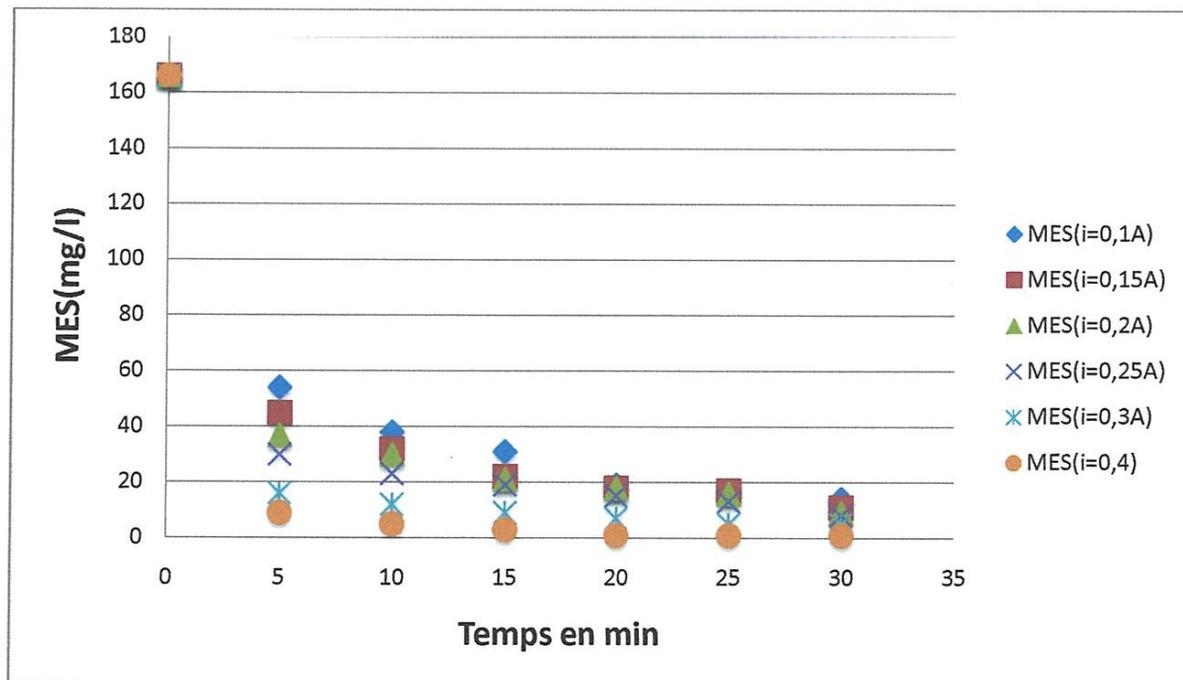


Figure IV.15: Courbe d'évolution des MES au cours du temps.



L'abattement des MES proportionnellement avec l'intensité de courant et le temps de traitement ce qui explique les résultats aboutis

IV.6.5. Les rendements d'abattement des paramètres : Turbidité, DCO, MES

a) La turbidité

Tableau IV.10 : Rendement d'abattement de la turbidité.

tps(min)	turb(i=0,1A)	turb(i=0,15A)	turb(i=0,2A)	turb(i=0,25A)	turb(i=0,3A)	turb(i=0,4A)
5	16,27	25,1	33,25	39,49	48,65	57,61
10	27,81	32,55	40,94	44,73	51,37	69,76
15	41,07	39,93	49,83	53,08	58,62	82,81
20	49,12	52,34	54,32	60,9	67,88	86,77
25	56,47	52,68	57,71	62,78	69,16	90,4
30	57,04	65,10	66,1	68,35	80,2	95,73

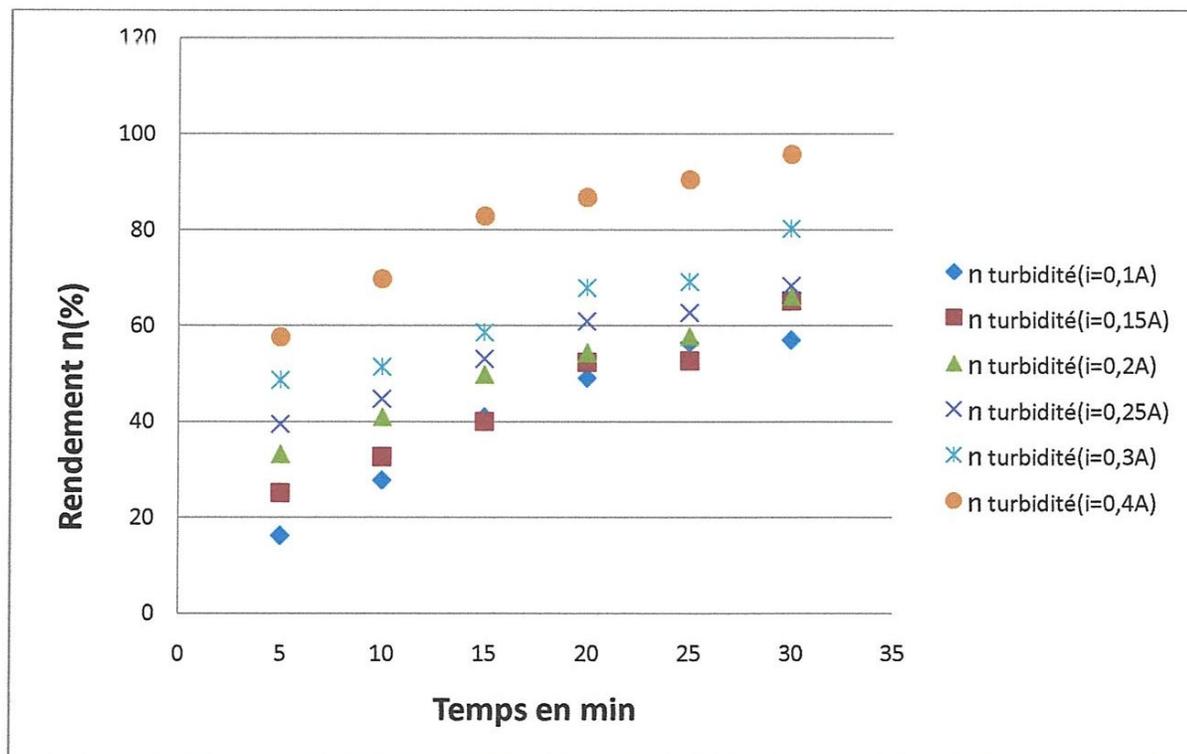


Figure IV.16 : Courbe de rendement d'abattement de la turbidité



b) La demande chimique en oxygène(DCO)

Tableau IV.11 : Rendement d'abattement de la DCO

temps(min)	DCO(i=0,1A)	DCO(i=0,15A)	DCO(i=0,2A)	DCO(i=0,25A)	DCO(i=0,3A)	DCO(i=0,4A)
5	30,23	34,88	48,83	76,74	90,69	93,02
10	48,83	51,16	51,16	81,39	91,68	95,34
15	53,48	58,13	67,44	83,72	93,02	95,34
20	67,44	79,07	81,39	88,37	95,34	95,81
25	81,39	81,39	83,72	88,37	97,2	97,67
30	81,39	83,72	88,37	93,02	97,67	99,76

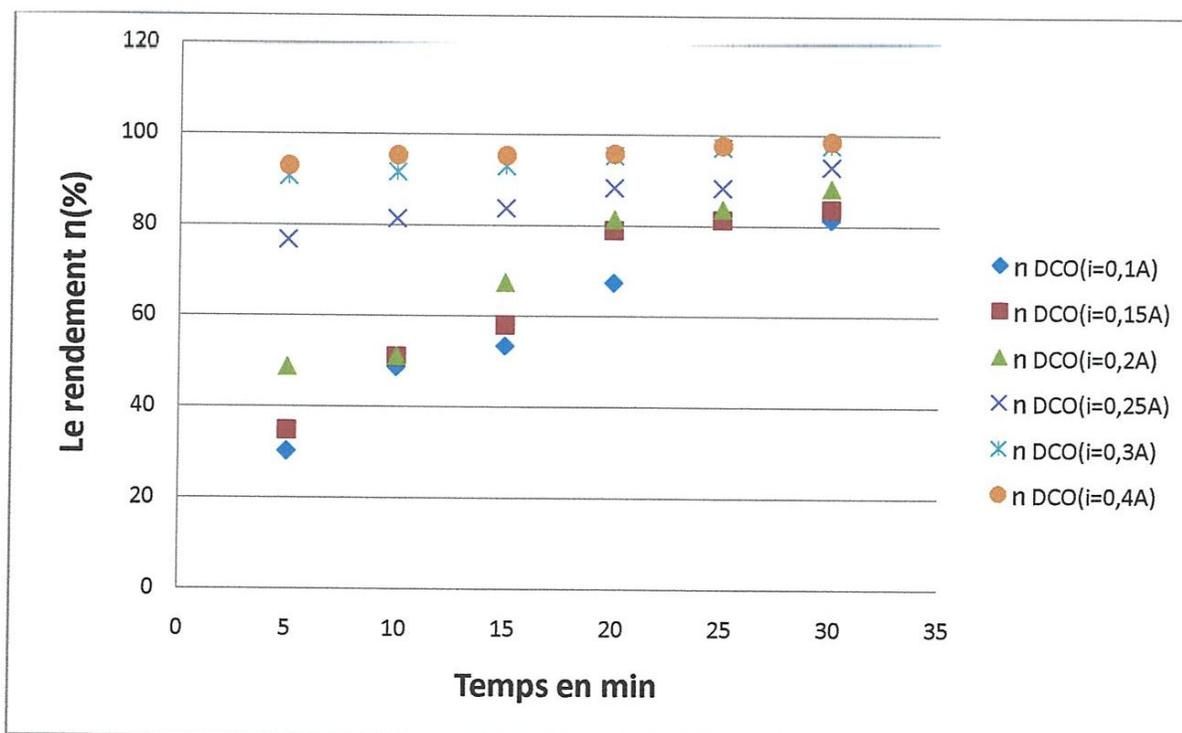


Figure IV.17 : Courbe de rendement d'abattement de la DCO



c) Les matières en suspension (MES)

Tableau IV.12 : Rendement d'abattement des MES.

temps(min)	MES(i=0,1A)	MES(i=0,15A)	MES(i=0,2A)	MES(i=0,25A)	MES(i=0,3A)	MES(i=0,4A)
5	73,5	72,89	77,71	81,92	90,36	94,57
10	77,1	80,72	81,92	86,14	92,77	96,98
15	81,32	86,74	87,34	88,55	94,57	98,19
20	88,55	89,15	89,15	90,96	95,78	99,39
25	89,75	89,75	90,36	92,16	96,98	99,39
30	91,56	93,37	94,57	95,18	96,98	99,39

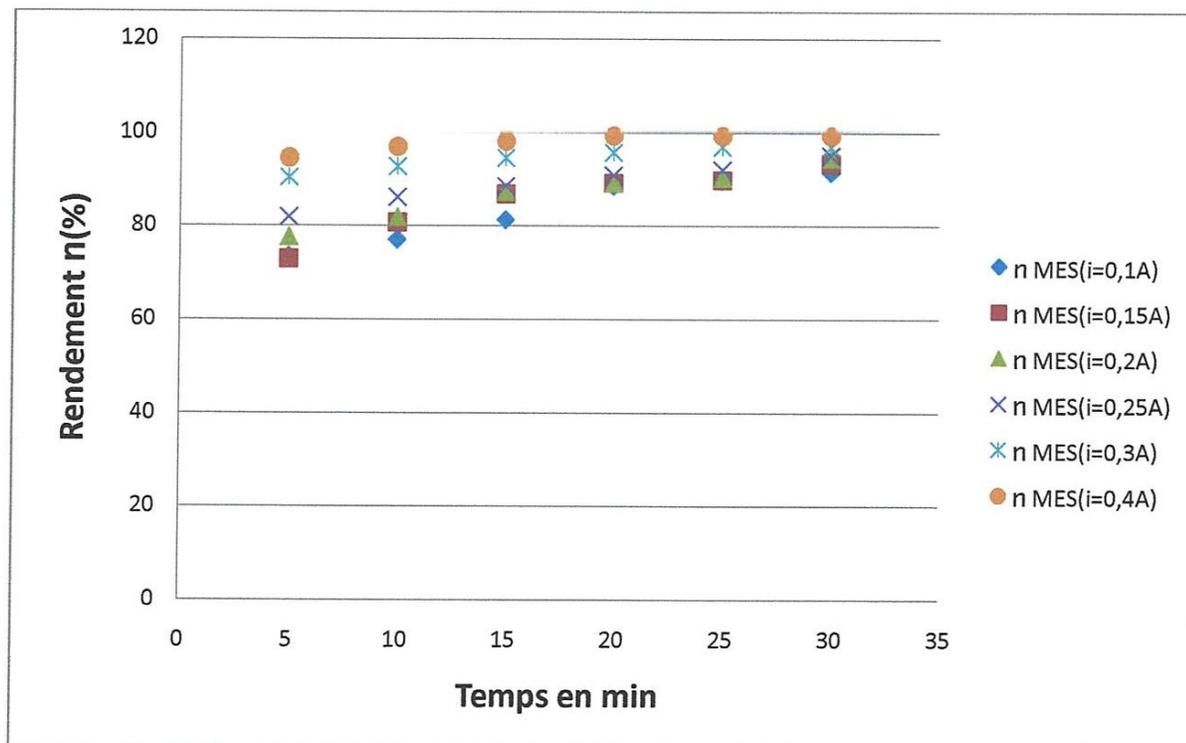


Figure IV.18: Courbe de rendement d'abattement des MES.



Conclusion

Les expérimentations décrites dans ce chapitre nous ont permis d'étudier les cinétiques d'abattement de différents indicateurs de pollution en fonction des paramètres opératoires. Cela nous a permis de déterminer les valeurs minimales de polluants atteintes au cours de nos différents traitements.

Selon les résultats obtenus par nos expériences nous pouvons dire brièvement que l'électrocoagulation a fait montrer une efficacité considérable.



Conclusions et perspectives

Dans ce travail nous avons étudié l'électrocoagulation comme une nouvelle technique de traitement des eaux usées, cette technique utilisée pour éliminer les agents de pollution des eaux usées (S.T.E.P Khenchela) a donné des résultats probants

L'électrocoagulation est un procédé de traitement des eaux usées qui peut être très avantageux à plusieurs égards. Un premier objectif était d'analyser et de démontrer l'intérêt de ce procédé pour le traitement de ces eaux en suivant les différents paramètres physico-chimique (pH, l'intensité de courant, conductivité, temps d'E.C, T°) et que les résultats obtenus par ce traitement sont être très efficace pour l'abattement de la pollution, les matières en suspensions et de la turbidité.

D'excellents rendements épuratoires en DCO, MES et en turbidité ont été enregistrés. De plus, le pouvoir désinfectant de cette technologie mérite d'être exploité davantage.

Il existe toutefois des effets complémentaires induits par l'électrocoagulation: la production de boues et la consommation énergétique. Il est possible de remédier à ces effets.

La production de boues, bien qu'inévitable, est beaucoup moins importante que celle obtenue par le procédé classique de coagulation préconisé au niveau de la STEP de Khenchela. Ceci confère un certain avantage au niveau de la fréquence de vidange des boues décantées dans le système d'assainissement autonome.

Notre travail consacré pour ces objectifs :

- Un premier objectif de ce présent travail était d'analyser et de démontrer l'intérêt du procédé d'électrocoagulation pour le traitement des eaux usées (ville de Khenchela) chargées en DCO et en turbidité.
- Nous avons suivi les cinétiques d'abattement de : la turbidité, MES et malheureusement on n'a pas pu suivre l'abattement de DCO au cours d'électrocoagulation, car on a utilisé la méthode de dosage pour déterminer la DCO.



- Les conditions opératoires étaient très variables. Nous avons effectué systématiquement des traitements à six densités de courant (0.1, 0.15, 0.20, 0.25, 0.3, 0.4 A) en étudiant l'évolution d'un grand nombre de paramètres.
- Les résultats obtenus sont très satisfaisants avec des rendements d'abattement supérieurs à 95% de la pollution organique et presque de 100% pour les MES.

La consommation énergétique de l'unité d'électrocoagulation, quant à elle, est relativement faible. Ceci laisse présager que la consommation énergétique d'une unité d'électrocoagulation à l'échelle réelle sera aussi faible d'autant plus si elle est optimisée pour diminuer la résistance ohmique au sein de la cellule électrolytique. Cette faible consommation énergétique est pour le moins attrayante pour se doter d'un système efficace et économique.

Afin de compléter ce travail on a cité quelques perspectives qui concernent l'électrocoagulation :

- Comme tout procédé de traitement des eaux, l'électrocoagulation possède des limites telles que les types d'effluents susceptibles d'être traités, la valeur de l'abattement maximal et le temps de traitement dans les procédés discontinus. Néanmoins, les résultats réalisés nous ont montrés que ce procédé est prometteur dans le domaine du traitement des eaux fortement chargées.
- Il reste encore un énorme travail à réaliser pour mieux expliquer le rôle de l'électrocoagulation vis à vis de certaines types d'effluents pour les quelles ce procédé n'a pas d'effet notable. L'effet du champ électrique sur les résultats d'abattement de la pollution nous semble très important surtout pour les émulsions contenant des colloïdes à fort potentiel zêta. L'utilisation d'autres types d'alliages est également envisagée afin de trouver un alliage efficace et peu coûteux. Le courant électrique continu est généralement utilisé pour l'électrocoagulation mais nous pouvons tester le courant sinusoïdal positif qui peut être très avantageux économiquement.

D'après les résultats que nous avons obtenus dans notre travail nous espérons que l'électrocoagulation soit prenait en considération prochainement dans le domaine de traitement des eaux usées.

SOMMAIRE



Introduction générale	1
Chapitre. I.	
I.1.Présentation	3
I.2. Les phases d'épuration	3
I.3.Les caractéristiques de l'effluent final à la sortie de la station	3
I.4. Schéma représentatif de la station d'épuration de Khenchela.....	4
I.5.Description du fonctionnement de la S.T.E.P	5
I.5.1.Le relevage	5
I.5.2.Le dégrillage grossier.....	5
I.5.3. Le pompage.....	6
I.5.4.Le dégrillage fin.....	7
I.5.5.Le dessablage –désuilage.....	9
I.5.6.Le traitement biologique	12
I.5.7.La décantation (clarification).....	16
I.5.8.La désinfection (la chloration).....	18
I.5.9.Le traitement des boues.....	20
I.5.9.a. La boue de retour (recyclage).....	20
I.5.9.b. La boue en excès.....	21
Conclusion	23

Chapitre II

Introduction.....	24
II.1. La Pollution de l'eau.....	24
II. 2. L'épuration.....	25
II. 3. Les différents types des eaux usées.....	25
II. 3.1. Les eaux usées domestique.....	26
II. 3.2. Les eaux pluviales.....	27
II. 3.3. Les eaux industrielles.....	28
II. 3.4. Les matières de vidange.....	28
II. 4. L'application des eaux usées épurées.....	28
II.5. Paramètres de la pollution.....	29
II.6. Mesure de la pollution.....	31
II.6.1. Prise d'échantillon.....	31
II.6.2. Mesure de débits.....	32
II.6.3. les normes de mesure de pollution.....	32
II.7. Notion d'équivalent habitant.....	32
II.8. Qu'est ce qu'une station d'épuration (STEP) ?.....	33
II.8.1. But d'une station d'épuration	35
II.8.2. Procédés d'épuration des eaux usées	35

II.8.2.1.Les prétraitements	36
II.8.2.2.Le traitements primaires	36
II.8.2.3.Le traitement secondaire ou digestion aérobie	36
II.9. Les stations d'épuration et la production de boues.....	37
II.9.1.Filière de traitements des boues d'épuration urbaines.....	38
CONCLUSION.....	40

Chapitre.III

Introduction.....	41
III.1.Historique du procédé.....	41
III.2.Principes de l'EC.....	42
III.3.Les différents matériaux utilisés pour les électrodes.....	44
III.4. Les différents types d'électrodes et de connexions électriques.....	46
III.5.Principales lois de l'électrolyse.....	48
III.5.1.La cinétique de transfert de charge ou loi de Buttler-Volmer	49
III.5.2.La loi de Faraday.....	50
III.6.Exemples d'effluents traités par électrocoagulation.....	51
III.7 .CHIMIE DE L'ALUMINIUM.....	53
III.7.1.Propriétés physico-chimiques et électrochimiques de l'aluminium.....	53
III.8. La coagulation chimique.....	56
III.9.Comparaison entre la coagulation chimique et l'électrocoagulation	59

Conclusion	61
Chapitre. IV	
Introduction.....	62
IV.1. Présentation de laboratoire de la S.T.E.P de Khenchela	62
IV.2. Méthode d'échantillonnage des eaux usées	63
IV.2.1. Le préleveur automatique	63
IV.2.2. Les types d'échantillons	63
IV.2.3. Les conditions de prélèvement	64
IV.3. Les paramètres mesurés (S.T.E.P Khenchela)	64
IV.3.1. suivi de la conductivité (méthode électrochimique)	64
IV.3.2. suivi de l'oxygène dissous (méthode électrochimique)	64
IV.3.3. suivi de pH (méthode électrochimique).....	65
IV.3.4. Mesure des matières en suspension (méthode spectrophotométrie).....	65
IV.3.5. Mesure de nitrate (méthode spectrophotométrie).....	67
IV.3.6. Mesure de la DCO (méthode colorimétrique)	69
IV.3.7. Mesure de la DBO ₅ (méthode manométrique).....	71
IV.3.8. Mesure de la température (méthode électrochimique).....	73
IV.4. Les résultats d'analyse physico-chimiques (S.T.E.P Khenchela).....	73
IV.5. Résultats du traitement par boue activée (S.T.E.P Khenchela	74

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II

Tableau II.1 : Caractéristiques moyennes d'un rejet domestique26

Tableau II.2 : Les caractéristiques moyennes des eaux usées domestiques ;30

Concentrations moyennes des polluants.

Tableau II.3 : Caractéristiques des boues primaires et secondaires.....34

Chapitre III

Tableau III.1: Historique des applications du procédé d'électrocoagulation... .. 41

Tableau III.2: Matériaux d'électrodes utilisés en EC... .. 43

Tableau III.3 : Les différents traitements en EC... .. 51

Tableau III.4: Réactions de réduction d' Al^{3+} 53

Chapitre IV

Tableau IV.1: quelques instruments de laboratoire61

Tableau IV.2 : Les Résultats des analyses physico-chimiques des eaux..... 72

d'entrée à la STEP

Tableau IV.3 : les résultats des analyses physico-chimiques des eaux.....73

de sortie de la STEP

Tableau IV.4 : Résultat de mesure de température.....82

Tableau IV.5 : Résultat de mesure de pH..... 83

Tableau IV.6 : Résultat de mesure de la conductivité.....84

Tableau IV.7 : Résultat de mesure de la turbidité..... 85

Tableau IV.8 : Résultat de mesure de la DCO.....86

Tableau IV.9 : Résultat de mesure de les MES..... 87

Tableau IV.10 : Rendement d'abattement de la turbidité.....88.

Tableau IV.11 : Rendement d'abattement de la DCO..... 89

Tableau IV.12 : Rendement d'abattement des MES.....90

LISTE DES FIGURES ET PHOTOS

Chapitre I

<i>Figure I.1 : schéma simplifié de la station d'épuration de KHENCHELA</i>	4
<i>Photo I.1 : La station de relevage</i>	5
<i>Photo I.2 : le compartiment de dégrillage grossier</i>	6
<i>Photo I.3 : Les pompes de relevage</i>	7
<i>Photo I.4 : Le dégrilleur fin</i>	8
<i>Photo I.5 : Les transporteurs à vis</i>	9
<i>Photo I.6 : Le bassin dessableur-deshuileur</i>	10
<i>Photo I.7 : Les supprimeurs d'aire (à piston)</i>	11
<i>Photo I.8 : Les bassins biologiques (bassins d'aération)</i>	12
<i>Photo I.9 : L'oxy-mètre de bassin d'aération</i>	13
<i>Photo I.10: sortie de liqueur mixte des bassins d'aération</i>	14
<i>Figure I.2: schéma de recirculation des boues activées</i>	14
<i>Photo I.11 : Un décanteur équipé d'un pont racleur</i>	17
<i>Photo I.12 : La récupération de l'eau épurée</i>	18
<i>Photo I.13 : Les bassins de désinfection</i>	18
<i>Photo I.14 : La station de chloration</i>	19
<i>Photo I.15 : Sortie de l'eau épurée vers le milieu naturel</i>	20
<i>Photo I.16 : La fosse de la boue de retour</i>	21
<i>Photo I.17 : Le système de pompage des boues</i>	21
<i>Photo I.18 : Le bassin d'épaississement (épaisseur)</i>	22
<i>Photo I.19 : Les lits de séchage</i>	22

Zongo , J.P Leclerc, H.A. Maïga, J. Wéthé, F. Lopicque, *Removal of hexavalent chromium from industrial wastewater by electrocoagulation : A comprehensive comparaison of aluminium and iron electrodes, Separation and Purification Technology 66 (2009a) 159-166.*

Techniques de l'ingénieur, *traitement des eaux usées urbaines par Abdelkader GAÏD*

Araar Nacira, *Contribution a l'étude du traitement par électrocoagulation des eaux polluées de la station d'épuration des eaux usées de la ville de Guelma,master 2010*

Les Sites internet

- [http://www.mairie-relecq-kerhuon.fr/l-environnement/assainissement-de-l-eau.](http://www.mairie-relecq-kerhuon.fr/l-environnement/assainissement-de-l-eau)
- [http://fr.wikipedia.org/wiki/Zonage assainissement.](http://fr.wikipedia.org/wiki/Zonage_assainissement)
- [http://www.clg-dolto.ac-aix-marseille.fr/ecolosport/2007/stationepuration.html.](http://www.clg-dolto.ac-aix-marseille.fr/ecolosport/2007/stationepuration.html)
- <http://step.ouvaton.org/eau4.htm>
- <http://www.ademe.fr/partenaires/Boues/Pages/f14.htm>

Résumé

Le but de notre étude est de caractériser les eaux usées de la ville de Khenchela par électrocoagulation et de recommander un traitement convenable permettant de réduire la pollution. Ce travail aurait le plan suivant :

Premièrement une introduction générale sur les traitements des eaux usées par la technique d'électrocoagulation.

Dans le chapitre I nous représentons la structure de la S.T.E.P de la ville de Khenchela et comment elle fonctionne, le procédé adopté au niveau de la S.T.E.P (traitement des eaux usées par boue activée).

Dans le deuxième chapitre nous avons fait une synthèse bibliographique qui englobe tous qui concernent le traitement des eaux usées par boues activées.

Ensuite, le troisième chapitre nous avons cité des notions de bases sur l'électrocoagulation.

En fin, le quatrième chapitre qui est le plus important de notre travail, la partie expérimentale qui contient nos résultats et leurs interprétations.

Et comme tous travail se commence par une introduction et se termine par une conclusion nous avons terminé notre travail évidemment par une conclusion générale et aussi on a supposé des perspectives.

Mots clé : traitement, eau usée, électrocoagulation, S.T.E.P Khenchela