

UNIVERSITE SAAD DAHLEB – BLIDA

Faculté de Technologie

Département des Sciences de l'Eau et de l'Environnement

MEMOIRE DE MASTER

Filière : Hydraulique

Spécialité : Sciences de l'Eau

Sous le thème :

**Conditionnement électrochimique des boues résiduairees de la
STEP des eaux usées urbaines
de Béni-Messous (Wilaya d'Alger)**

Préparé par :

Benyoucef Sarra

Promoteur : Mr AOUABED.A

Copromotrice : M^{me} Anser .M

2011 – 2012

Résumé :

Ce travail a porté sur l'étude du procédé électrochimique de conditionnement et de déshydratation des boues de la station d'épuration de Béni Messous.

Les boues sont conditionnées dans une cellule électrolytique comprenant des électrodes de fer, la cellule étant capable de générer in situ un coagulant, les paramètres influençant ce procédé ont été pris en compte.

L'effet de ces paramètres opératoires comme la densité de courant, le temps d'électrolyse, le pH et la conductivité sur le traitement de ces boues a été étudié. Deux mesures ont été utilisées dans ce travail ; la résistance spécifique à la filtration (RSF) et la siccité du gâteau. Pour la mesure de la RSF, la conception expérimentale d'un dispositif de filtration sous vide, a été réalisée.

L'étude expérimentale a permis de montrer qu'une augmentation de la densité de courant est accompagnée par une augmentation de l'énergie consommée. De même pour un temps d'électrolyse de 15min et une densité de courant de 700A/m^2 on obtient la même valeur de siccité qu'avec $t=45\text{ min}$ et $i=350\text{ A/m}^2$, d'une autre part la variation du pH nous a permis de dire que les boues acidifiées ont une bonne déshydratabilité, Le meilleur résultat du conditionnement est obtenu a un pH 2, $i= 350\text{ A/m}^2$, $t= 45\text{ min}$ et $\text{NaCl}= 9\text{ g/l}$. Nous constatons qu'une augmentation de la conductivité ($\text{NaCl}=9\text{g/l}$) diminue considérablement l'énergie consommée. Dans ces bonnes conditions d'électrocoagulation, la valeur de la siccité est de 28%, le volume de filtrat de 92 ml pour un temps de filtration de 3,5 min et la RSF de 10^{12} m/kg . Ainsi, les boues acidifiées permettent l'obtention de boues solides.

Mots clés : électrocoagulation, boues résiduaires, conditionnement, déshydratation, RSF, siccité

Abstract:

This work concerned the study of the electrochemical process of conditioning and dehydration of muds of the purification plant of Beni Messous.

Muds are conditioned in an electrolytic cell including/understanding of the iron electrodes, the cell being able to generate in situ a coagulant, the parameters influencing this process were taken into account.

The effect of these operational parameters like the density of current, the time of electrolysis, the pH and conductivity on the treatment of these muds was studied. Two measurements were used in this work; resistance specific to filtration (RSF) and the

dryness of the cake. For the measurement of the RSF, the experimental design of a vacuum filtering device was realized.

The experimental study made it possible to show that a packing of current is accompanied by an increase by the power consumption. In the same way for a time of electrolysis of 15min and a density of current of 700A/m² one obtains the same value of dryness as with t=45 min and i=350 A/m², of another share the variation of the pH allowed us to say that acidified muds have a good deshydratability, the best result of conditioning is obtained has a pH 2, i= 350 A/m², t= 45 min and NaCl= 9 g/l. We note that an increase in conductivity (NaCl=9g/l) decreases considerably the power consumption. Under these good conditions of electrocoagulation, the value of dryness is of 28%, the volume of filtrate of 92 ml for a time of filtration of 3, 5 min and the RSF of 10¹² m/kg. Thus, acidified muds allow obtaining solid muds.

Key words: electrocoagulation, muds waste, conditioning, dehydration, RSF, dryness

ملخص :

الهدف من هذا العمل هو دراسة فعالية الطريقة الالكتروكيميائية لمعالجة الحماة المستخرجة من محطة معالجة مياه الصرف الصحي لبنى مسوس. الحماة عولجت بواسطة خلية التخثر الكهربائي بتيار مستمر المكونة من مسريين من حديد .

تأثير العوامل التجريبية درست من خلال هذا العمل.

نلاحظ من خلال الدراسة التجريبية أنه كلما كانت الكثافة الكهربائية كبيرة كلما زادت الطاقة المستهلكة, كما نلاحظ أنه خلال مدة زمنية 15 د و كثافة تيار 700 أ/م² نتحصل على قيمة جفاف 23.86% نفسها التي تحصلنا عليها في مدة 45 د و كثافة 350 أ/م², من جهة أخرى تغيرات نسبة الحموضة أظهرت أن الوسط الحامضي هو المثالي للحصول على أفضل نتائج جفاف , أعلى قيمة تحصلنا عليها هي 26.6% عند نسبة حموضة تعادل 2. في الأخير نلاحظ أن ارتفاع تركيز كلور الصوديوم يصاحبه انخفاض في الطاقة المستهلكة, و في هذه الظروف (350 أ/م², 45 د, ثابت حموضة=2, و تركيز 9 غ/ل من كلور الصوديوم تحصلنا على أفضل نتائج جفاف 28% و مقاومة محددة للترشيح 1.12*10¹² كغ/م.

الكلمات المفتاحية:

الحماة , التخثير الكهربائي, جفاف, مقاومة محددة للترشيح.

Sommaire

Résumé.	
Liste des figures.	
Liste des tableaux.	
Introduction.....	1

Chapitre I : Les boues d'épuration.

1-1. procédé d'épuration des eaux usées.	
1-1-1.définition d'une eau usée.....	3
1-1-2.station d'épuration.....	3
1-1-2-1.le prétraitement de l'eau.....	4
1-1-2-2.le traitement primaire.....	5
1-1-2-3. le traitement secondaire.....	5
1-1-2-4.le traitement tertiaire.....	6
1-2. boues d'épuration.	
1-2-1.définition d'une boue d'épuration.....	7
1-2-2.origine et composition des boues d'épuration.	
1-2-2-1.origine des boues.....	7
1-2-2-2.caractéristiques physicochimique des boues.....	8
1-2-2-3.composition des boues d'épuration.....	10
1-2-3.traitement des boues.	
1-2-3-1.filière de traitement interne a la station.....	12
1-2-3-2.destination finale des boues.....	

Chapitre II : Conditionnement et Déshydratation

2-1. le conditionnement des boues.	
2-1-1.conditionnement chimique.....	18
2-1-2.conditionnement thermique.....	19
2-1-3.conditionnement électrochimique.....	19
2-2. la déshydratation.	
2-2-1.déshydratation naturelle.....	20
2-2-2.déshydratation mécanique.....	21
2-2-2-1.filtration sous vide.....	22
2-2-2-2.filtration sous pression.....	22
2-2-2-3.centrifugation.....	23

Chapitre III : Electrocoagulation.

3-1.historique du procédé d'électrocoagulation.....	24
3-2.définition et principe du procédé.....	26
3-3.mécanisme du procédé.....	27
3-4.paramètres influençant le processus d'électrocoagulation.....	30
3-5.paramètres fondamentaux du procédé d'EC.....	31
3-6.résultats de travaux en EC.....	34
3-7.historique des applications du procédé d'EC.....	36
3-8.avantages et inconvénients du procédé.....	37
3-8-1.avantages.....	37
3-8-2.inconvénients.....	38

Chapitre IV : étude expérimentale.

4-objectif de l'étude expérimentale.....	40
4-1.présentation de la STEP	40
4-2.matériel et méthode.	
4-2-1.mode opératoire pour le procédé d'électrocoagulation.....	42
4-2-2.matériel utilisé.....	44
4-2-3.techniques d'analyse.	45
4-3.expression des résultats.	
4-3-1.énergie consommée.....	50
4-3-2.concentration en fer dissout.....	50
4-3-3.rendement faradique.....	51
4-4.résultat et discussion.	
4-4-1.caractérisation de la boue au laboratoire.....	51
4-4-2.influence de la densité de courant.....	51
4-4-3.influence du temps d'électrolyse.....	56
4-4-4.influence du pH.....	60
4-4-5.influence de la conductivité.....	66
4-4-6.-influence de la masse du coagulant.....	72
4-5.Discussion général.....	75
Conclusion générale.....	77
Références bibliographique.....	
Annexes	

Liste des abréviations

STEP : station d'épuration.

MES : matière en suspension.

DBO : demande biologique en oxygène.

DCO : demande chimique en oxygène.

S_C : siccité.

MS : matière sèche.

MVS : matière volatile en suspension.

MO : matière organique.

AGV : acide gras volatil.

TAC : taux alcalimétrique complet.

EC : électrocoagulation.

TDS : taux de solide dissous.

COT : carbone organique total.

I : densité de courant.

i : densité de courant.

t_e : temps d'électrolyse.

IM : l'indice de mohlman.

V : volume du filtrat.

μ : viscosité dynamique de la boue.

r : résistance spécifique a la filtration.

S : surface de filtration.

P : pression.

U : tension appliqué (v).

m: masse de fer dissous.

M : masse molaire de l'element de fer.

F : constante de faraday.

C_e : current efficiency.

N_e : nombre d'électrons mis en jeu dans la réaction.

Liste des figures

- Figure I-1** : schéma d'une filière de traitement d'eau.
- Figure I-2** : schéma de principe d'une filière de traitement de boues.
- Figure II-1** : principe du procédé d'électrocoagulation.
- Figure II-2** : proportion des produits d'hydrolyse du fer en fonction du pH.
- Figure II-3** : évolution de la tension entre électrodes.
- Figure III-1** : photo du montage expérimental
- Figure III-2** : schéma du dispositif expérimental d'électrocoagulation.
- Figure III-3** : photo du dispositif de filtration.
- Figure III-4** : influence de la densité de courant sur l'énergie consommée.
- Figure III-5** : influence de la densité de courant sur la quantité de fer libérée.
- Figure III-6** : influence de la densité de courant sur le volume filtré.
- Figure III-7** : influence de la densité de courant sur le pH final de la solution.
- Figure III-8** : influence de la densité de courant sur la conductivité finale de la solution.
- Figure III-9** : influence de la densité de courant sur la siccité du gâteau.
- Figure IV** : influence du temps d'électrolyse sur le volume filtré pour $i=700\text{A/m}^2$
- Figure IV-1** : influence du temps d'électrolyse sur le volume filtré pour $i=350\text{A/m}^2$.
- Figure IV-2** : influence du temps d'électrolyse sur le taux de filtration.
- Figure IV-3** : la siccité en fonction du temps d'électrolyse pour $i=700\text{A/m}^2$ et 350A/m^2 .
- Figure IV-4** : influence du temps d'électrolyse sur le pH final de la solution.
- Figure IV-5** : influence du pH sur l'énergie consommée.
- Figure IV-6** : influence du pH sur le volume filtré.
- Figure IV-7** : influence du pH sur la siccité du gâteau.
- Figure IV-8** : vitesse de corrosion du fer en fonction du pH.
- Figure IV-9** : diagramme de zone de prédominance des espèces chimiques de Fe(III) dans une solution aqueuse.
- Figure IV-10** : influence du pH sur la turbidité de la solution.
- Figure IV-11** : évolution de la RSF en fonction du pH.
- Figure IV-12** : influence de la concentration en NaCl sur la conductivité finale de la solution.
- Figure IV-13** : influence de la concentration en NaCl sur l'énergie consommée.
- Figure IV-14** : influence de la concentration en NaCl sur la quantité en fer dissous.
- Figure IV-15** : influence de la concentration en NaCl sur le volume filtré.

Figure IV-16 : influence de la concentration en NaCl sur Le taux de filtration.

Figure IV-17 : influence de la concentration en NaCl sur la siccité du gâteau.

Figure IV-18 : évolution de la RSF en fonction de la concentration en NaCl.

Liste des tableaux.

Tableau I-1 : composition de boues en fonction des types de traitement.

Tableau II-1 : historique du procédé d'électrocoagulation.

Tableau IV-1 : caractéristiques de la boue brute.

Tableau IV-2 : efficacité de courant pour des pH de 2 a 12 ($i=350\text{A/m}^2$ et $t=45\text{min}$)

Tableau IV-3 : efficacité de courant CE ($t=15\text{min}$ et pH initial).

INTRODUCTION

L'eau a toujours été synonyme de vie et de croissance, cet "or bleu" est tout d'abord essentiel à la survie de l'être.

Les différentes activités humaines utilisent de l'eau cette eau après usage est polluée alors on appelle cette dernière une "eau usée". Ces eaux usées contiennent de nombreuses matières qui représentent à des titres divers selon les quantités mise en jeu des dangers de diverses nature pour le milieu récepteur et leurs utilisateurs.

Alors le rejet de ces eaux sans traitement dans le milieu naturel aggrave davantage sa pénurie, et devient un motif de préoccupation, ces eaux usées peuvent à terme rendre les réserves inexploitable c'est pourquoi il faut épurer ces eaux pour limiter le plus possible la pollution de nos réserves en eau.

Quant on parle d'épuration des eaux, on parle donc de production de boues. Ces sous produits sont considérées comme déchets, donc elles doivent par conséquent être éliminées.

En effet les boues d'épuration chargées en eau sont volumineuses (plus de 98% d'eau), pour réduire les volumes de ces dernières différents procédés sont mis en œuvre comprenant par ordre d'efficacité et de coût ; leur traitement s'effectue en deux étapes principales en premier une déshydratation qui se fait au niveau de la station d'épuration et ensuite l'élimination ou la valorisation des boues concentrées.

La déshydratation constitue l'étape de réduction des volumes de boues, au cours de laquelle on réalise sur les boues une élimination plus ou moins poussée de leur humidité, alors la déshydratation correspond en fait à une augmentation forte de siccité, modifiant l'état physique des boues, celles-ci passant de l'état liquide à l'état pâteux ou solide.

Pour un bon fonctionnement de la déshydratation elle doit être précédée d'un traitement de conditionnement, sachant que les boues ont une résistance à la filtration et afin d'assurer une séparation de l'eau et de la matière (solide/liquide), il faut préalablement casser la cohésion colloïdale de la boue et augmenter artificiellement la taille des particules, c'est l'objet du conditionnement. Pour cela on recourt à des procédés de nature chimique (ajout de réactifs minéraux et/ou polymères de synthèse ou polyélectrolytes) et électrochimique comme l'électrocoagulation

Dans le but d'améliorer le traitement des boues d'épurations des techniques électrochimiques sont appliquées, ces procédés électrolytiques sont utilisés depuis des

décennies, tel que l'électroflottation par plusieurs auteurs et dans différents domaines de traitement des effluents.

Dans ce présent travail, une vaste étude a été réalisée sur le conditionnement électrochimique de la boue provenant de la station d'épuration d'eaux usées l'oued de Beni-Messous, le mécanisme et la performance de déshydratation ont été examinés en variant une chaîne de paramètres différents, à savoir la densité de courant, le temps d'électrolyse, le pH et la conductivité électrique.

Notre travail expérimental est fondé sur les mesures de la résistance spécifique à la filtration (RSF) et la détermination d'autres éléments (la siccité, quantité de fer dissout, énergie consommée....etc.).

Notre travail est présenté en deux parties :

- Une étude théorique qui comporte trois chapitres le premier concerne le contexte général des boues d'épuration, le deuxième comprend une étude simple sur le conditionnement et la déshydratation, et le troisième chapitre est destiné pour l'électrocoagulation.
- Une étude expérimentale dans laquelle on a décrit l'ensemble des dispositifs expérimentaux et des méthodes utilisés au long de ce travail,

Cette étude sera accomplie par une conclusion générale sur les résultats obtenus.

Introduction :

Les différentes activités humaines utilisent de l'eau. Cette eau, après usage, est polluée. Cette pollution est constituée de matières organiques (vivantes) et de matières minérales (non vivantes). On appelle alors cette eau une "eau usée" ou "eau brute». L'objectif du traitement des eaux résiduaires est l'obtention d'une eau épurée qui satisfait aux normes de rejet édictées par la législation et pouvant par suite être évacuée sans danger dans le milieu naturel ou bien être utilisée dans le cadre des mesures nécessaires à une bonne gestion de l'eau (recyclage), plus particulièrement en milieu industriel (*j. C boeglin 1997*)

1-1.Procédés d'épuration des eaux usées :**1-1-1. Définition des eaux usées :**

Une eau usée est une eau, contenant des rejets d'activités humaines, industrielles ou agricoles, qui peuvent provoquer ou accroître la pollution du milieu dans lequel elle est rejetée.

Cette pollution peut être provoquée par des substances toxiques, des éléments pathogènes ou par des matières en suspension, colloïdales ou en solution, de nature organique ou minérale. (**A.Gaid 1984**).

1-1-2.Station d'épuration :

Afin de préserver la qualité des eaux naturelles ; les eaux usées domestiques ; les eaux pluviales en mélanges avec elles et les eaux usées issues d'établissements industriels sont assainies. Les stations d'épurations sont les équipements épuratoires qui assurent une dépollution partielle de ces eaux usées et un transfert de pollution vers les boues.(**A.coftier 2005**)

L'épuration des eaux résiduaires consiste à réduire la charge en matières organiques et minérales. Lors de cette étape, il se produit un transfert de pollution de la phase liquide (eau) vers une phase plus concentrée (boues) et une phase gazeuse (CO₂, N₂,...). La production de boues résiduaires est donc totalement dépendante de la filière de traitement de l'eau. (**C.bougrier2005**).

La figure (I.1) représente la filière traditionnelle de traitement de l'eau (**Degrémont, 1989**). Elle comporte trois parties principales :

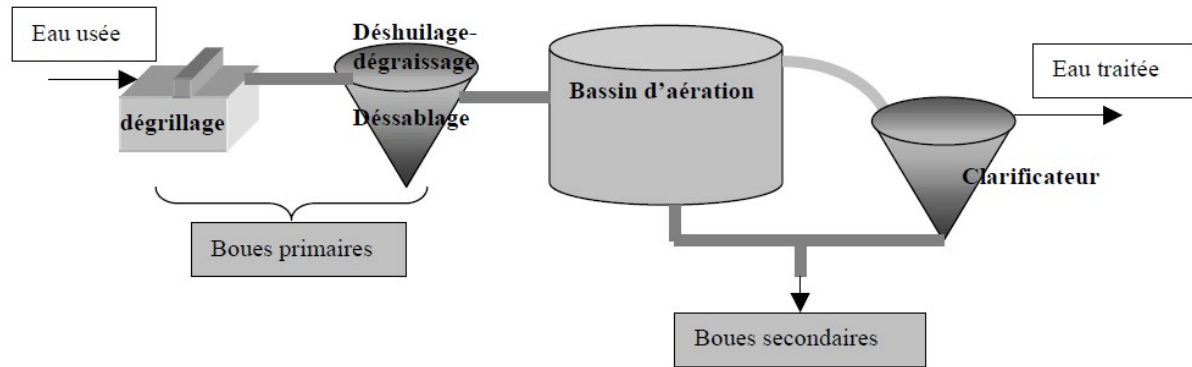


Figure1.1 : Schéma d'une filière de traitement d'eau

L'élimination de la production polluante conduit toujours en fonction des caractéristiques physico-chimiques des rejets et du degré d'épuration souhaité à la conception d'une chaîne de traitement constituée d'une succession d'opérations unitaires ;ou de stade de traitement entre lesquels il peut, dans la pratique, exister des interactions(J.C Boeglin 1997)

1-1-2-1.Le prétraitement de l'eau :

Elle permet d'éliminer les éléments solides les plus grossiers par des procédés physiques tels que :(K.M.B.Petit 2007)

a- Le dégrillage :

Il s'agit d'éliminer les éléments de grandes dimensions qui se trouvent dans l'eau d'égout brute (chiffon, matières plastiques..) et qui pourraient perturber le fonctionnement hydraulique de la station. [Lassée c 1985]

b- Le déshuilage :

Les eaux usées urbaines contiennent souvent des matières flottantes qui passent à travers les grilles (huiles, débris de graisse...) ; il est donc nécessaire de piéger ces substances au niveau du prétraitement. . [Lassée c 1985]

c- Le dessablage :

Après dégrillage il reste encore dans l'eau des fragments solides qui peuvent décanter facilement, on élimine ces matériaux facilement décantables dans de petits bassins rectangulaires ou circulaires. [Lassée c 1985]

Au terme de cette phase, il reste des polluants dissous et des matières en suspension. Une deuxième phase d'épuration va ensuite permettre de les éliminer ou de les réduire :

1-1-2-2.Le traitement primaire :

Après les prétraitements, il reste dans l'eau une charge polluante dissoute et des matières en suspension que ce traitement va permettre d'éliminer en partie. La nature (organique ou minérale), les dimensions (particules grossières non piégées lors des étapes de prétraitements, finement dispersées ou à l'état colloïdal) et la densité de ces particules sont très variables. Le traitement primaire correspond à une étape gravitaire qui permet d'isoler par décantation les particules décantables. **(Jarde.E 2002)**

Les boues ainsi obtenues sont des boues fraîches, non stabilisées : elles sont fermentescibles et sont donc instables. **(K.M.B.Petit 2007)**

1-1-2-3.Le traitement secondaire :

Il s'agit de traitement de clarification de traitements biologiques. Ils consistent à extraire les matières organiques dissoutes dans les eaux usées. On utilise des micro-organismes qui vont se nourrir de ces substances dissoutes. **(K.M.B.Petit ;2007)**

Différents procédés existent à savoir les traitements aérobies et anaérobies.

1. traitements aérobies :

Soit a cultures fixes telles que les lits bactériens ou les disques biologiques ou bien a cultures libres telle que les boues activées.

❖ Traitement par boues activées :

C'est actuellement le procédé le plus répandu pour traiter des eaux résiduaires urbaines. **(Valiron.F ; 1994)**

Ce type de traitement implique l'aération du bassin des eaux usées afin d'assurer les conditions adéquates (O₂) pour le développement des micro-organismes qui s'agglomèrent et forment le floc bactérien. Les matières organiques polluantes vont être captées par ces floes et former des boues activées qui sont brassées et assurent l'épuration des eaux usées dans le bassin. **(Jarde.E 2007)**

Après ce traitement, les eaux sont à nouveau décantées, une partie des boues est renvoyée dans le bassin d'activation pour maintenir les microorganismes intervenant dans l'épuration ; le reste des boues appelé boues en excès, est soutiré pour subir un traitement. **(Lassée.C ; 1985).**

❖ **Traitement par lit bactérien :**

Ce procédé consiste à faire ruisseler les eaux usées décantées à travers une masse de pierres ou de matières plastiques présentant une grande surface et sur laquelle se développe un film bactérien. **(Lassée.C ; 1985).**

L'objectif final n'étant pas de développer une biomasse, mais de restituer une eau purifiée. Une étape de séparation liquide-biomasse est assurée par un dispositif de clarification. Comme pour les boues activées, une partie de ces boues sert à réensemencer les bassins biologiques tandis que le reste est transféré vers la filière boue. **(Jardé.E ; 2005).**

❖ **Traitement par disque biologique :**

Ce traitement est basé sur le même principe que pour les lits bactériens dans ce cas le garnissage est remplacé par un disque en matière plastique qui est alternativement plongé dans l'eau usée et exposé à l'air libre. **(Lassée.C ; 1985)**

❖ **Le lagunage :**

Le plus répandu et le plus classique surtout dans les pays à climat chaud et où le terrain est disponible à coût raisonnable. **(Amir.S ; 2005)**

Ce traitement produit peu de boues car la charge est faible et la surface est si importante que la collecte des boues peut n'avoir lieu que tous les cinq ans. **(Lassée.C ; 1985)**

2. traitement anaérobie :

Ce traitement consiste en une consommation des matières organiques par les microorganismes présents dans l'eau en absence d'air, ce dernier est de moins en moins utilisé car il est difficile à conduire et son mauvais fonctionnement peut avoir de graves inconvénients (odeurs nauséabondes, risques d'explosion, formation d'une croûte en surface,...). **(Lassée ; 1985).**

1-1-2-4.Le traitement tertiaire :

Dans le vocabulaire courant de l'épuration, ce terme désigne un traitement complémentaire permettant d'obtenir une qualité d'effluent traitée supérieure à celle obtenue par les procédés biologiques classiques.

Il s'agit en fait d'affiner l'eau en poussant l'épuration le plus loin possible avec la possibilité de viser deux objectifs différents :

- l'amélioration des performances sur les paramètres classiques

(MES, DBO₅, DCO) : le traitement tertiaire est alors un affinage qui peut être obtenu par différentes techniques :

(Micro tamisage, filtration sur sable, bio filtration ou lagunage, adsorption sur charbon actif...) ;

- l'action spécifique sur un paramètre qui n'est que peu ou pas touché par les traitements classiques : c'est le cas de la désinfection par laquelle on s'attache à réduire la pollution bactérienne, ou des procédés visant l'élimination des éléments nutritifs (azote ou phosphore) facteurs d'eutrophisation, par des traitements biologiques (nitrification et dénitrification de l'azote) ou physico-chimiques (précipitation du phosphore) **(J.C boeglin 1997)**.

1-2. Boues d'épuration:

1-2-1 .Définition d'une boue :

Le terme « boues » est le terme générique employé pour caractériser les résidus ou sous-produits issus des procédés de séparation liquide-solide des installations de traitement et d'épuration des eaux usées résiduaires. La production de boues résulte d'un phénomène d'accumulation consécutif à trois phénomènes combinés et illustrés : la production de micro-organismes actifs ou morts, l'accumulation de matières en suspension minérales et l'accumulation de matière organique non biodégradable. Cette production de boue se développe sur une matière organique qui se trouve sous forme soluble, colloïdale (0,08 à 1 µm), supra-colloïdale (1-100 µm) et enfin particulaire (matières en suspension MES). Chaque fraction est divisée elle-même en fraction biodégradable et fraction non biodégradable, organique ou minérale. **(S.P.FABIEL)**

1-2-2.origine et composition des boues :

1-2-2-1.origine des boues :

Les boues de stations d'épuration sont classées en quatre grands groupes **(Degrémont, 1998)**.

➤ **les boues primaires :**

Sont les dépôts récupérés par une simple décantation des eaux usées .elles sont à la fois riches en matières minérales (micro sables, terre...) et contiennent des matières organiques susceptibles d'évolutions .Elles représentent des concentrations élevées. Elles sont obtenues, par exemple, dans les décanteurs –digesteurs équipant certaines petites collectivités. **(P.D.Cemagref 1990)**

➤ **les boues secondaires (autrement appelées boues activées) :**

Elles sont issues du traitement secondaire. Elles sont essentiellement composées par la biomasse présente en excès dans le système et par la matière réfractaire à l'épuration biologique. Elles sont récupérées après le décanteur secondaire (clarificateur), au niveau de la purge. Ce sont des boues fraîches biologiques, essentiellement sous forme de floccs de bactéries. Leur pouvoir fermentescible dépend du temps de séjour dans le bassin d'aération (aussi appelé âge de boues : θ_b). **(Hadj Kouider.S 2011)**.

➤ **Les boues mixtes :**

Telle est l'appellation du mélange de boues secondaires avec les boues primaires. Les boues mixtes sont celles qui sont issues de la quasi-totalité des filières de traitement complètes .sur les stations de quelque importance (quelque dizaines de milliers d'eq.hab au moins), il est permis d'envisager des traitements séparés des deux types de boues **(P.D.Cemagref 1990)**

➤ **les boues physico-chimiques :**

Ces boues sont issues d'un traitement utilisant des flocculants minéraux (sels de fer ou d'aluminium). Le traitement physico-chimique est principalement utilisé sur les boues industrielles ou pour palier au sous dimensionnement de certaines stations d'épuration (stations situées en zones touristiques, par exemple).**(S.H.Kouider 2011)**

1-2-2-2.caractéristiques physicochimique des boues :

L'étude du problème du traitement des boues commence par l'établissement des caractéristiques de la boue, c'est-à-dire :

- identifier la boue à un type connu ;
- caractériser les paramètres physiques, chimiques, biologiques de la boue par des analyses. **[É.guibelin 1999]**.

La composition des boues varie d'une station à une autre mais également sur une même station en fonction du temps et de la saison.

1-matière sèche et siccité S

‘‘S’’ C'est le paramètre principal de la définition de filiere et surtout un des plus faciles à mesurer. MS est exprimée en g/L. Rapporté à la masse totale de boue, on l'exprimera en fraction massique S qui correspond à la siccité. **(E.guibelin 1999)**

Il s'agit de mesurer le poids du résidu sec après chauffage a 105°C jusqu'au poids constant, on l'exprime généralement en pourcentage celui-ci varie de 3 à 8 % de matière sèche. **[l'assee.C 1985]**.

2-Les matières volatiles et minérales :

C'est la quantité de matières organiques contenues dans les matières en suspension, en première approximation on considère que

MV (matière volatile)=MO (matière organique), les MV étant classiquement appréciées par perte au feu a 550°C **(Navas et al 1992)**

3-acide gras volatils et titre alcalimétrique :

Les AGV ne sont la plupart du temps que des paramètres de contrôle du bon fonctionnement d'une opération unitaire : la digestion.

Le TAC est un indice de la dureté carbonatée des eaux. Il correspond à la teneur en bicarbonates (hydrogénocarbonates), carbonates et alcalis libres des eaux.

Il est exprimé, par exemple, en mg/L CaCO₃, ou dans des unités dérivées (degré français, degré allemand...). **[J.C Boeglin 1997]**.

4-demande chimique en oxygène :

La demande chimique en oxygène (DCO) est la quantité d'oxygène consommée par les matières existant dans l'eau et oxydables dans les conditions opératoires définis **(Smollen 1988)**

La présence des matières oxydables peut entrainer une prolifération de micro-organismes et la production de composés halogènes indésirables pour la santé et l'environnement **(Laubenbenger et Hartmann 1997)**

5-potentiel d'hydrogène pH :

Le pH d'une solution est la mesure de la quantité d'ions hydrogène donc il est un indicateur d'équilibre entre OH^- et H^+ en solution (Navas *et al* 1992).

6-viscosité :

Elle nous permet d'évaluer l'aptitude des boues à se prendre en masse au repos et à devenir fluide au brassage. (Lassée ; 1985).

7-consistance des boues :

C'est un paramètre à connaître pour toute manipulation des boues .La consistance est un état physique dépendant de la siccité :

- boues liquides : siccité de 0 à 10%.
- Boues pâteuses : siccité de 10 à 25%.
- Boues solides : siccité de 25 à 85 %.
- Boues sèches : siccité supérieure à 85%. (degremont 2005)

1-2-2-3.La composition des boues d'épuration :

Le constituant majeur d'une boue à la sortie d'une station d'épuration est l'eau (94% à 98%).

Les boues sont très riches en matières organique (50 à 70% de la matière sèche).par tonne de matière sèche, elle contient à peu près autant de MO qu'un fumier.

La décomposition des boues d'épuration libère de grandes quantités d'azote (principalement sous forme de nitrate) et de phosphore.

Les métaux lourds représentent, en moyenne, moins de 0,15 % de la matière sèche .la réglementation évolue avec l'efficacité croissante de la gestion des déchets et les avancées techniques de leur traitement .la concentration maximale autorisée tend ainsi à diminuer au fil des années .la boue à la sortie d'une station est pauvre en potasse.

La nature de la matière organique des boues est très différentes de celle du fumier, la quelle est constituée principalement de composés celluloseux et des lignines dérivant de la structure des végétaux.

Dans les boues la partie principale de la matière organique est constitué par des corps microbiens ou des produits d'excrétions de ces derniers [Selhani .S 2009]

Nature des dosages	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
pH	12.4	6.8	5.85	14	6.5
C/N	11.2	15.3	10.4	12.3	8.7
H ₂ O en %	75	72	95.5	61.5	5.5
EN % de MS					
MO	38.6	63.8	57.2	-	52.1
C	22.7	38.4	38.3	12.6	30.5
Azote	2.0	2.5	3.5	1.0	3.5
P ₂ O ₅	-	3.0	5.8	1.3	2.2
K ₂ O	-	0.17	-	0.09	0.2
CaO	25.5	5.4	9.7	33.7	7.5

Tableau I.1 : composition des boues en fonction du type de traitement

B₁ : boues déshydratées sous vide et flocculées a la chaux et chlorure ferrique.

B₂ : boues centrifugées après traitement au poly électrolyte cationique.

B₃ : boues provenant directement des décanteurs primaires et secondaires.

B₄ : boues traitées au chlorure ferrique et a la chaux plus déshydratées par filtre presse

B₅ : boues digérées déshydratées.(S.Selhani 2009).

1-2-3.traitement des boues d'épurations :

Les boues résiduairees se présentent sous une forme liquide et avec une forte charge en matière organique hautement fermentescible. Ces deux caractéristiques sont gênantes et posent beaucoup de problèmes techniques pour leur évacuation «quelle que soit la destination », Parmi lesquels leur transport et leur stockage qui conduisent souvent à des problèmes de manipulation et des nuisances olfactives. Ceci impose le choix d'une filière de traitement dès l'installation de la STEP. (S.Amir 2005)

Une filiere de traitement et d'élimination finale des boues est constituée par un enchaînement d'opérations élémentaires assurant une fonction bien déterminée et au niveau de laquelle il existe un grand nombre d'options possibles (Ministère de l'environnement 1994).

1-2-3-1. Filière de traitement interne à la station d'épuration :

Une fois collectées, les boues doivent subir différents traitements avant leur rejet. Ces traitements ont trois objectifs majeurs : la réduction du pouvoir fermentescible, la réduction de la masse des boues et la réduction des risques sanitaires.

La figure 1.2 représente une ligne de traitement des boues. La filière de traitement des boues comprend quatre étapes principales :

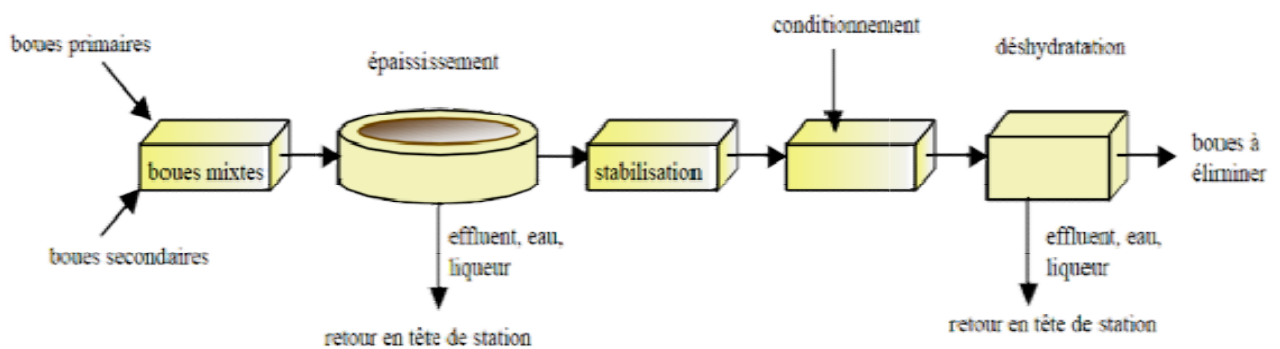


Figure I.2 : Schéma de principe d'une filière de traitement des boues (Bougrier .C 2005)

➤ Epaissement :

C'est la première étape du traitement. A l'entrée de la filière, la boue étant extrêmement liquide, pour réduire les volumes à traiter, on élimine l'eau libre.

L'épaissement est avantageux pour les raisons suivantes :

- Il améliore le rendement de digestion si celle-ci est prévue et en réduit le coût d'investissement.
- Il réduit le volume des boues en particulier en cas d'épandage ou de rejet en mer.
- Il augmente l'économie des systèmes de déshydratation (centrifugation, filtration sous vide, etc.) (Eckenfelder, Vandevenne, L).

Cette étape permet de concentrer les boues, et donc de réduire leur volume. Selon la nature des boues, cette opération se fait généralement par décantation gravitaire statique ou par flottation. Elle peut aussi être réalisée par égouttage ou centrifugation (C.bougrier 2005)

➤ **Stabilisation :**

La stabilisation consiste à réduire la quantité de matières organiques pour limiter les risques de fermentation et donc d'odeurs nauséabondes. Une stabilisation n'est évidemment mise en œuvre que sur des boues dont la teneur en matières rapidement biodégradables est importante, c'est-à-dire :

- Boues de simple décantation d'eaux résiduaires urbaines, ou « boues primaires » ;
- Boues de traitement biologique aérobie a moyenne et forte charge (boues activées en excès, boues de lits bactérien, boues provenant du lavage de biofiltres a lit granulaire), appelées souvent « boues biologiques » ; Mélange des deux types de boues précédents « boues mixtes » (**Degremont, 1989, Tome 2**).

Il existe trois grands types de stabilisation : la stabilisation biologique (digestion aérobie ou anaérobie, compostage), la stabilisation chimique (chaulage, stabilisation aux nitrites, oxydation) ou la stabilisation physique (séchage poussé) (**Degremont, 1989, OTV, 1997**).

Digestion aérobie :

C'est une transformation de la matière organique par oxydation en milieu aérobie, avec dégagement de chaleur et production de dioxyde de carbone. Ce procédé consiste a aérer les boues pendant une période prolongée, au cours de laquelle les microorganismes aérobies, places en phase de respiration endogène, dégradent les matières organiques libres ou stockées dans la masse bactérienne. La disparition de la masse active suit une loi exponentielle :

$$M = M_0 \exp^{(-bt)}$$

Avec $b \approx 0,18$ si t est exprimée en jours (**Boeglin, J ;1997**).

Comme tout processus biologique, la stabilisation est fortement influencée par la température.

Le mécanisme de respiration endogène est schématisé dans cette réaction :



La durée d'aération des boues est au minimum de 10 jours a 20 C° et 14 jours a 12 C°.

Digestion anaérobie :

La stabilisation anaérobie des boues permet de fermenter une partie des matières organiques en dioxyde de carbone et méthane (65 à 70 % de CH₄ et 25 à 30 % de CO₂) (Degrement, 2005), avec une production relativement faible de biomasse cellulaire. Le processus implique plusieurs populations microbiennes distinctes qui sont continuellement en interactions, et dont la majorité ne produit pas directement du méthane. La stabilisation dépend principalement de deux facteurs :

- La température ;
- Le temps de séjour.

A la mise en service d'un digesteur, la fermentation a d'abord une tendance acide : le pH tombe entre 6,5 et 5,5 ; les gaz dégagés dans cette étape sont en majorité le gaz carbonique et l'hydrogène ; la boue extraite au cours de cette période a une couleur jaunâtre ou grise et répand des odeurs nauséabondes

La seconde phase est une digestion basique qui débute d'autant plus vite que la température est plus élevée ; le pH remonte entre 6.8 et 7.3 ; le dégagement gazeux est constitué par de l'azote, du gaz carbonique et surtout du méthane. La majeure partie de la boue s'alourdit et descend au fond du digesteur ; cette boue est homogène, épaisse tout en étant fluide, de couleur noir, sans odeur ou ayant une légère odeur de goudron

Le rendement d'un digesteur est caractérisé par le pourcentage de réduction des matières volatiles contenues dans la boue (**Eckenfelder, Vandevenne,L**).

➤ **le conditionnement :**

Les boues urbaines contiennent des substances colloïdales et des mucilages dont les propriétés électrochimiques favorisent la rétention de l'eau entre les particules solides et freinent ainsi la séparation solide-liquide. (**Lassée. C 1985**).

Cette étape permet de préparer les boues à la déshydratation. En effet, afin de libérer l'eau contenue dans les boues, il est nécessaire de réduire la stabilité des colloïdes et de faciliter leur agrégation. Les procédés utilisés peuvent être physiques (traitement thermique) ou chimiques (ajout de sels minéraux ou de polyélectrolytes). Le traitement thermique à 150°C – 200°C pendant 30 à 60 minutes est le plus efficace pour réduire l'hydrophilie particulaire (**Degrémont, 2005**)

➤ **la déshydratation :**

La déshydratation qui correspond à une augmentation forte de siccité, modifie l'état physique des boues (**E.jardé 2002**)

Ce traitement permet de faciliter le transport ou l'utilisation ultérieure des boues. Il est précédé d'un conditionnement préalable qui facilitera la déshydratation.

Cette déshydratation peut être obtenue par différents procédés :

- par filtration : c'est la méthode la plus courante, elle est réalisée soit par drainage sur lit de sable, soit par filtration sous vide ou sous forte ou moyenne pression.
- sur lits de séchage : lits de sable drainés (méthode en régression actuellement).
- filtration sous vide : le principe du traitement est basé sur un essorage des boues

résiduaire. La matière retenue sur les parois du tambour rotatif s'accumule et forme le "gâteau" qui va en s'épaississant. On obtient une siccité des gâteaux de 22 % à 32 % pour les boues organiques. C'est un procédé qui n'a plus aujourd'hui que des applications limitées.

- filtration sous pression en chambres étanches : elle permet d'obtenir une siccité des gâteaux généralement supérieure à 30 %, par application de pressions très élevées.
- filtres à bandes presseuses, très répandus, qui fonctionnent en trois temps:

floculation avec des polyélectrolytes, drainage de la boue floculée (qui provoque un épaississement rapide de la boue), et pressage de la boue drainée. Ce traitement permet d'obtenir des résultats satisfaisants sur la grande majorité des boues organiques.

- par centrifugation : cette technique permet une bonne séparation des solides sur des boues très difficiles (boues très organiques), avec un travail en continu et une surveillance réduite des machines (**K.M.B.Petit 2007**)

1-2-3-2.Destination finale des boues :

Diverses possibilités permettent de se débarrasser rationnellement de ces boues qui constituent le problème majeur pour l'exploitant de la station d'épuration. Ce sont (**J.P.Bechac et al 1984**):

- valorisation agricole.
- Mise en décharge.
- Incinération.
- Injection dans le sol.

- Récupération d'énergie.

a-Valorisation agricole :

L'azote, le phosphore, le potassium le magnésium contenu dans les boues sont des éléments fertilisants pour l'agriculture. La matière organique présente est aussi d'un grand intérêt pour certains sols.

L'épandage des boues sur sol agricole est réalisé depuis très longtemps. Les manques de connaissances de la composition des boues et de leurs conditions de mise en œuvre en épandage, leurs qualités médiocres, ont conduit à des pratiques qui ont discrédité l'intérêt de ce mode d'élimination des boues

L'intérêt agricole d'une boue pourra donc être défini à partir de la connaissance des grandeurs suivantes :

- Teneur en azote, phosphore, carbone et potassium
 - Valeur du rapport C/N (qui devrait être inférieur à 20)
 - L'état physique de la boue, qui conditionne son mode d'épandage
- (S.P.Fabiel)**

b-Mise en décharge :

L'admission de boues en excès sur les sites de décharges n'est envisageable que lorsque celles-ci ont subi un traitement de déshydratation naturelle (lit de séchage) ou mécanique.**(J.P.Bechac 1984).**

Cette solution a perdu progressivement de son intérêt et se retrouve actuellement interdite pour des raisons financières (procédure de fermeture ...) et pour des problèmes environnementaux tels que les odeurs nauséabondes, pullulation de moustiques, entraînement d'éléments fertilisants (nitrates, phosphates) et de produits toxiques par les eaux superficielles et contamination des nappes d'eaux souterraines (Looser et al. 1999; Kjeldsen et al. 2002; Marttinen et al. 2003 ; **cité par Amir. 2005).**

c-l'incinération :

Elle représente 15% à 20% du tonnage des boues, mais induit de forts coûts pour les exploitants des stations d'épuration. Les déchets sont brûlés dans une chambre à très haute température (de préférence à 1200°C) avec une fourniture suffisante en oxygène pour oxyder tous les matériaux organiques. Elle peut ainsi détruire 99,9 % des déchets

organiques (y compris les composés organiques chlorés) si elle est convenablement utilisée. [E.jarde 2002]

d-Injection dans le sol :

Cette technique consiste à injecter les boues à l'état liquide dans les poches poreuses du sous-sol, isolées entre des couches continues d'argiles ; une étude géologique sérieuse est indispensable, car il faut réaliser une étanchéité parfaite du forage afin d'empêcher une contamination des couches aquifères traversées.

Une telle technique doit être strictement limitée à des boues extrêmement difficile à traiter. Les profondeurs d'injection varient entre 100 et 4000 mètres et la pression de refoulement peut atteindre 70 bars. (Lassée.C, 1985)

e-récupération d'énergie :

La méthanisation ou digestion anaérobie poursuit le double objectif de valorisation énergétique par récupération de méthane (CH₄) et de stabilisation des boues.

Cependant, la valorisation agricole directe de digestat est rarement pratiquée car elle rencontre des problèmes. (Gourdon ; 2001)

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons passé en revue les techniques de traitement des eaux résiduaires et qui dit épuration des eaux dit également production de boues.

La maîtrise du traitement des boues reste très difficile, à cause des interférences des différentes pollutions qui la constituent, pour cela une maîtrise des traitements physico chimiques et biologiques est obligatoire.

Introduction :

Les boues soutirées des décanteurs subissent deux opérations successives de concentration : le conditionnement et la déshydratation.

Le conditionnement permet de préparer les boues à la déshydratation. Son principe de fonctionnement est basé sur la rupture de la stabilité colloïdale des boues, les procédés utilisés peuvent être physiques ou chimiques.

La déshydratation est l'étape qui permet de donner aux boues une consistance physique plus ou moins solide en éliminant le maximum d'eau contenu dans les boues. Les procédés utilisés peuvent être naturels ou mécaniques.

2-1. Le conditionnement des boues :

Les boues résiduelles se présentent sous la forme d'une suspension plus ou moins homogène caractérisée par la présence de particules à l'état colloïdal. La destruction plus ou moins complète de la structure colloïdale et la modification des forces de cohésions interne de la boue, plus communément appelées conditionnement, facilite la libération de l'eau liées aux particules, l'efficacité du conditionnement peut s'apprécier par la mesure de la résistance spécifique à la filtration de la boue avant et après le traitement.

On distingue deux types de conditionnement :

- * Le conditionnement chimique par adjonctions d'électrolytes minéraux ou de polymères organiques.
- * Le conditionnement thermique par apport de chaleur sous pression équilibrante.

2-1-1 . Le conditionnement chimique :

Le conditionnement chimique utilise des réactifs minéraux (électrolytes minéraux à poly cations) ou organiques (polymères) dont l'ajout de manière contrôlée (dosage et mélange) provoque la coagulation et/ou la floculation de la suspension. Il en résulte une agglomération des particules sous la forme d'un réseau tridimensionnel : les floccs. La structure de ces floccs dépend fortement du type de réactif utilisé. Les réactifs minéraux (sels de fer, sels d'aluminium, chaux,...) donnent des floccs relativement fins et stables. Ce type de flocc est adapté pour la filtration sous forte pression et sous vide, qui emploient une toile au maillage fin. Les polymères organiques quant à eux conduisent à des floccs volumineux (plusieurs millimètres), plus fragiles, et adaptés pour la centrifugation ou la filtration sur filtre à bandes dont les mailles sont larges. L'usage de ces polyélectrolytes de synthèse se généralise même pour la filtration sous

pression (**Lotito et al, 1990**). Les polymères utilisés en pratique sont généralement de type cationique car les particules constitutives de la boue sont majoritairement chargées négativement en surface. (**A.Leonard ,2002**)

2-1-2.Le conditionnement thermique :

il a pour but de rompre les liaisons entre l'eau et les matières colloïdales de la boue a traiter ,afin d'en faciliter la déshydratation .ce procède consiste a élever la température de la suspension boueuse au-delà de 180c° pendant un temps déterminé sous une pression légèrement supérieure a la pression de vapeur saturante pour la température choisie afin d'éviter la vaporisation de l'eau de constitution et l'émission conséquent d'odeurs nauséabondes.

En élevant la température des boues, l'augmentation de l'agitation thermique favorise la perturbation de la structure hydrophile des boues, accélère les réactions chimiques du milieu.

Le succès du conditionnement dépend directement de la température de chauffe et du temps de cuisson, mais aussi de la nature de la boue ; des résultats d'essais effectués sur différents types de boues montrent :

-que l'influence de la température est prépondérante et que la limite inférieure se situe aux environs 175 °C ;

-que le gain de filtrabilité apporté par la cuisson est d'autant plus net que la teneur en matières organique est élevée ;

-qu'un temps de cuisson supérieur à 80 min ne présente guère d'intérêt, sauf pour les faibles températures. 180° C

Malgré les avantages importants que présente ce mode de conditionnement, filtrabilité largement améliorée et stérilité complète de la boue, on n'oubliera pas le cout d'investissement très élevé ; cette technologie est donc réservée a de grandes stations d'épuration.(**J.P Bechac et al 1984**)

2-1-3. Conditionnement électrochimique :

Les traitements électrochimiques constituent de nouvelles méthodes de traitement des boues d'épuration visant d'une part à réduire la quantité de réactifs(diminution du

volume de boues générées) et d'autre part à réduire les volume des équipements (diminution du temps de rétention dans le réacteur).plusieurs processus physiques et chimiques peuvent simultanément intervenir lors du traitement électrolytique.

On a recours à cette technique pour obtenir la déstabilisation et l'agrégation des particules colloïdes ; en produisant des ions métalliques in situ par dissolution d'une anode de fer ou d'aluminium ; les ions interviennent comme ceux apportés dans la floculation chimique par les sels métalliques (chlorure ferrique ou sulfate d'aluminium).

En revanche d'après la littérature très peu de procédés électrochimiques ont été développés à l'échelle industrielle pour le traitement des boues issues des stations d'épuration des eaux usées urbaines ou industrielles (**Bureau, M.A ; 2004**)

2-2.La déshydratation :

Les boues stabilisées contiennent une importante quantité d'eau estimée de 90 à 98%, afin de réduire cette dernière on procède a un traitement de déshydratation précédé d'un conditionnement préalable. Au cours de ce traitement, on réalise une élimination plus ou moins poussée de l'humidité résiduelle de façon a amener les boues a l'état solide ou pâteux.

Ce traitement permet de faciliter le transport ou l'utilisation ultérieure des boues.

Cette déshydratation peut être obtenue par différents procédés :

- Déshydratation naturelle.
- Déshydratation mécanique.

2-2-1.Déshydratation naturelle :

La technique de séchage sur lits de sable reste encore le procédé le plus utilisé de nos jours pour des installations de traitement de faible importance (commune rurales par exemple) en raison du cout d'investissement peu élevé. Son efficacité est subordonnée au respect d'un certain nombre de règles concernant la réalisation et surtout l'exploitation. (**J.C Bechac et al 1984**)

Le séchage des boues sur des lits de sable réside en deux temps :

- Dans un premier temps, se fait une filtration de l'eau a travers le support, par des forces a très faibles pression qui sont essentiellement des forces gravitaires. L'eau est recueillie par un système de drain disposé a la base du lit .le temps de cette première

phase est relativement rapide puisqu'il est de 1 jour pour les boues primaires et de 4-5 jours pour un mélange de primaires et de boues activées.

- Dans un deuxième temps, a lieu l'évaporation liée, en faisant appel a des forces extérieures comme les conditions météorologiques .l'apparition des fissures augmente la surface de contact avec l'atmosphère qui se traduit par une évaporation plus intense.

Cette deuxième phase dépend de plusieurs facteurs tel que la température, l'humidité relative de l'air au contact de la boue, de l'épaisseur de la boue et de ses propriétés physico-chimiques. . (Gaid.A, 1984)

Les aires de séchages sont en général constituées d'une couche de 10-20cm de sable lavé de 0,5 a 1,5 mm, disposé sur une couche de graviers fins(5 a15 mm) sous laquelle 15 a20 cm de gros graviers (10 a40 mm)assurent la circulation de l'eau filtrés qui est recueillie a la base du lit par un réseau de drains .(J.C Bechac et al 1984)

2-2-2.Déshydratation mécanique :

Pour les stations d'épuration physico-chimique ou biologiques des eaux résiduaires urbaines et industrielles, produisant des volumes de boues importants, on est évidemment conduit a rechercher des techniques de séchage plus élaborées, permettant d'aboutir plus rapidement a un résultat.

On a recours pour cela a la déshydratation mécanique, avec mise en œuvre de moyens artificiels procurant une amélioration sensible du rendement productif par rapport aux moyens naturels.

Il faut cependant noter que la présence, dans la plupart des boues urbaines ou industrielles, d'une fraction élevée de colloïdes organiques ou minéraux a caractère hydrophile ne permet pas toujours de bien séparer solide et liquide au moyen de la seule énergie mécanique.

Pour rendre alors les boues aptes a la dessiccation mécanique, il est nécessaire de conditionner au préalable ces suspensions, concentrées en matières solides plus ou moins hétérogènes, dans le but de rompre leur stabilité colloïdale (eckflender,vandevenne,L)

Elle a pour objectif l'élimination de la majeure partie de l'eau contenue dans la boue et l'obtention d'un déchet solide facilement manutentionnable et de volume réduit ; la boue après déshydratation présente une teneur en eau de l'ordre de 60%. (Colin ,1990).

2-2-2-1. La filtration sous vide :

C'est le procédé le plus utilisé pour la déshydratation des boues .il existe diverses techniques de filtration sous vide dont le plus utilisé est le filtre a tambour rotatifs.

Il est constitué de compartiment qui dans leur partie inferieure baignent dans la boue a filtrer, alors que les compartiments ne contenant pas des boues restent sous vide. Ceux qui se présentent de nouveau a l'immersion sont soumis a une pression d'air qui favorise le décrochage du gâteau .chaque compartiments passe respectivement dans trois zones :

-la zone de formation du gâteau.

-la zone d'essorage.

-la zone de charge (par soufflage d'air comprimé ou par toile sortie).

La filtration sous vide est une des méthodes les plus courantes de déshydratation des boues d'eaux résiduaires. La filtration sous vide déshydrate une suspension par application du vide à travers un milieu poreux qui retient les matières solides mais permet au liquide de le traverser. Les médiats utilises sont des tissus, des tamis métalliques ou des ressorts a boudins très serres.

Dans l'opération de filtration sous vide, un tambour rotatif plonge dans la cuve contenant la suspension et les matières solides sont retenues a la surface du tambour sous application du vide.

L'immersion du tambour peut varier de 12 à 60 %. Tandis que le tambour tourne dans la suspension, un gâteau se constitue sur la partie immergée et l'eau est éliminée par filtration à travers les matières déposées et le medium filtrant. Le temps pendant lequel le tambour reste immerge dans la suspension est le temps de formation. Lorsque le tambour émergé, le gâteau déposé est encore desséché par transfert de liquide dans l'air qui traverse le gâteau par suite de l'application du vide. Cette phase est appelée temps de séchage (**Degrement, 2005**).

2-2-2-2. La filtration sous pression :

La filtration sous pression est applicable a presque toute espèce de boue résultant de traitement d'eau industrielle ou d'eau résiduaire.

Dans le filtre-presse, la boue est pompée entre des plateaux munis d'une toile filtrante appropriée. Le filtrat traverse les toiles tandis que les matières solides s'accumulent

dans les chambres formées par les plateaux (couverts par les toiles). Les médiats filtrants (ou toiles) peuvent éventuellement être munis d'une précouche (avant passage de la boue). Au terme de la filtration, quand les chambres ont été remplies (et que les gâteaux ainsi formes ont atteint une siccité suffisante), les plateaux sont séparés pour l'enlèvement (ou déchargé) des gâteau (**Degremont 2005**)

2-2-2-3.Centrifugation :

La centrifugation est une technique de séparation solide-liquide, dont le principe qui relève de la loi de la pesanteur peut être assimilé a une sédimentation accélérée en raison de l'augmentation artificielle du champ de la gravitation par l'action de la force centrifuge.

Le but de la centrifugation est d'obtenir une vitesse de chute maximale des particules compatibles.

Fondamentalement l'appareil est composé de :

- d'un bol entraîné en rotation par un groupe motoréducteurs.
- d'un convoyeur, a vis hélicoïdale a filet simple ou multiple, tournant a une vitesse légèrement supérieur a celle du bol.

On distingue deux principaux types de centrifugeuses :

- à axe verticale.
- a axe horizontal qui sont les plus courants et différent les uns des autres par la forme du bol de la centrifugeuse qui peut être cylindrique, conique ou cylindro-conique. . (**J.C Bechac et al ,1984**)

Conclusion :

Le conditionnement constitue une étape essentielle dans le traitement des boues, il permet l'introduction de la boue a la déshydratation, donc un conditionnement adéquat est a la base du bon fonctionnement de la déshydratation. La déshydratation facilite l'élimination finale de la boue (son transport, son épandage et son traitement

Introduction :

L'électrocoagulation est un procédé électrochimique utilisé sur certains effluents, réalise essentiellement une coagulation floculation selon les processus suivants:

- création d'un champ électrique entre électrodes favorisant les rencontres entre charge présente dans l'effluent.
- libération d'ions métallique (fer, aluminium) par dissolution d'anodes solubles, ions qui bien dispersés dans l'ensemble des fluides, initient les mécanismes de coagulation floculation.

L'électrocoagulation-floculation est un procédé d'électrolyse à électrodes solubles qui met en solution un cation métallique (Fe^{3+} , Al^{3+}) provoquant la coagulation des colloïdes. L'électrolyse a également une action sur les composés solubles oxydables ou réductibles contenus dans l'effluent.

3-1.Historique du procédé d'électrocoagulation :

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

La même année, une station d'épuration fut construite sur la base de ce brevet, à Salford (Grande-Bretagne) pour traiter les eaux polluées urbaines.

En 1909, Harries dépose un nouveau brevet sur ce procédé : les anodes étaient alors constituées par des plaques de fer et d'aluminium.

En 1912, deux autres stations de traitements des eaux usées furent construites sur ce principe, aux Etats-Unis. Cependant, leur fonctionnement fut stoppé, quelques années plus tard (1930), en raison du coût qui étaient deux fois plus élevé que celui d'un traitement classique.

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

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

Les recherches se sont poursuivies sur les effluents de caractéristiques très différentes : Holden (1956) s'intéresse à la possibilité de traiter les eaux de surface

pour la production d'eau potable alors que Sadek (1970) propose un traitement des eaux usées en éliminant les phosphates par EC.

Back et coll. (1974) emploient le procédé pour le traitement des effluents issus des industries agro-alimentaires.

En 1975, Strokach en URSS, évoque divers « électrocoagulateurs », permettant le traitement et le recyclage des eaux usées pour une éventuelle réutilisation en agriculture.

En 1980, de nombreux travaux ont été présentés par des chercheurs russes sur l'électrocoagulation comme moyen de traitement efficace des eaux usées.

Enfin, en 1984, Vik réalise un travail conséquent démontrant la possibilité de produire de l'eau potable par le procédé d'électrocoagulation à partir des eaux naturelles norvégiennes fortement chargées en substances humiques.

En dépit de ces nombreuses recherches, le procédé d'EC a marqué un net recul en raison de l'évolution des autres procédés de traitement des eaux qui sont apparues plus simples et moins coûteux. Ainsi l'électrocoagulation s'est finalement peu développée jusqu'au début des années 90.

Le développement de la législation concernant les rejets d'eaux polluées en milieu naturel, ainsi que l'avancement des recherches dans les différents procédés électrochimiques ont dans les années 80, réactualisé l'électrocoagulation qui a alors connu un regain d'intérêt.

Les efforts récents concernant le développement des procédés propres de traitement des eaux, ont permis à l'électrocoagulation de prendre de l'importance, offrant ainsi un coût d'investissement et de traitement compétitif, et une large efficacité d'élimination de polluants. Les industries de traitement de surface ont été les premières à instaurer des procédés d'électrocoagulation, en France, dans les années 90. Depuis, la technologie des procédés d'EC ne cesse d'être développée et améliorée dans des domaines industriels variés (textile, agroalimentaire, semi - conducteurs...).

L'importance de l'électrocoagulation s'est accrue du fait de son efficacité, généralement supérieures aux autres techniques, pour éliminer les différentes formes de pollution, répertoriées par les indicateurs suivants: (**M .Bennajah 2007**)

- DCO : Demande chimique en oxygène,
- DBO : Demande biologique en oxygène,
- COT : Carbone organique total,

- MES : Matières en suspensions,
- TDS : Taux de solides dissous,
- TAC : Taux alcalimétrique complet,
- Les métaux lourds,
- ABS : Coloration liée à l'absorbance de l'effluent

3-2. Définition et principe du procédé :

L'électrocoagulation est une technique de séparation alternative à la coagulation floculation qui permet la formation des cations métalliques *in situ* par électrolyse d'anode métallique soluble suite au passage du courant. Il s'en suit une concentration des espèces solubles. Il s'agit, d'imposer un courant (ou potentiel) entre deux électrodes (fer ou aluminium) colloïdales dans la région proche de l'anode. Les cations coagulants et les hydroxydes métalliques vont alors « interagir » avec les particules colloïdales chargées négativement et permettent la neutralisation de leur charge et leur coagulation (Matteson *et al.*, 1995 ; Parga *et al.*, 2005a ; Ofir *et al.*, 2007). La figure II-1 présente le principe du procédé avec des électrodes d'aluminium. (V. Pallier 2008).

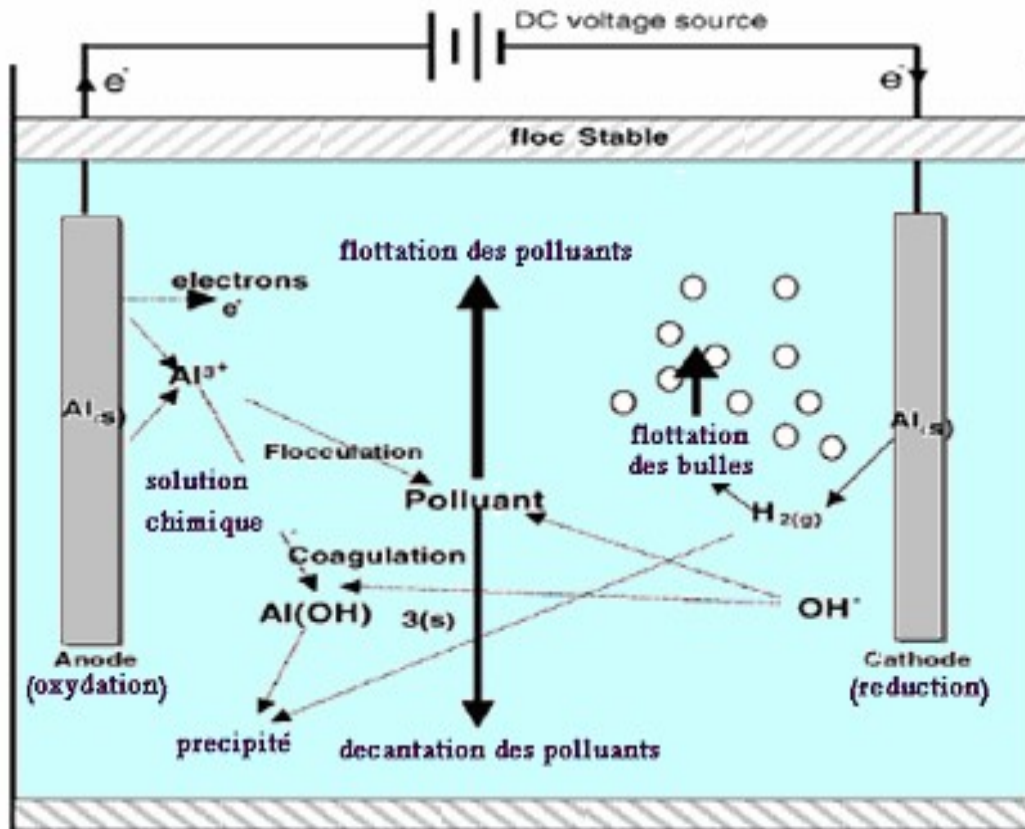


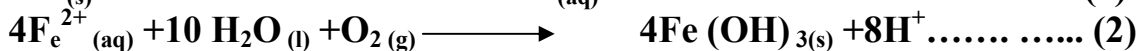
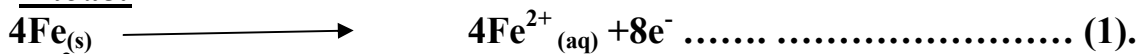
Figure II-1 : Principe du procédé d'électrocoagulation.

3-3.Mécanisme du procédé :

L'électrocoagulation se caractérise par une génération d'ions métalliques (Fe^{2+} ou Al^{3+}) due à l'oxydation de l'anode (équations 1 et 5). Les ions métalliques réagissent à leur tour avec les ions hydroxydes (OH^-) produits à la cathode avec un dégagement d'hydrogène (H_2) (équations 3 et 7). Les matières en suspension interagissent avec les bulles de gaz pour former des floes qui seront ensuite concentrés, collectés et éliminés. Ce processus contribue aussi à une coagulation par neutralisation des particules colloïdales chargées négativement. À titre d'exemple, l'oxydation du fer dans le système électrolytique produit l'hydroxyde de fer ($\text{Fe}(\text{OH})_n$) où n est égal à 2 ou à 3 (équations 2 et 6). Deux mécanismes ont été proposés pour expliquer la formation de $\text{Fe}(\text{OH})_n$ (DANESHVAR *et al*, 2003; LARUE *et al*, 2002; MOLLAH *et al.*, 2001) :

- Premier mécanisme :

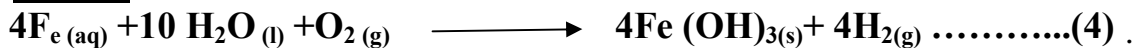
Anode:



Cathode:

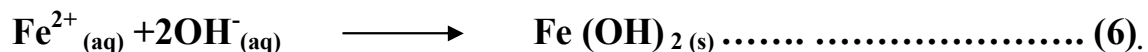
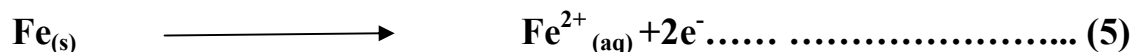


Global:

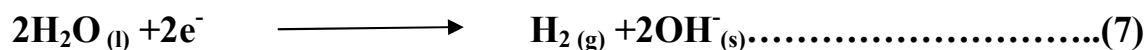


- Deuxieme mécanisme:

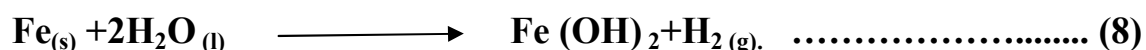
Anode:



Cathode:



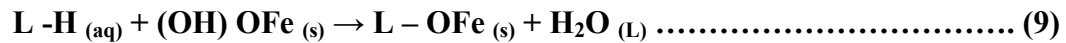
Global:



L'hydrogène produit par la réaction participe donc à la flottation des floes et favorise l'élimination des matières en suspension que l'élimination des composés organiques dissous adsorbés partiellement sur les floes.

Le $\text{Fe}(\text{OH})_n$ (s) reste dans la solution aqueuse comme une suspension gélatineuse, qui peut éliminer les polluants de l'eau usée, soit par :

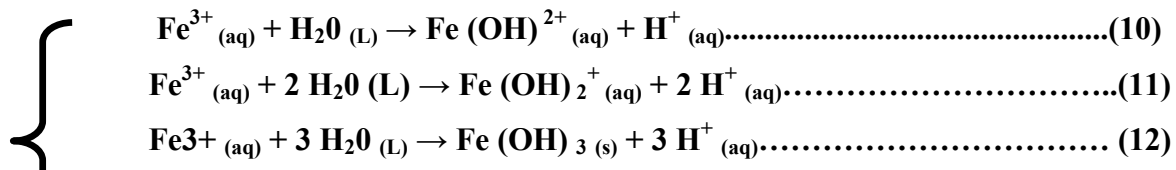
- **Complexations de surface:** le polluant est comme un ligand (L) qui se fixe chimiquement à l'ion hydrate $\text{Fe}(\text{OH})_n$ (s) .



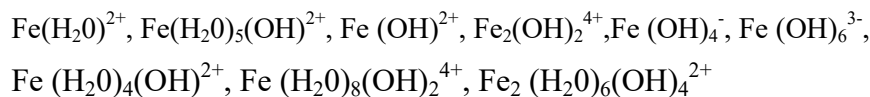
- **Attraction électrostatique:**

Les particules d'oxyde de fer hydratées possèdent des zones chargées positivement et négativement, qui vont attirer les zones opposées des polluants, et les éliminer de la solution.

L'ion Fe^{3+} subira une hydratation, la forme du modèle dépendra du pH ; et sous les conditions acides ; nous aurons les réactions suivantes (A.Guediri 2008):



On peut avoir aussi d'autres forme hydratés de l'ion Fe^{3+} , qui depend du pH du milieu :



Ces complexes jouent le rôle de coagulant, Ils s'adsorbent sur les particules, et annulent ainsi les charges colloïdales, ce qui conduit à déstabiliser l'émulsion. Ce rôle est similaire à celui des coagulants chimiques dans les traitements classiques.

Les proportions des produits d'hydrolyse du fer en fonction du pH sont représentées par La **Figure II.2**

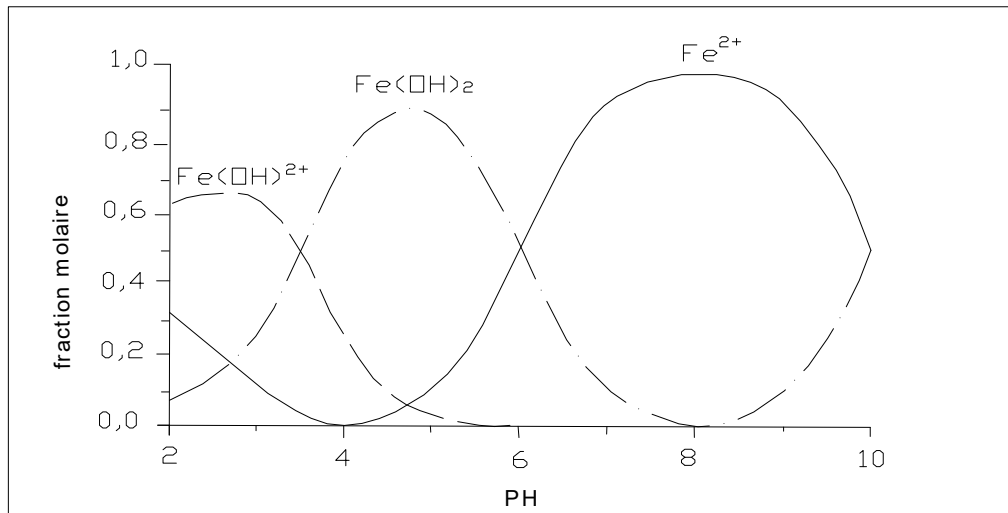


Figure II.2 : Proportions des produits d'hydrolyse du fer en fonction du pH (A.Guediri 2008)

3-4. Paramètres influençant le processus d'électrocoagulation

3-4.1. Température:

L'élévation de la température permet d'augmenter la vitesse des réactions électrochimiques et la diffusion, donc elle favorise l'électrocoagulation.

3.4.2 .Agitation :

L'agitation de la solution à traiter en «électrocoagulation » se fait par :

- Migration des ions sous l'effet du champ électrique
- Diffusion sous l'effet des gradients de concentration localisent principalement au voisinage des électrodes.
- Convection sous l'effet de la circulation de l'électrolyse.

3.4.3 .Potentiel d'électrode :

La différence de potentiel appliquée entre les deux électrodes (Figure 2.3) est due essentiellement à trois composantes :

- Potentiel thermodynamique (E_0) nécessaire à la réaction et qu'il est impossible de limiter.
- Les surtensions d'électrodes (E_s) qui dépendent de la nature des produits hydrolyses et de la nature des électrodes.

La chute ohmique (RI) qui dépend essentiellement de la distance inter électrodes et de la conductivité de la solution. L'énergie perdue est alors dissipée sous forme de chaleur. (A.Guediri 2008)

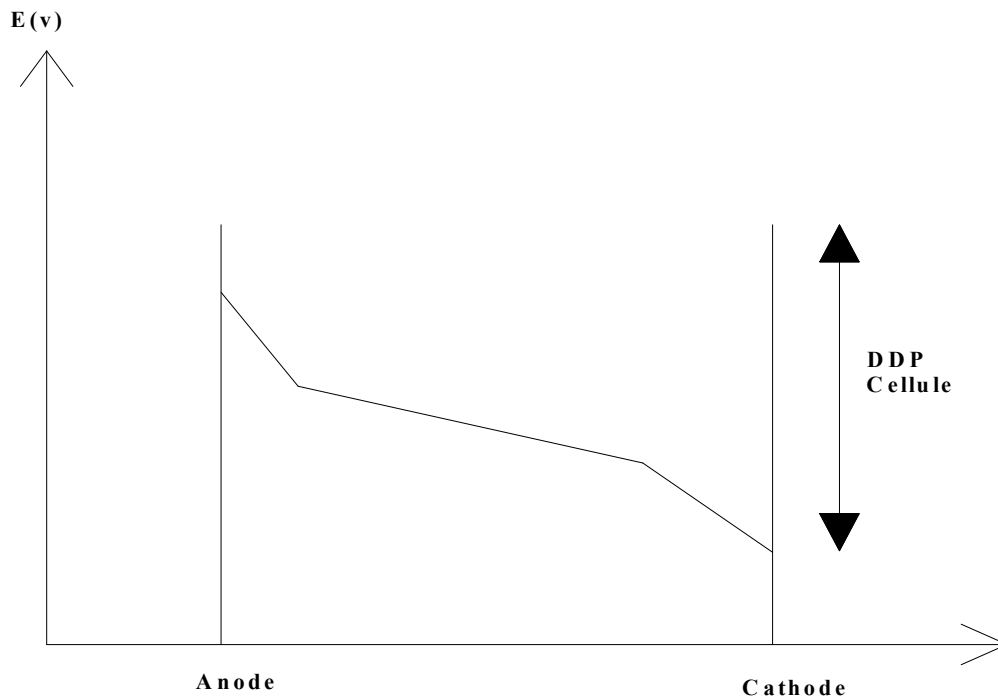


Figure II.3 : Evolution de la tension entre les électrodes.

3.4.4. Flottation

L'intérêt de la flottation est que la vitesse ascensionnelle des particules est bien plus importante que la vitesse de décantation. Les floes formés sont plus hydrophobes, ils ont tendance à se fixer sur les bulles de gaz pour remonter à la surface. De manière générale, plus le rapport surface/volume des particules est grand, plus elles pourront fixer les microbulles.

3-5.Paramètres fondamentaux du procédé d'électrocoagulation :

L'efficacité du processus d'électrocoagulation est liée à plusieurs paramètres dont les plus importants sont :

- le pH de l'eau à traiter.
- la conductivité, pour diminuer la chute ohmique et donc la consommation énergétique, on peut agir sur la conductivité de la solution à traiter.

- la densité du courant.
- Matériau utilise.
- la distance entre électrodes.
- la surface immergée des deux électrodes.
- le temps d'électrolyse.

3.5.1. pH de la solution à traiter

Le pH de la solution détermine la spécification des ions métalliques. Le pH influence l'état des espèces en solution et la solubilité des produits formes. Ainsi le pH de la solution affecte le rendement global et l'efficacité de l'électrocoagulation. Le pH de la solution peut être aisément change. Un pH optimal semble exister pour un polluant donne, par exemple une valeur de pH optimum égal à 7 pour les eaux usées de restaurant. (A.Chafou 2007)

3.5.2 .La conductivité :

Pour diminuer la chute ohmique et donc la consommation énergétique on agit sur la conductivité de la solution a traiter. L'ajout de chlorure de sodium est utilisé pour accroître la conductivité de la solution. Les ions chlorure permettent aussi d'éviter la passivation des électrodes. Le problème de la conductivité constitue un inconvénient majeur au fonctionnement du procédé d'électrocoagulation. (A.Chafou 2007)

3.5.3. Densité de courant

La densité de courant (i) ; est le courant délivre à l'électrode divisée par l'aire active de l'électrode. Pour contrôler aisément ce paramètre il suffit donc de contrôler le courant. La densité de courant détermine à la fois la vitesse de dosage métallique électrochimique et la densité de production électrolytique des bulles.

3.5.4. Matériels utilisés

Le matériau d'électrode influence visiblement la performance du réacteur d'électrocoagulation le matériau de l'électrode détermine le cation introduit en solution. Plusieurs chercheurs ont étudié le choix du matériau de l'électrode avec une variété de théories quant à la préférence d'un matériau particulier. Les plus communes des

électrodes étaient des plaques d'aluminium ou de fer cités par Vik et col, et Nocikova et col, en raison de leur bas coût, disponibilité et efficacité. (A.Guediri 2008)

Do et Chen comparent la performance des électrodes en fer et en aluminium pour éliminer la couleur de solution contenant des colorants. Leur conclusion était que les conditions optimales d'électrocoagulation varient avec le choix des électrodes en fer ou en aluminium, qui est à son tour déterminé par :(A.Guediri 2008)

- Concentration initiale de polluant
- Type de polluant
- Vitesse d'agitation.

Un groupe de chercheurs (Baklan et Kolesnikova) examinera la relation entre " taille " du cation introduit et efficacité d'élimination de déchets organiques. La taille du cation produit (10 - 30) μm pour Fe^{3+} comparé avec 0.05 - 1 μm pour AL^{3+}) suggère a la contribution de

L'efficacité la plus élevée pour les électrodes en fer, leur conclusion est basée sur une seule expérience, utilisant la demande chimique en oxygène comme leur seule mesure.

Hulser et col observent que l'électrocoagulation est fortement améliorée sur des surfaces en aluminium en comparaison avec l'acier, Ceci est attribué à l'efficacité plus élevée due à la formation in situ de complexe d'hydroxydes d'aluminium par hydrolyse de l'ion aluminate, qui ne se présente pas avec des électrodes en acier. (A.Guediri 2008)

3.5.5. Espace entre électrodes

Pour limiter les chutes ohmiques et les consommations de courant, il est suggère que l'espace entre les deux électrodes soit faible de (1 -2) cm. (A.Guediri 2008)

3.5.6. Temps d'électrolyse

L'accroissement du temps augmente la qualité du filtrat et la filtration des floes. Il y a donc un optimum à trouver pour avoir une meilleure séparation.

3.5.7. Passivation

L'une des plus grandes questions opérationnelles avec l'électrocoagulation est la passivation des électrodes. La passivation des électrodes est en rapport avec la longévité du processus, La passivation des électrodes en aluminium a été largement observée dans la littérature (Nikolaev et col), Novikova et col, Osipenko et Pogorelyi.)

Osipenko et Pogorelyi observèrent également que durant l'électrocoagulation avec des électrodes en fer, des dépôts de carbonate de calcium et d'hydroxyde de magnésium étaient formés à la cathode et une couche d'oxyde formé à l'anode. Nikolaev et col examinent diverses méthodes de prévention et / ou de contrôle de passivation des électrodes: (**A.Guediri 2008**)

- Changement de polarité des électrodes,
- Introduction d'agents inhibiteurs,
- Nettoyage mécanique des électrodes.

Selon ces chercheurs, la plus rentable et fiable méthode de maintenance des électrodes, était de nettoyer mécaniquement les électrodes à certaines périodes.

3.6. Résultats des travaux d'électrocoagulation :

L'électrocoagulation a largement été appliquée avec succès par différents chercheurs pour le traitement d'effluents de nature diverses :

En 1991, **biswas et al** ont étudié la déstabilisation d'une émulsion synthétique par un traitement électrochimique.les électrodes étaient en acier inoxydable .les essais ont donné une efficacité d'élimination de l'huile de 96% avec un courant de 100V, un temps d'électrolyse de 16mn et un ajout de sulfate ferrique de 150 mg/l.ces auteurs ont montré que la polarité des électrodes est importante dans la déstabilisation des émulsions.

En 2000,**xueming chen et al** ont étudié la séparation des polluants des eaux usées de restaurant par électrocoagulation ,avec des électrodes en aluminium et en fer.une bonne élimination d'huile a été donné par des électrodes en aluminium et pour une densité de courant comprise entre 30-80A/m²,l'ajout de NaCl n'améliore pas l'efficacité d'élimination des huiles mais il réduit l'énergie consommée. L'utilisation d'une densité de courant élevée entraîne une diminution dans le temps de rétention .l'efficacité d'élimination de l'huile est de 94%.

L'électrocoagulation a été utilisé pour l'élimination des nitrates (**koparal et Ögutveren 2002 ;kumar et al .,2010**) d'arsenic(**kumar et al .,2010**) et des phosphates (**irdemz**

et al.,2006)retrouvés dans les eaux de surfaces et le sol ;surtout dans les zones ou l'agriculture et la principale industrie, sachant qu'il sont responsables d'un problèmes majeurs qui est l'eutrophisation.

Le traitement d'eau pollué par les rejets d'une industrie de raffinage ;caracterisé par une teneur élevée en matières en suspensions ,une DCO supérieure a 500mg/l ;une concentration en cuivre de l'ordre de 100mg/l a permis d'atteindre 99% d'élimination du cuivre et de 75% de DCO par électrocoagulation en utilisant des électrodes en fer et en aluminium (**chen et al 2003**).

Koby et al (2006) ont traité par électrocoagulation des rejets d'usine de pomme de terre très chargés en composés organiques incluant des carbohydrates ,amidon, protéines ,vitamines, pectines et sucres qui sont responsables de grande DCO ,DBO et matières en suspensions.

Des chercheurs turks (**ugurlu et al. 2008**) ont réussi a réduire la lignine et le phénol des effluents de papeteries par electrocoagulation.ils ont prouvé que celle –ci pouvait être une alternative efficace pour le traitement de ce genre d'effluents.

Parama kalyani et al (2009) ,ont étudié l'élimination de la couleur et de la DCO dans les eaux usées issues des rejets papeterie par électrocoagulation en utilisant deux types d'électrodes (acier et aluminium) .ils sont arrivés a enregistrer des taux d'abattement de la couleur de 92% et de 84% pour l'électrode d'acier et d'aluminium respectivement et des taux d'abattement de la DCO de 95% et 89% pour les mêmes électrodes respectivement.

Une étude comparative entre les électrodes d'aluminium et de fer dans le procédé d'électrocoagulation de traitement des eaux de rinçage riche en phosphate et en zinc d'une usine de véhicules a été effectuée par **koby et al 2010** les conditions optimales pour atteindre les taux d'abattelements de 99.8% et 96.7% de phosphates et du zinc respectivement étaient à pH 5,une densité de courant de 60A/m² et un temps de traitement de 25mn pour l'aluminium, tandis que pour le fer le pH était de 3 ,le temps de traitement était de 15mn pour une même densité de courant afin d'obtenir des abattement de 97.7% et 97.8% des phosphates et du zinc respectivement.

Le traitement d'une eau potable de la ville d'Anar située dans la partie nord-ouest de Kerman a Iran, caractérisée par des teneurs élevées en calcium et dureté totale, a permit d'atteindre 98.2% d'élimination de calcium et 97.4% de la dureté totale par électrocoagulation en utilisant des électrodes de fer .ces résultats ont été obtenus a un

pH de 10 ,une tension de 12V et un temps de traitement de 60mn(**Malakootian et al** ,2010) .

Labanowski et al (2010) affirme que l'électrocoagulation est une technologie puissante pour le traitement de lixiviat de décharge .cette technique permet de réduire significativement les concentrations en contaminants tel que la matière organique, l'ammoniaque, les métaux lourds et la couleur

3-7. Historiques des applications du procédé d'électrocoagulation.

<i>DATE</i>	<i>AUTEURS</i>	<i>Type d'électrode</i>	<i>APPLICATIONS</i>
1909	Harries	AL+Fe+sel de cuivre	Eaux usées urbaines
1946	Stuart	AL	
1947	Bonilla		
1956	Holden	AL	Eau de surface
1970	Sadek	AL+Fe	Eau riche en phosphates
1974	Beck et al		Effluents de l'industrie agroalimentaire
1982	Carlson	AL	Eau très chargée en substances humiques
1984	Ehdaie et al		Eaux usées urbaines
1985	Pazenko	AL +Fe	Emulsion d'huile
1988	Renk		Eau riche en sable bitumeux et schiste pétrolifère
1989	Ryan et al	AL	Suspension d'argile
1992	Gao et al		Eau de teinture et d'impression
1996	Lin et al		Effluents de l'industrie textile

1999	Abuzaid et al		Eau riche en dérivés des nitrates
2000	Chen et al		Rejets liquides des industries de restauration
2002	Wong et al	AL +Fe	Désinfection d'effluents biologiques
2003	Shen et al	AL	Eau industrielle chargée en fluors
2006	Danshvar et al	Anode Fe cathode acier	Solution basique de colorant
2007	Bennajah. M	Al	Rejets industriels liquide
2007	Drogui et al	Al et Fe	Effluent d'agro-industries.
2008	Arslan Alaton	Al, acier inox	Effluent réel réactif de bain.
2009	Inoussa Zongo		Traitement de deux effluents textile et un effluent de tannerie.

Tableau II-1 : historique du procédé d'électrocoagulation.

3-8. Avantages et inconvénients du procédé :

Le procédé d'électrocoagulation présente aussi bien des avantages que des inconvénients :

3-8.1. Avantage :

- 1- L'électrocoagulation nécessite un équipement simple avec un mode opératoire facile laissant suffisamment de latitude pour régler les problèmes de manipulation éventuelle
- 2- L'électrocoagulation évite l'utilisation de réactifs chimiques, de telle sorte qu'il n'y ait aucun problème de neutralisation des réactifs en excès et aucune possibilité de pollution secondaire par les substances chimiques ajoutées comme dans le cas des

traitements chimiques des eaux usées. Cette absence de réactifs chimiques rajoutés permet d'assurer avec succès un traitement biologique réalisé en aval.

- 3- L'efficacité des procédés d'électrocoagulation a déstabilisé les polluants colloïdaux très fins grâce au champ électrique qui les met en mouvement. Comparé au procédé chimique qui nécessite des étapes de traitements plus lentes et des quantités de coagulants plus élevées.
- 4- Les bulles d'airs produites peuvent entrainer les polluants a la surface de la solution a traiter ou ils peuvent être facilement concentrés, rassemblés et éliminés.
- 5- L'électrocoagulation offre la possibilité de réduire remarquablement de nombreuses pollutions et composés dissous tel que la DCO, MES, les métaux lourds, les nitrites, les silfures, les cyanures, les sulfites, les chromates et les ions fluorures.
- 6- L'utilisation de l'électrocoagulation permet de réduire le temps de traitement ; ce procédé permet aussi un grand gain en compacité des installations et une possibilité d'automatisation.
- 7- La technique d'électrocoagulation peut être utilisée en association avec d'autres techniques de traitement
- 8- .La biodégradabilité des effluents traités par électrocoagulation est améliorée, Cette amélioration est due à la non-toxicité de la forme aluminium utilisée et de la faible salinité dans le milieu. (Annane.O ; 2008)

3-8.2.Inconvénients :

- 1- Les électrodes sacrificielles sont dissoutes dans l'eau usée par effet d'oxydation ce qui nécessite le remplacement régulier de ces électrodes.
- 2- Un film imperméable d'oxyde sur la cathode peut être formé, ce qui conduit à une perte d'efficacité de l'unité d'électrocoagulation.
- 3- L'utilisation de l'électricité peut devenir chère voire difficile dans certaines régions.
- 4- L'effluent à traiter doit donc être un électrolyte ce qui impose un ajout de sel (généralement (NaCl) pour certains effluents faiblement conducteurs.
- 5- La maintenance des installations est parfois lourde. Le nettoyage et le changement des électrodes impliquent une perte de temps due à l'arrêt du procédé au cours de ces opérations. (**Annane.O ;2008**)

Objectif de l'étude expérimentale :

Parmi les méthodes traditionnelles du conditionnement chimique des boues est la coagulation-floculation à l'aide de sels minéraux. Une technologie évolutive, l'électrocoagulation est appliquée aujourd'hui pour le conditionnement électrochimique des boues.

Le but de notre expérimentation vise à réaliser un conditionnement des boues de la STEP de Beni-Messous à l'aide des électrodes de fer suivi d'une déshydratation (filtration sous-vide). Ce test de filtration permettra de calculer la siccité de la boue et la résistance spécifique à la filtration (RSF), soit la capacité de la boue à être déshydrater.

L'effet du pH et de la conductivité sur la siccité de la boue a été étudié.

4-1. Présentation de la station d'épuration :

4-1-1. Localisation géographique :

La station d'épuration de Béni Messous est située sur le territoire de la commune d'Ain Benian à environ 15 Km à l'ouest de la ville d'Alger, en bordure de la mer méditerranée et à l'embouchure de l'oued Béni Messous. Elle occupe un terrain de superficie environ 13 hectares.

L'oued Béni Messous naît du côté Est à Bouzareah, traverse les communes de Béni Messous et Chéraga et débouche à l'ouest dans la baie d'El -Djamila. (Selhani, 2009)

4-1-2. Capacité de traitement :

Les communes concernées par le traitement et le taux de contribution de chaque commune au débit rejetés :

- Béni Messous : 100%.
- Chéraga : 80%.
- Dély-Brahim : 80%.
- Bouzéria : 40%.

4-1-3. Ouvrages du traitement des eaux et des boues :

La filière de traitement comprend en totalité et successivement ;

✓ Prétraitement mécanique constituée de :

- . Un déversoir d'orage
- . Dégrillage mécanique grossier
- . Dégrillage mécanique fin

- . Ouvrage de dessablage et déshuilage
- .Chenal de comptage et de mesure.
 - ✓ **Décantation primaire constituée de :**
- . Deux décanteurs primaires circulaires
- .Ouvrages de répartition.
- .Station de pompage de boues primaires.
 - ✓ **Traitement biologique constitué de :**
 - . Deux bassins d'aération avec trois (03) aérateurs de surface chacun.
 - ✓ **Décantation secondaire et pompage des boues en excès constituée de :**
 - . Deux décanteurs secondaires circulaires
 - . Ouvrage de pompage des boues activées et de recirculation des boues
 - . Un canal de comptage et de mesure.
 - .Ouvrage de répartition.
 - **Épaississement et stabilisation des boues constituée de :**
 - . Deux épaisseurs de boues
 - . Station de pompage des eaux troubles
 - . Station de pompage de boues épaissies
 - **Stabilisation des boues constituée de :**
 - . Deux bassins de stabilisation des boues avec deux (02) aérateurs de surface chacun
 - . Station de pompage de boues stabilisée.
 - **Déshydratation de boue constituée de :**
 - . Deux chaînes de déshydratation avec deux filtres à bandes
 - . Station de lavage des filtres à bandes.
 - .Station de préparation de polymères.

4-2.Matériel et méthode :

4-2-1.mode opératoire pour le procédé d'électrocoagulation :

Les essais d'électrocoagulation sont menés sur les boues de la station d'épuration de Béni Messous, le dispositif expérimental d'électrocoagulation est composé de deux électrodes de fer ordinaire (99.8 % de fer et 0.2 % de carbone).

Ces plaques métalliques sont de mêmes dimensions, plongées dans un bêcher contenant **0.5 L** de boue. La surface immergée (active) de chaque électrode est de **37.5 cm²** et la distance les séparant est **d=1cm**, les deux paramètres seront maintenus constants durant

toutes les expérimentations. Les électrodes sont branchées aux bornes d'un générateur (AX 322 MLIAX) de courant continu de tension maximale ne dépassant pas **26 volts**. La tension et l'intensité passant dans la solution sont mesurées respectivement à l'aide d'un voltmètre et d'un ampèremètre. (Fig. III-1 ; fig.III-2)

L'échantillonnage de boues :

Les échantillons de 100ml de boues destinées à la filtration ont été prélevés comme suit :

Une légère agitation est réalisée à l'aide des mains afin d'homogénéiser le contenu du bécher, ensuite on prend la partie inférieure en évitant l'introduction de la mousse parce que cette dernière va influencer sur le test de filtration.

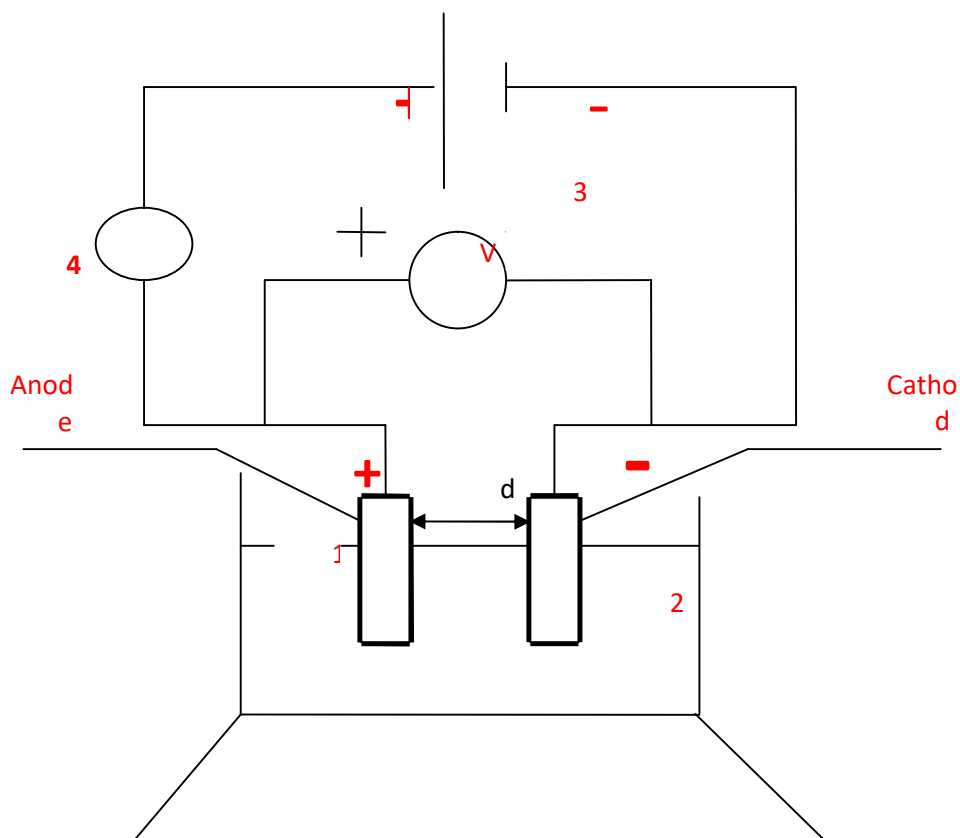


Figure III- 1: Schéma du dispositif expérimental d'électrocoagulation.

1-Anode

4-Ampèremètre

2-Cathode

5-Générateur de courant continu

3-Voltmètre

6 – Agitateur

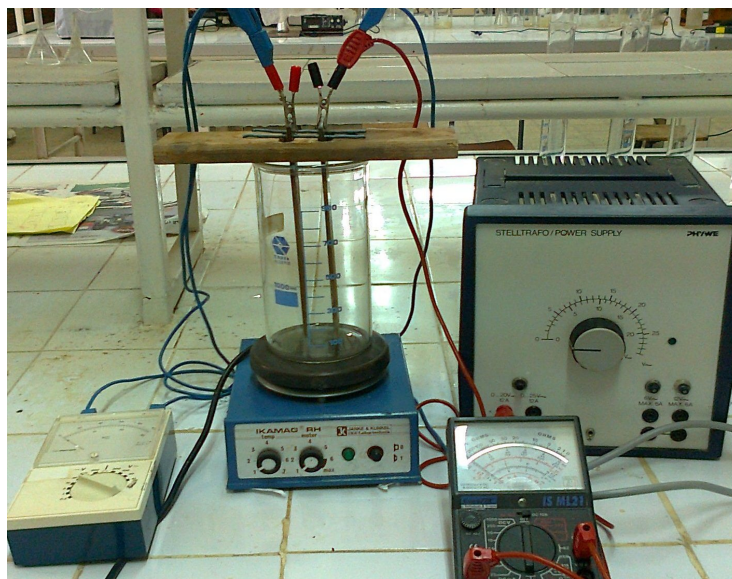


Figure III-2 : Photo du montage expérimentale.

4-2-2matériel utilisé :

- Agitateur magnétique de type **IKAMAG**
- Turbidimètre modele **HACH 2100A**
- pH-mètre type **HANNA pH 209**
- conductimètre de type **TACUSSEL CVRD 62**
- balance analytique modele **YP402N**
- four modèle **Heraus**
- étuve de type **Heraus**
- ampèremètre **ISML21**
- voltmètre modele **PHYWE /07035.00**
- générateur de courant modèle **PHYWE**
- thermomètre
- de la verrerie.

Produits chimiques :

- Acide Sulfurique H_2SO_4
- Hydroxyde de Sodium. $NaOH$.
- Chlorure de Sodium $NaCl$.
- Acide Chlorhydrique HCl .

4-2-3.techniques d'analyses :

a- préparation des électrodes :

Avant chaque essai, les électrodes sont nettoyées, afin d'éviter toutes interférences, comme suit :

- Polissage à l'aide de papier abrasif (pour éliminer la couche de passivation après chaque essai),
- Rinçage à l'eau distillée,
- Dégraissage à l'aide de **NaOH(0,1mol/l)** en trempant les électrodes pendant 20 secondes,
- Rinçage à l'eau distillée,
- Décapage dans une solution à 20% d'acide sulfurique (**H₂SO₄**) à une température ambiante pendant 30 min,
- Rinçage à l'eau distillée.

b-mesure du pH :

Avant et après traitement les mesures on était effectuées :

- ✓ Mettre un volume de filtrat dans un bécher.
- ✓ Introduire l'électrode dans l'échantillon jusqu'à ce que la valeur reste constante.
- ✓ Noter le pH.

c-Mesure de l'Indice de Mohlman :

L'IM est défini par le volume occupe par 1 g de boue sèche après décantation d'une demi-heure.

Introduire dans une éprouvette un litre de boues. Déterminer le volume (en cm³) occupe par les boues après une décantation d'une demi-heure. Déterminer par ailleurs la teneur en matière sèche d'un litre de boue à analyser (en passant à l'étuve a 105 °C). I.M. est représenté par le rapport :(Lassée.C, 1985).

Volume décanté en (cm³/l) en 30min

Résidu sec (g/l)

d- Mesure de la température de la boue

- ✓ On prend un échantillon de boue dans un bécher,
- ✓ On plonge dedans un thermomètre jusqu' à obtention d'une valeur stable,
- ✓ On note la température et on la refait à plusieurs reprises.

e- mesure de la turbidité :

- ✓ Etalonner l'appareil avec les solutions étalons.
- ✓ Remplir la cuvette de mesure de filtrat à tester en vérifiant qu'aucune bulle d'air ne soit présente dans la cuvette.
- ✓ Nettoyer la cuvette à l'aide d'un chiffon propre pour éviter toutes traces de doigts, ou d'autres traces qui peuvent fausser la lecture de la turbidité
- ✓ Mettre la cuvette dans sa place
- ✓ Noter la valeur de la turbidité

f-mesure de la conductivité électrique:

- ✓ Mettre un volume de filtrat dans un bécher.
- ✓ Introduire l'électrode dans l'échantillon jusqu'à que la valeur reste constante.
- ✓ Noter la valeur de la conductivité.

g- Matière sèche MS et siccité S :

C'est le paramètre principal de la définition de la filière de traitement des boues et surtout un des plus faciles à mesurer. la matière sèche MS et mesurer en g/L .rapporte à la masse totale de boue, on l'exprimera en fraction massique S qui correspond à la siccité. **(J.P.Bechac et al 1984)**

Mode opératoire :

- ✓ Peser le gâteau humide dans une capsule tarée.
- ✓ Porter la capsule à l'étuve à 105°C pendant 24 heures.
- ✓ Retirer la capsule de l'étuve et peser.

Soient :

-M0 : le poids de la capsule vide (en g),

-M1 : le poids de la capsule contenant l'échantillon brut,

-M₂ : le poids de la capsule contenant l'échantillon sec.

Le taux de matières sèches en pourcentage est donné par :

$$MS = \frac{M_2 - M_0}{M_1 - M_0} * 100 \quad (\%)$$

h-Matière en suspension MES :

- ✓ Peser le gâteau humide dans une capsule tarée.
- ✓ Porter la capsule à l'étuve à 105°C pendant 24 heures.
- ✓ Retirer la capsule de l'étuve et peser.

Soient :

-M₀ : le poids de la capsule vide (en g),

-M₁ : le poids de la capsule contenant l'échantillon sec.

Le taux de matière en suspension en g/l est donné par :

$$MES = \frac{M_1 - M_0}{V} * 1000 \quad (\text{g/l}).$$

i-Résidu calciné à 550°C et matière volatile :

C'est la quantité de matière organique contenue dans les matières en suspension. En première approximation on considère que : MV (matière volatile) = MO (matière organique).

La matière sèche est portée pendant 2 heures à 550°C dans un four à moufle, préalablement chauffé, et thermostaté.

La résistance spécifique à la filtration:

Définition

La résistance spécifique à la filtration r est définie comme étant la résistance qu'oppose à la filtration (ou cheminement du filtrat) une quantité de gâteau déposée sur 1 m² de surface filtrante et contenant 1 kg de produit sec.

Principe

Le processus de filtration est régi par des lois telles que :

La loi de Darcy

Le débit de filtrat (d_v/dt) par unité de surface A est proportionnel à la pression appliquée P et inversement proportionnel à la viscosité dynamique μ du fluide

Méthode de CARMAN

Dans sa théorie sur la filtration CARMAN a propose une équation différentielle dont l'intégration a P constante conduit a la relation du type :

$$\frac{t}{v} = a.v + b$$

$$\text{Avec } a = \frac{\mu.W}{2.P.S^2} \times r \quad b = \frac{\mu.R_m}{P.S}$$

$$\frac{t}{v} = \frac{\mu.W}{2.P.S^2} \times r + \frac{\mu.W.m}{P.S}$$

Ou **t** : temps (s)

v : volume du filtrat au bout du temps t (en m³)

μ : viscosité dynamique de la boue (Pa.s)

r : résistance spécifique a la filtration (m.kg⁻¹)

w : masse déposée par unité de volume du filtrat (kg.m⁻³)

S : surface de filtration (m²)

P : Pression en Pascal (Pa)

R_m : résistance de la membrane.

R_m est négligeable dans le cas des boues, par rapport a la résistance spécifique r du gâteau.

Donc : R_m est négligé.

Il existe une relation linéaire entre t/v et v. Soit α la pente de cette droite, on aboutit a :

$$r = \frac{2.\alpha.P.S^2}{\mu.W}$$

Ou α est la pente de la droite de Carman.

Mode opératoire :

- ✓ Equiper la cellule de mesure en plaçant successivement sur le fond perforé, le disque de toile filtrante puis le papier filtre,
 - ✓ Humidifier le papier filtre et appliquer une légère surpression pour assurer l'étanchéité du fond de la cellule et éliminer l'excès d'eau retenu par le filtre,
 - ✓ Ajuster l'éprouvette sous l'entonnoir de la cellule,
 - ✓ Verser l'échantillon de boue (100 ml) dedans,
 - ✓ Noter le volume du filtrat soit V_0
-
- ✓ appliquer la pression voulue soit 0,5 bar. et veiller à ce qu'elle soit constante tout au long de l'essai.
 - ✓ Déclencher le chronomètre et noter le volume du filtrat déjà recueilli.
 - ✓ Noter le volume du filtrat recueilli au cours de l'essai pour les différents temps de filtration.
 - ✓ L'essai est conduit jusqu'à essorage du gâteau. (fig. 3-3)



Figure III-3 : Photo du dispositif de filtration.

Le dispositif de filtration comprend :

- Un erlenmeyer de 2 litres

- Un Buchner.
- Une éprouvette graduée.
- Un caoutchouc isolant
- Papier filtre normal
- Une pompe à vide réglé permettant d'établir un vide de 0,5 bar

4.3.Expression des résultats :

4.3.1. Energie consommée

P (kWh/m³) est donné par la relation suivante:

$$P = U \cdot I \cdot t / V \cdot 1000 \dots \dots \dots (13)$$

Avec :

- P : énergie consommée (kWh /m³),
- U : tension appliquée (V),
- I : intensité de courant (A),
- t : temps d'électrocoagulation (h),
- V : volume d'eau traitée (m³).

4.3.2 La concentration en fer dissous

La concentration en fer dissous en fonction du temps sous l'action de l'électrolyse peut être calculée par la loi de Faraday ; Cette loi permet d'accéder à la quantité théorique de fer dissous à l'anode connaissant la quantité d'électricité utilisée dans le réacteur. La quantité de fer dissous en gramme est calculée par l'expression (**A.Guediri 2008**) :

$$m = I \cdot T \cdot M / Ne \cdot F \dots \dots \dots (14)$$

Avec :

- m : masse de fer dissous (g)
- I : intensité de courant (A)
- T : temps (s)
- M : masse molaire de l'élément de fer (55,85g/mol)
- F : constante de Faraday (96500c/mol)

- **Ne** : nombre d'électrons mis en jeu dans la réaction (N_e égal à 2 pour le fer).

4.3.3 Rendement faradique

L'efficacité de courant (current efficiency (CE)) ou rendement faradique pour la dissolution de métal (fer dans notre cas) est égal au rapport entre les quantités de fer dissous réellement (déterminées par pesée) et celles prévues par la loi de Faraday. Cette efficacité de courant (CE) est donc le rapport entre la perte de poids d'électrode consommée ($F_{e \text{ exp}}$) et la masse théorique ($F_{e \text{ thé}}$), donnée par la loi de Faraday définie par la relation suivante :

$$CE (\%) = (F_{e \text{ exp}} / F_{e \text{ thé}}) \cdot 100 \dots\dots\dots(15)$$

4-4. résultats et discussion:

4-4-1.Caractérisation de la boue au laboratoire :

Les échantillons de boue ont été prélevés au niveau de la station d'épuration des eaux usées de Beni Messous,

Notre échantillonnage de la boue se fait au niveau du bassin de stabilisation, une fois la boue arrive au laboratoire elle doit être conservée dans un réfrigérateur à une température de 4°C. Des analyses ont été faites sur cette boue pour la caractériser avant le conditionnement, les résultats trouvés sont dans le tableau ci-dessus :

Tc°	Conductivité (ms/cm)	Sc %	pH	MVS (g/l)	MES (g/l)	RSF*10 ¹² (kg/m)
20	4,9	4,75	7,2	21	40,6	10,58

Tableau IV-1 : caractéristique de la boue brute.

D'après le tableau 3-1, on remarque que d'après la valeur de la siccité obtenue, que la boue est liquide, elle a un pH qui ne présente aucun risque sur le fonctionnement de la station, la conductivité électrique est un peu élevée cela est peut être due aux activités industrielles qui contribuent à cette élévation. D'autre part, d'après les MES on peut dire que cette boue est à prédominance organique.

4-4-2- influence de la densité de courant :

Des essais d'électrocoagulation ont été réalisés sur des échantillons de boue dans les conditions suivantes :

- Intensité de courant (I) en Ampère : 0,56 - 0,93 - 1,12 - 1,31 - 1,5 - 1,7 - 1,9 - 2,3 - 2,6 .et comme la surface immergée de chaque électrode est de $S=37,5 \text{ cm}^2$, en plus $i = I/S$ ce qui implique que :

La densité de courant i en (A/m^2) :150 ; 250 ; 300 ; 350 ; 400 ; 450 ; 500 ; 600 ; 700

- Temps d'électrolyse constant : 15 min.
- Agitation : 40tr/min.
- Distance entre les électrodes $d=1 \text{ cm}$.
- pH de la boue brute.

➤ **L'influence sur l'énergie consommée :**

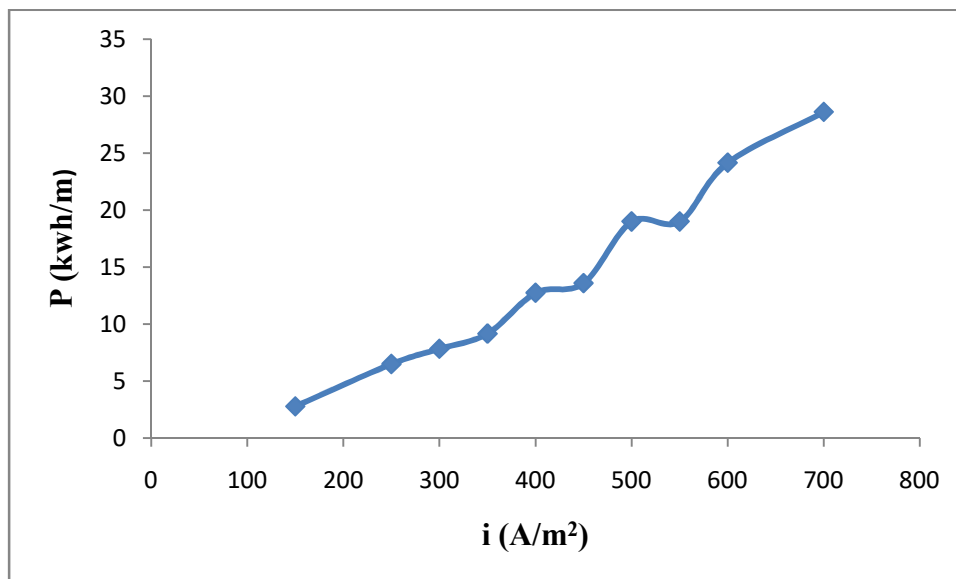


Figure III-4 : influence de la densité de courant sur l'énergie consommée.

La figure III-4 représente l'énergie consommée en fonction de la densité de courant pour un temps d'électrolyse de 15 min, Dans notre cas une augmentation de 150 A/m^2 à 700 A/m^2 entraîne une augmentation de l'énergie consommée de $2,8 \text{ kWh/m}^3$ à $28,6 \text{ kWh/m}^3$

Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par (**Xueming Chen *et al* .2000**) qui montre que l'énergie consommée augmente avec l'augmentation de la densité de courant pour des effluents de restaurant.

➤ **L'influence sur la quantité de fer dissous :**

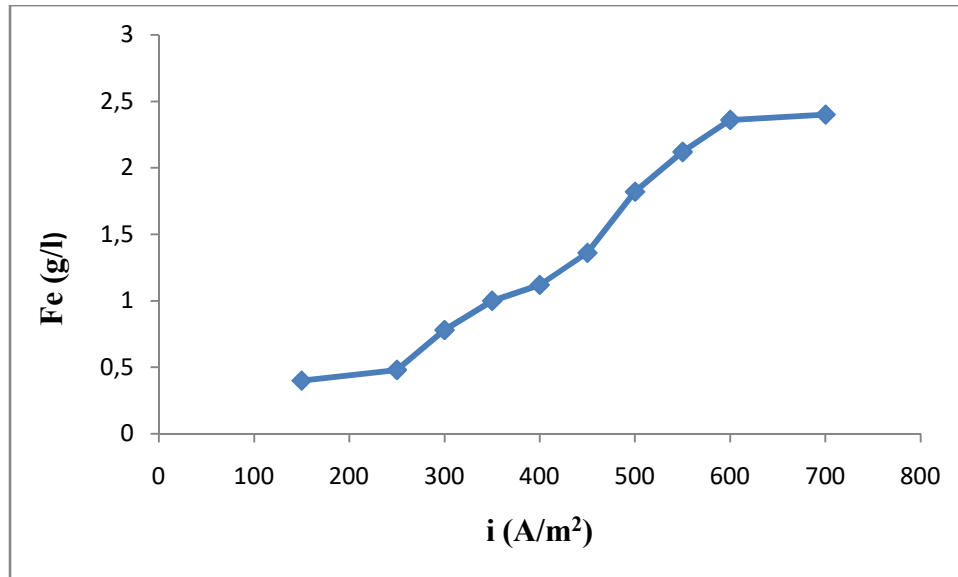


Figure III-5:influence de la densité de courant sur la quantité de fer libérée.

Nous constatons qu'une augmentation de la densité de courant entraîne une augmentation dans le taux de dosage de coagulant, (nombre de cations Fe^{2+} déchargé par l'anode sacrificatoire augmente). La quantité de fer libérée est donnée par la perte de masse de l'anode (expérimentalement).

➤ **L'influence sur le volume recueilli:**

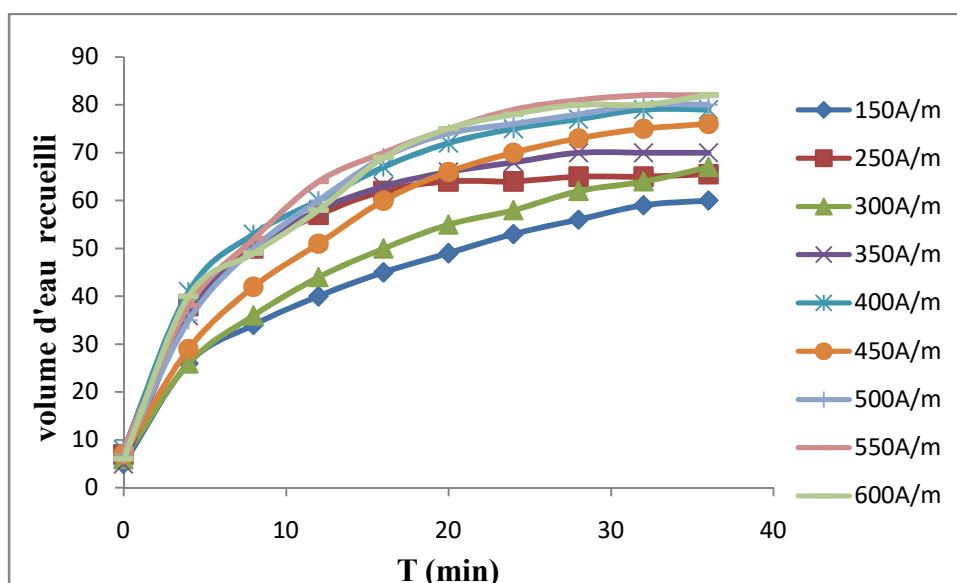
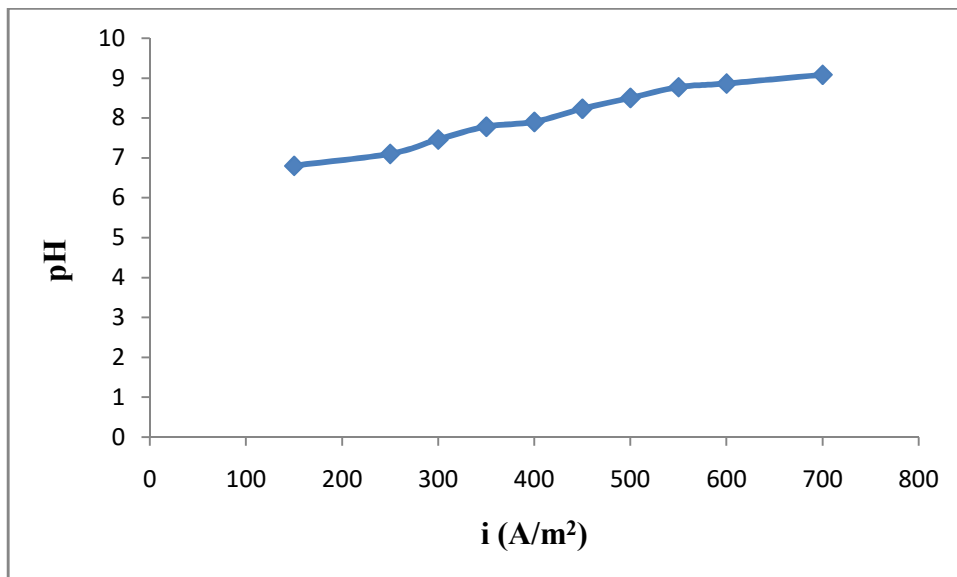


Figure III-6 : influence de la densité de courant sur le volume filtré.

La figure III-6 montre que l'augmentation de la densité de courant influence sur la filtration, plus la densité de courant augmente plus la filtration devient rapide ; au delà d'un certain temps la filtration prend un régime quasi stationnaire. Pour une densité de courant de 150A/m^2 et pour un temps de 36min le volume d'eau recueilli est de 60ml par contre pour $i=600\text{A/m}^2$ et un temps de filtration de 32min le volume d'eau recueilli est de 80ml.

Cette augmentation dans le volume d'eau recueilli est due à une meilleure séparation solide/liquide ; qui est causée par l'augmentation du taux de dosage de coagulant en fonction de la densité de courant (voir fig.III-5)

➤ **L'influence sur le pH final de la solution :****Figure III-7** : influence de la densité de courant sur le pH final de la solution.

La figure montre que l'augmentation de la densité de courant entraîne une augmentation du **pH** final des eaux usées ;

Cette augmentation du **pH** est due à la formation au niveau de la cathode des ions hydroxyles provenant de la réaction de réduction des molécules d'eau :

➤ **L'influence sur la conductivité finale de la solution :**

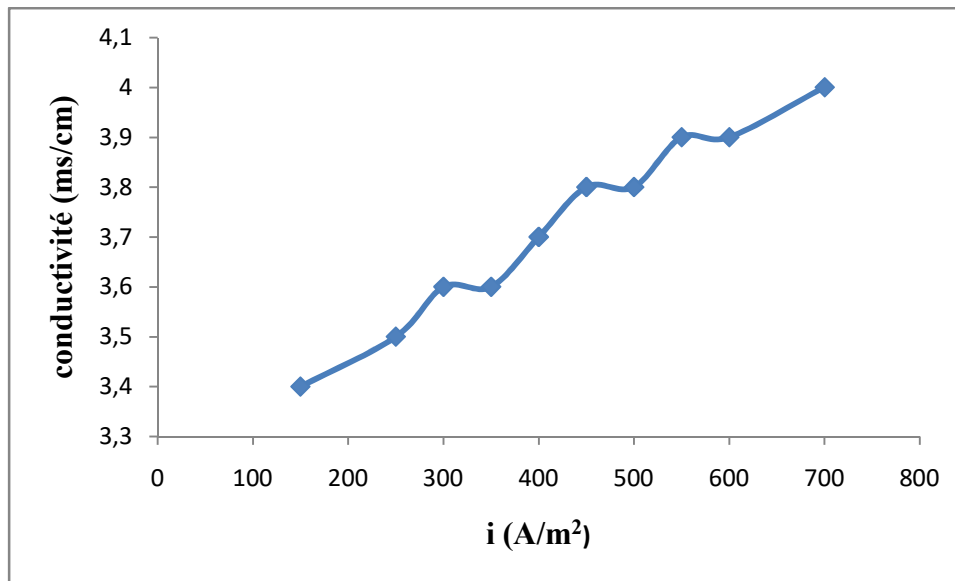


Figure III-8 : influence de la densité de courant sur la conductivité finale de la solution

La variation de la conductivité finale en fonction des différentes densités de courant est représentée sur la **figure III-8**.

De même l'augmentation de la densité de courant est accompagnée par une augmentation de la conductivité électrique de la solution .L'augmentation de la conductivité est due aux ions hydroxydes (OH^-) libérés par la cathode pendant le processus d'électrocoagulation (voir équation 16)

➤ **L'influence sur la siccité du gâteau :**

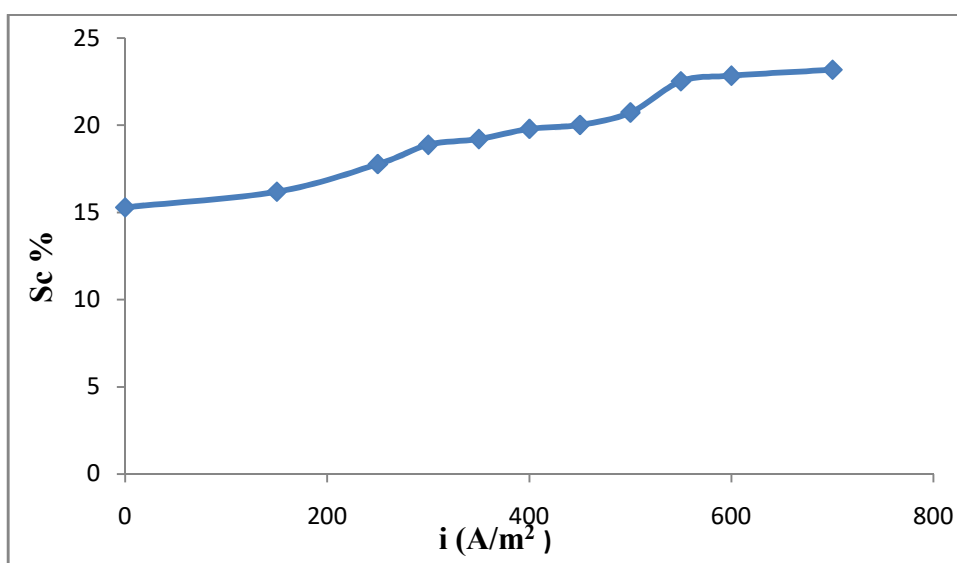


Figure III-9 : influence de la densité de courant sur la siccité du gâteau.

La figure III-9 montre que plus la densité de courant augmente plus la siccité du gâteau augmente et ceci indique que le processus d'électrocoagulation donne des résultats encourageant.

Cette croissance de la siccité est influencée par la densité de courant, qui ne détermine pas seulement la quantité de coagulant généré in "situ", mais aussi la quantité de bulles de gaz produites « D'après HOLT et al. (2005) ». Ceci peut aussi s'expliquer par le fait que la quantité des ions Fe^{2+} générée par la dissolution de l'anode, augmente avec la densité de courant [loi de Faraday et fig -5 : quantité de fer dissous]. Il a été établi expérimentalement que pour un temps donné, l'efficacité d'élimination des colloïdes augmente avec l'augmentation de la densité de courant. La quantité d'ions Fe^{2+} et Fe^{3+} est élevée ce qui entraîne une quantité élevée de précipités d'hydroxydes, qui adsorberont les colloïdes « **D'après ADHOUM et MONSEL (2004) ; KHEMIS et al. (2006) ; KOBYA et al. (2003)** ».

Ceci entraîne un effet de flottation des floccs et la formation d'une espèce de mousse et de boues à la surface libre du bécher d'essai. Ainsi, une meilleure séparation solide/liquide et de meilleurs volumes de filtrats (fig. III-6).

La meilleure siccité est obtenue avec une densité de courant de $700A/m^2$ soit $Sc.=23,19\%$.

D'après les résultats obtenus, on a choisis de fixer deux valeurs de densité de courant pour passer au deuxième paramètre qui est le temps d'électrolyse. Ces deux valeurs sont respectivement $350 A/m^2$ et $700A/m^2$.

4-4-3-Influence du temps d'électrolyse :

Dans le processus d'électrocoagulation, le temps d'électrolyse joue un rôle prépondérant et a un effet remarquable sur l'efficacité du traitement. Le temps d'électrolyse correspond au temps d'application du champ électrique qui correspond aux principales étapes du processus (coagulation, floculation et flottation).

Pour cela nous avons considéré des temps d'électrolyse de 15, 30, 45, 60 et 75 min avec les deux valeurs de densité de courant donnés précédemment.

➤ L'influence sur le volume recueillie :

- Pour $i=700\text{A/m}^2$:

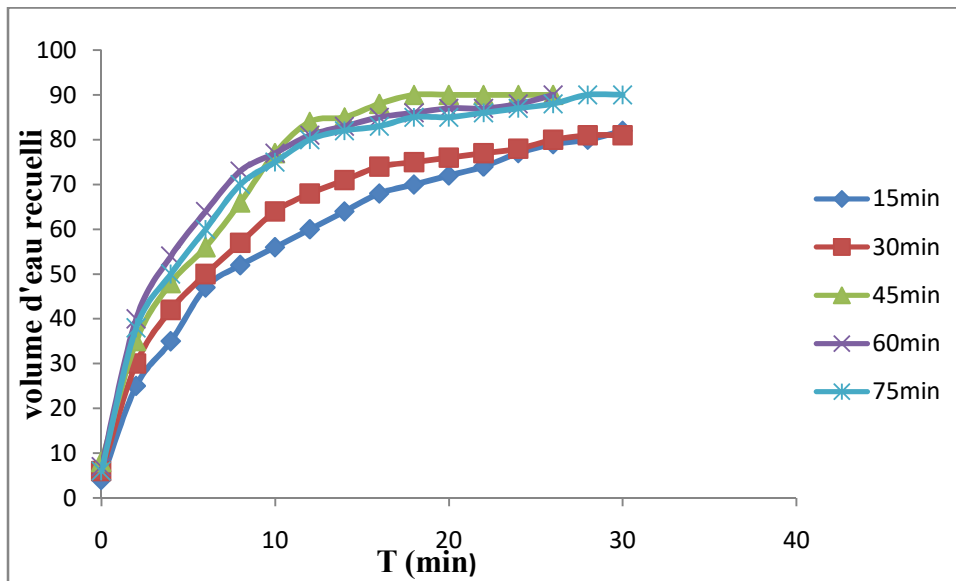
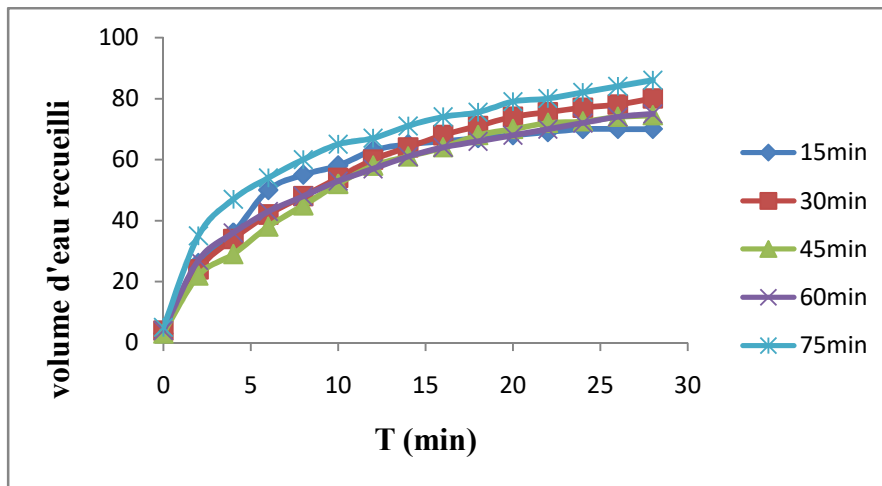


Figure IV : influence du temps d'électrolyse sur le volume filtré pour $i=700\text{A/m}^2$

La figure représente le volume d'eau recueilli en fonction du temps.

On remarque que le volume d'eau recueilli augmente en augmentant le temps d'électrolyse, à $t=75\text{min}$ le volume est de 90 ml pour un temps de filtration de 24min par contre à $t=15\text{min}$ il est de 80ml, on remarque aussi que le volume d'eau recueilli varie rapidement jusqu'à $t=10\text{min}$. au-delà la vitesse de filtration devient lente et un régime quasi-stationnaire s'établit vers la fin de la filtration. Cette augmentation du volume d'eau recueilli s'explique par l'augmentation de la quantité de floes avec le temps, donc par une meilleure séparation solide/liquide avec le temps.

- Pour $i=350\text{A/m}^2$:



FigureIV-1 :influence du temps d'électrolyse sur le volume filtré pour $i=350A/m^2$.

D'après la figure (IV-1) on remarque que le volume d'eau recueilli augmente on augmentant ainsi le temps d'électrolyse, a $t=75min$ le volume recueilli est de 86ml pendant un temps de filtration de 28min, on peut constater aussi qu'on a une bonne séparation solide-liquide et la filtration devient de plus en plus lente vers la fin, causée par le colmatage du papier filtre.

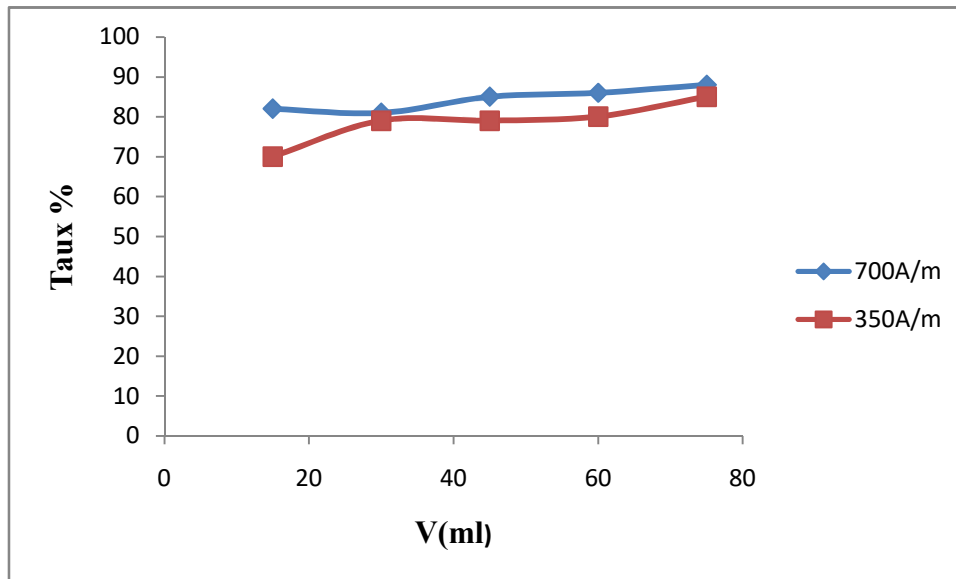
➤ **Le taux de filtration :**

Le taux de filtration est donné par la relation suivante :

$$T = (V_x/V_i) * 100$$

V_i : le volume de la boue a filtré soit 100ml.

V_x : le volume d'eau recueilli.



FigureIV-2 : influence du temps d'électrolyse sur le taux de filtration.

La figure (IV-2) représente le taux de filtration en fonction du temps d'électrolyse pour les deux densités de courant. Nous constatons de meilleurs résultats de taux de filtration pour une densité de courant de 700A/m^2 ; ceci est dû à une meilleure séparation solide/liquide.

➤ **L'influence sur la siccité du gâteau :**

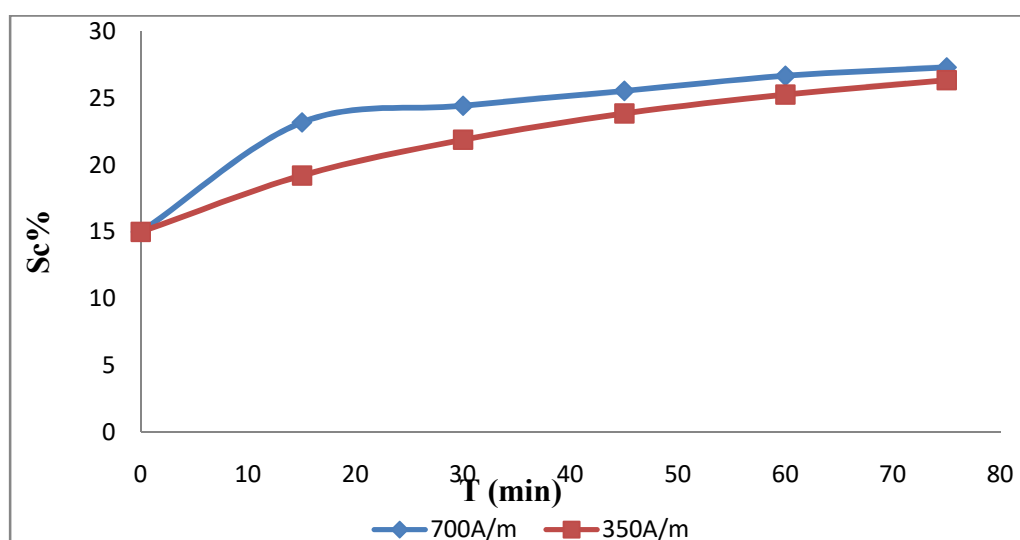


Figure IV-3: la siccité en fonction du temps d'électrolyse pour 700A/m^2 et 350A/m^2 .

La figure IV-3 représente la siccité en fonction du temps d'électrolyse pour les deux valeurs de densité de courant.

D'après cette figure on remarque que la même valeur de siccité peut être obtenue par une augmentation du temps d'électrolyse et une diminution de la densité de courant. Dans notre cas, nous avons une $Sc.=23,86\%$ pour un temps de 45 min et une densité de 350 A/m^2 et avec un temps d'électrolyse de 15 min et une densité de 700 A/m^2 , une siccité de $23,19\%$.

Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par ((XUEMING CHEN *et al*, 2000; ADHOUM et MONSEL, 2004) qui ont montré que si la densité de courant diminue, le temps d'électrolyse nécessaire pour obtenir la même efficacité augmente.

Donc, on fixera un temps d'électrolyse de 45 min et une densité de courant de 350 A/m^2 pour la suite de l'expérimentation.

➤ **L'influence sur le pH final de la solution :**

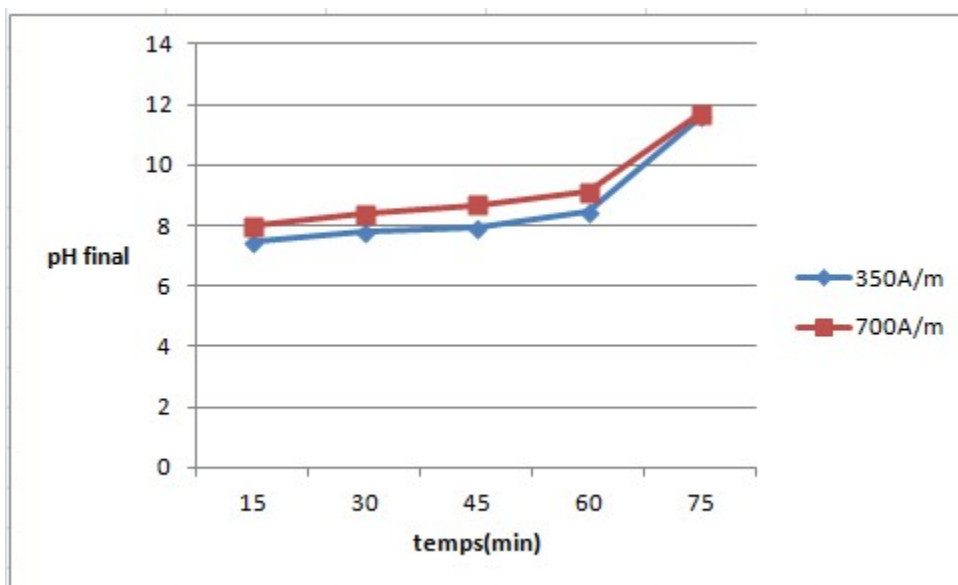


Figure IV-4 : influence du temps d'électrolyse sur le pH final de la solution.

La figure IV-4 représente le temps d'électrolyse en fonction du pH final de la solution pour les deux valeurs de densité de courant.

On remarque que le pH final de la solution augmente avec le temps d'électrolyse durant le processus d'électrocoagulation jusqu'à atteindre un pH basique, cela est due à la formation des ions hydroxydes a la cathode provenant de la réaction de réduction des molécules d'eau. (voir équation 16)

4-4-4.- Influence du pH de la solution :

Le pH de la solution est considéré comme un facteur opératoire important, influençant la performance des processus électrochimiques (Xueming et al. 2000; Daneshvar et al. 2003; Xinhua et Xiangfeng 2004; Koby et al. 2006; Sengil et al. 2006). Des essais d'électrocoagulation ont été effectués sur des échantillons de boues en variant le pH de la solution de 2 à 12, la densité de courant = 350A/m^2 et le temps d'électrolyse=45min.

➤ L'influence du pH sur l'énergie consommée :

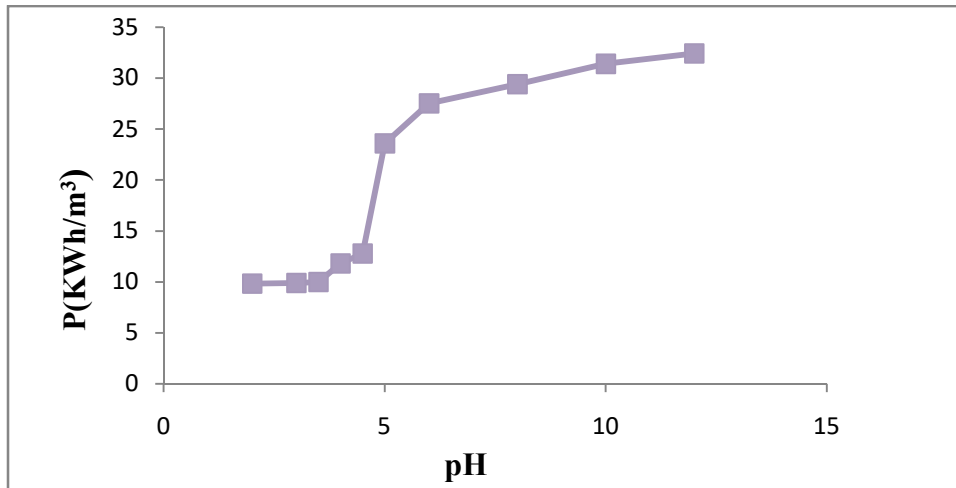


Figure IV-5 : influence du pH sur l'énergie consommée. . ($i=350\text{A/m}^2$; $t_e=45\text{min}$)

D'après la figure IV-5, on remarque que pour des faibles valeurs de pH, la consommation énergétique est faible, cela est peut être due à l'acidité du milieu qui a favorisée le transfert entre électrodes ; par contre quand le pH de la solution augmente il entraine une augmentation de l'énergie consommé car la conductivité de la solution diminue à partir de $\text{pH}=5$. La plus faible valeur "9,82KWh/m³" est obtenue à $\text{pH}=2$.

➤ **L'influence sur le volume d'eau recueilli :**

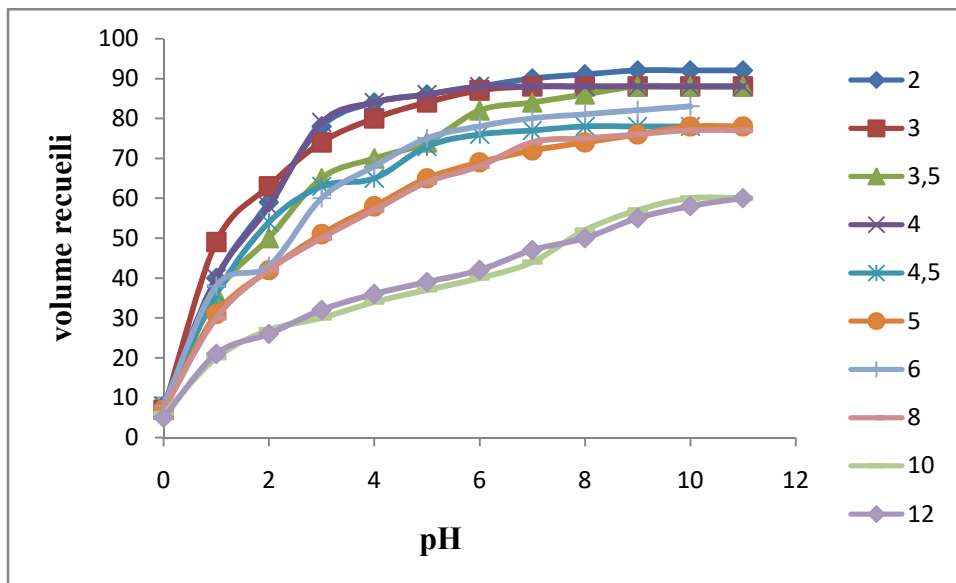


Figure IV-6 : influence du pH sur le volume filtré. ($i=350\text{A/m}^2$; $t_e=45\text{min}$)

La figure IV-6 représente le volume d'eau recueilli en fonction du pH.

D'après la figure on remarque que pour des valeurs de pH inférieure à 4 la filtration est rapide et le volume recueilli varie rapidement jusqu'à $t=2$ min et prend un régime quasi-stationnaire à la fin de la filtration ,cela implique qu'on a une bonne séparation solide/liquide ;mais par contre pour le pH basique la filtration varie lentement cela est dû à la formation des espèces gélatineuses qui ont rendu la filtration de plus en plus lente ce qui implique une mauvaise séparation solide/liquide .

Le volume d'eau recueilli atteint son maximum pour des pH inférieure à 4. A titre d'exemple pour un $\text{pH}=2$ le volume est de 92ml pour un temps de filtration de 9 min et a $\text{pH} =12$ le volume diminue jusqu'à 60ml ce dernier est obtenu après 14min de filtration.

➤ **L'influence sur la siccité du gâteau :**

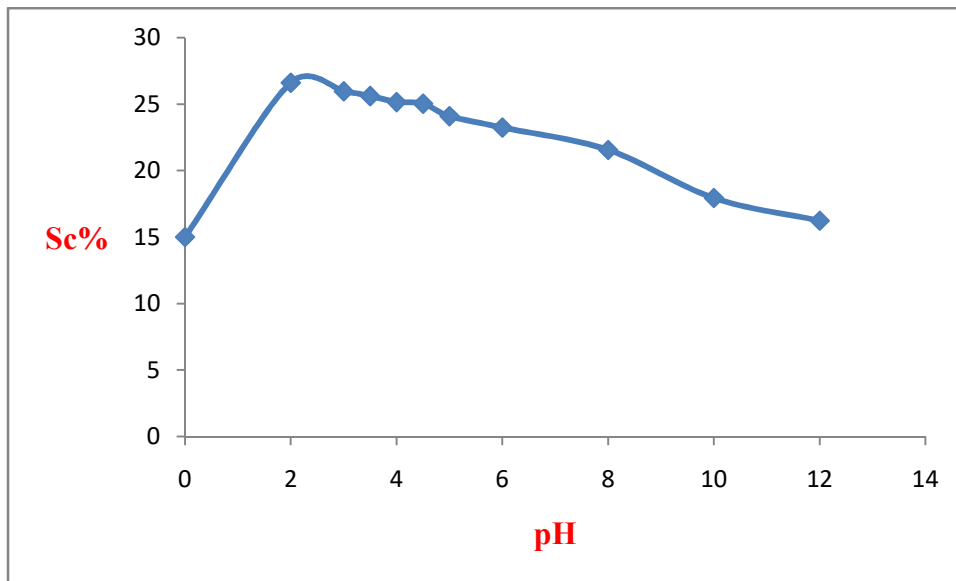


Figure IV-7:influence du pH sur la siccité du gâteau. ($i=350\text{A/m}^2$; $t_e=45\text{min}$)

D'après la figure IV-7 on remarque une augmentation de la siccité du gâteau pour des faibles valeurs de pH et cela est due à l'évolution accélérée du processus de coagulation floculation par la formation de ces complexes : $\text{Fe}(\text{oH})^{2+}$, $\text{Fe}(\text{oH})_2 + \text{Fe}(\text{oH})_3$ (voir figure IV-8 et figure IV-9) qui jouent le rôle de coagulant. Une fois que le pH devient basique, on remarque une diminution de la siccité et cela est dû à la formation des floccs d'hydroxyde de fer qui ont une petite taille et ces derniers sont moins réactifs car l'espèce anionique prédomine ($\text{Fe}(\text{OH})_4^-$: voir fig.IV-9), donc la floculation est moins efficace.

La meilleure siccité est obtenue avec un $\text{pH}=2$ en milieu acide ($\text{Sc.}=26,6\%$) car l'électrocoagulation peut être considérée comme un processus de corrosion accélérée pour des pH acide (voir figure IV-8), donc pour une bonne conduite du processus , le pH sera fixé à la valeur de 2 pour la suite des essais.

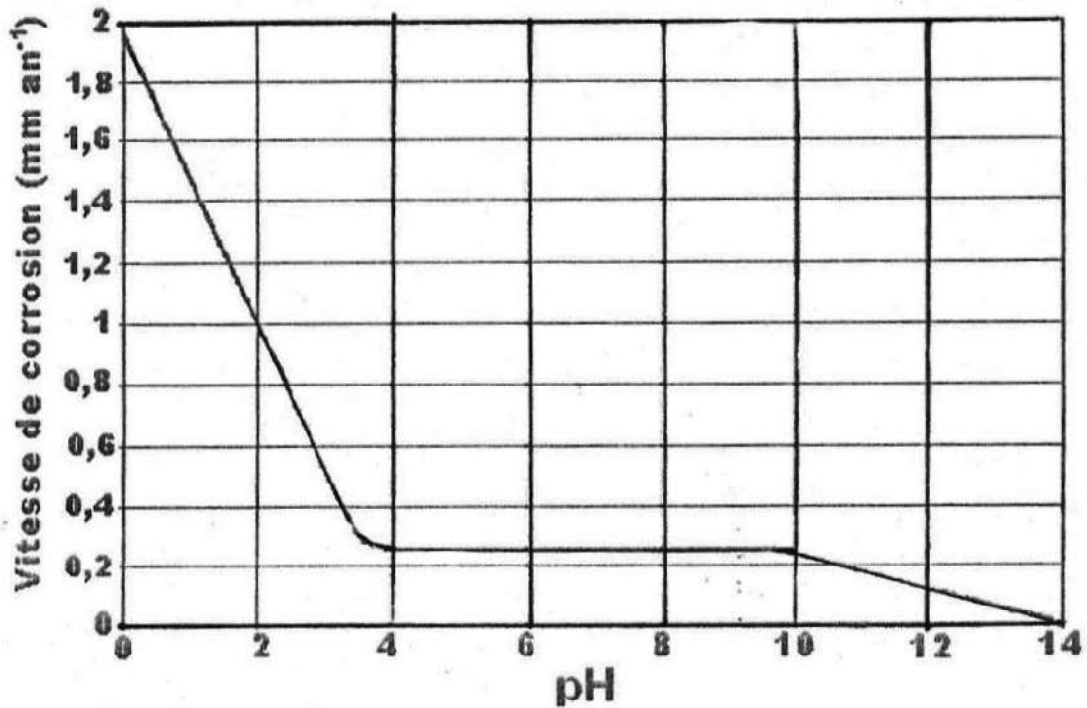


Figure IV-8 : vitesse de corrosion du fer en fonction du pH (Moreno-casillas et al 2007).

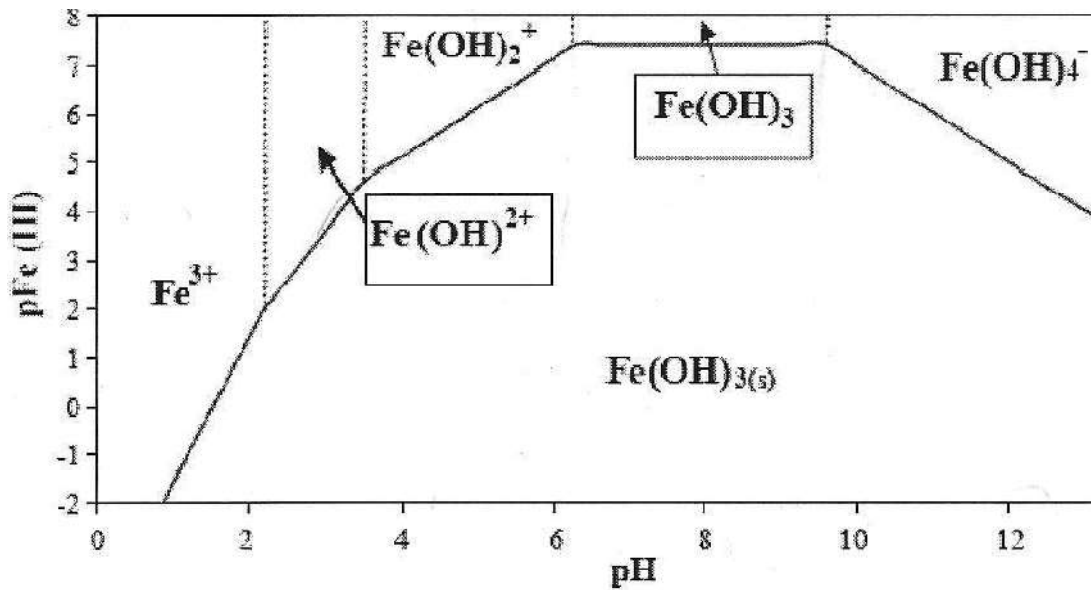


Figure IV-9: diagramme de zone de prédominance des espèces chimiques de Fe(III) dans une solution aqueuse (Barrera Diaz et al. 2003)

➤ L'influence sur la turbidité de la solution :

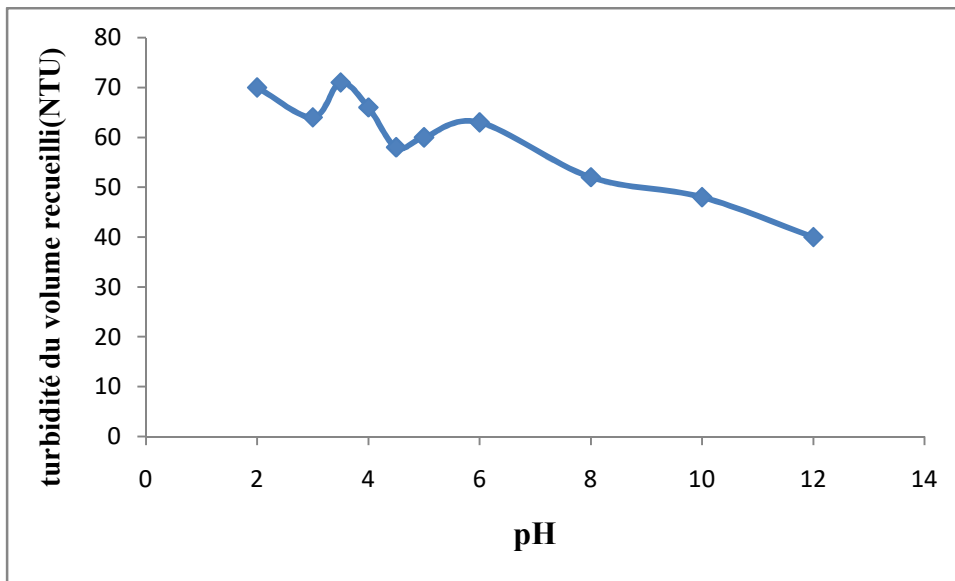


Figure IV-10 : influence du pH sur la turbidité de la solution. .($i=350\text{A/m}^2$; $t_e=45\text{min}$)

La figure IV-10 représente la turbidité en fonction du pH.

D'après la figure on remarque que la turbidité du volume recueilli augmente avec des valeurs de pH inférieures à 4 et commence à diminuer jusqu'à $\text{pH}=12$ cela est peut être expliqué par le fait que la quantité d'ions Fe^{2+} et Fe^{3+} est élevée car les principales réactions qui se produisent à pH inférieur à 4 sont :



Ces réactions données par (Moreno-Casillas et al. 2007) se produisent rapidement pour des faibles valeurs de pH (acide fort). ce qui entraîne une quantité élevée de précipités d'hydroxydes de fer qui influenceront négativement sur la turbidité du volume recueilli. (Voir figure IV-8), étant donné que le papier filtre utilisé est ordinaire.

➤ La RSF de la boue :

Pour chaque point du graphique de la RSF, on a procédé par cette méthode :

- On détermine les temps et volumes de filtration ;

- On trace $T/(V-V_0) = f(V)$ qui est sous forme d'une droite ; Sa pente nous permet de déterminer la RSF en appliquant la formule :

$$r = \frac{2.\alpha.P.S^2}{\mu.W}$$

v : volume du filtrat au bout du temps t (en m³)

μ : viscosité dynamique de la boue (Pa.s) soit 0,0011

r : résistance spécifique à la filtration (m.kg⁻¹)

w : masse déposée par unité de volume du filtrat (kg.m⁻³)

S : surface de filtration (m²)

P : Pression en Pascal (Pa).soit 49000

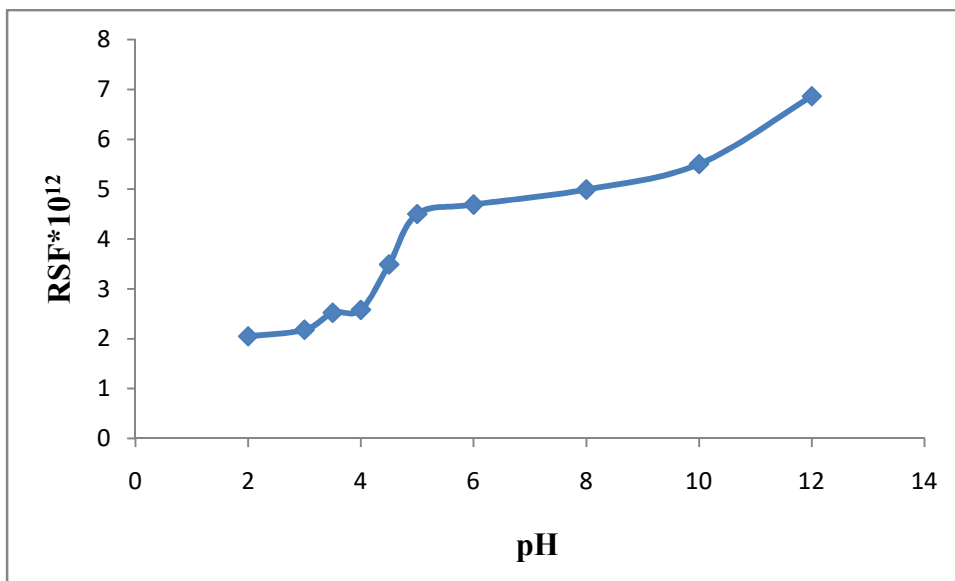


Figure IV-11 : évolution de la RSF en fonction du pH. ($i=350\text{A/m}^2$; $t_c=45\text{min}$)

Le graphe de la RSF a une forme croissante, plus on augmente le pH, la RSF de la boue augmente. Le coagulant qui était en excès en milieu acide à neutraliser la charge négative des particules de la boue donc on avait une bonne séparation solide/liquide donc la filtration était rapide ce qui a donné une faible valeur de la RSF = $2,05 \cdot 10^{12}$ m/kg. Par contre quand le milieu devient basique, une espèce anionique prédomine

dans la solution (voir figure IV-9) donc la floculation était moins efficace et l'échantillon de boue conditionné prend un aspect gélatineux ce qui a rendu la filtration de plus en plus difficile, tout cela influence sur la RSF de la boue qui augmente et atteint la valeur de $6,86 \cdot 10^{12}$ m/kg à pH 12.

4-4-5. Influence de la conductivité électrique :

On sait que La conductivité électrique est la grandeur caractérisant l'aptitude pour un matériau de permettre le passage du courant électrique, c'est-à-dire de permettre Aux charges électriques de se déplacer librement en son sein.

La valeur de la conductivité dépend de la nature des ions présents dans la solution et de leurs concentrations ; La conductivité de l'électrolyte a aussi un impact sur le procédé ; si elle est trop faible, la résistance de l'eau au passage du courant est forte, la consommation énergétique est très importante ; et sa température peut alors fortement augmenter. L'ajout de Na Cl est utilisé pour accroître la conductivité de la solution. Les concentrations en NaCl utilisées sont de : 1- 2- 3- 5- 7 et 9 g/l.

➤ L'influence de la concentration en NaCl sur la conductivité finale de la solution :

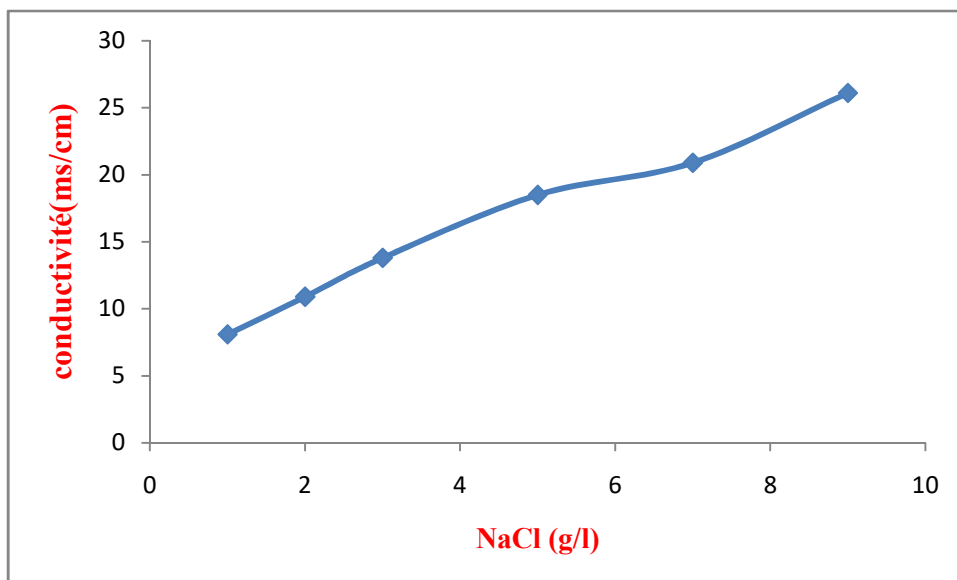
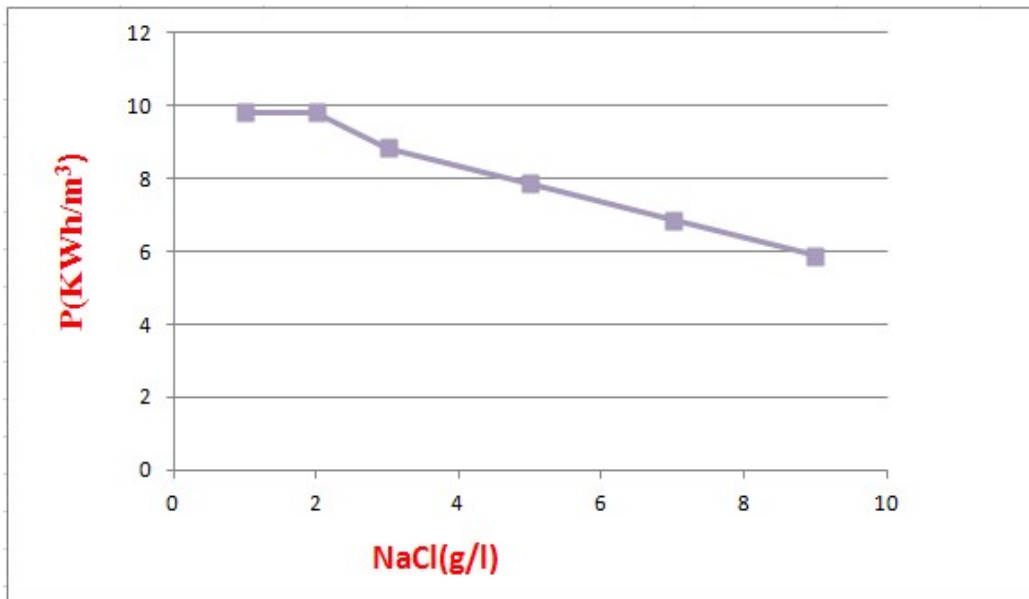


Figure IV-12 : influence de la concentration en NaCl sur la conductivité finale de la solution. (pH=2 ; $i=350\text{A/m}^2$; $t_e=45\text{min}$)

La figure IV-12 représente la conductivité électrique en fonction de la concentration de NaCl.

D'après la figure on remarque que Lorsque la concentration en NaCl augmente, la conductivité de la solution augmente respectivement, cette augmentation est due aux ions hydroxydes (OH^-) libérés par la cathode pendant le processus d'électrocoagulation et la présence des Na^+ et Cl^- .

➤ **L'influence sur l'énergie consommée :**



FigureIV-13 : influence de la conductivité sur l'énergie consommée. (pH=2 ; $i=350\text{A/m}^2$; $t_e=45\text{min}$).

La figure IV-13 représente la concentration en NaCl en fonction de l'énergie consommée.

Nous constatons une diminution de la puissance consommée avec l'augmentation de la concentration en Na Cl; et ceci est dû à la croissance de la conductivité qui favorise le transfert entre électrode et diminue la résistance de l'eau au passage du courant et donc une consommation énergétique peu importante.(*koby et al 2006.*)

L'existence d'un film passif sur l'anode est l'un des problèmes de l'électrocoagulation, ce film augmente le potentiel appliqué « **Vik et al. 1984 ; Mollah et al. 2004** ».

Fréquemment, les eaux usées industrielles traitées contiennent souvent une quantité de chlorure qui conduit à la dissolution du film passif sur la surface de l'anode. Cet effet de L'électrolyte (NaCl) à faibles doses est confirmé par les études récentes de « **Mouedhen et al. 2007** » qui montrent que l'électrolyte qui contient un minimum de concentration en

ions chlorure de 60 mg/l peut éliminer le film passif de l'anode en diminuant remarquablement le voltage de la cellule durant l'électrolyse entraînant ainsi la diminution de la puissance.

➤ **L'influence sur la quantité de fer dissous :**

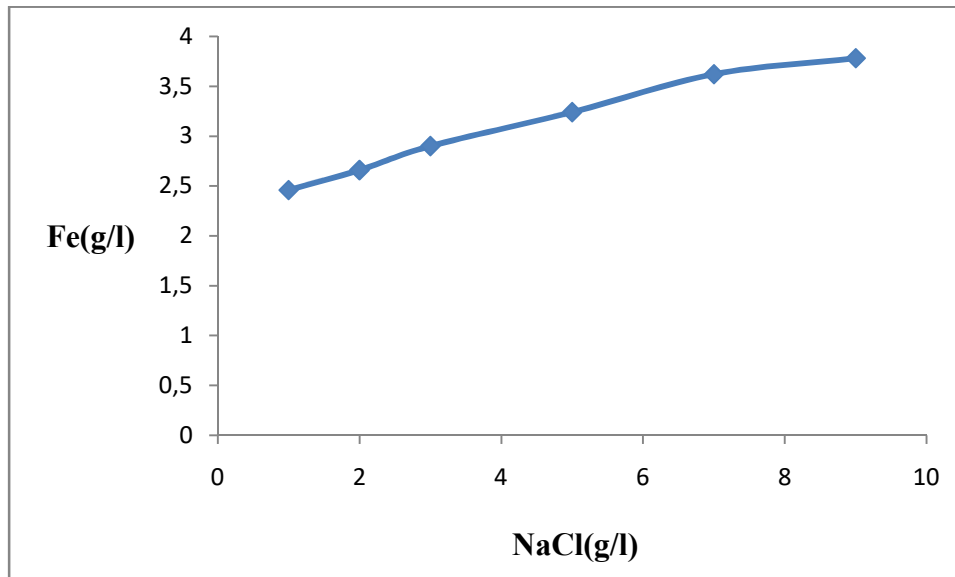


Figure IV-14 : influence de la conductivité sur la quantité de fer libérée. (pH=2 ; $i=350\text{A/m}^2$; $t_e=45\text{min}$).

La figure IV-14 représente la quantité de fer libérée en fonction de la concentration en NaCl.

Nous constatons de même une grande quantité de fer libéré en augmentant la concentration en NaCl.

➤ **L'influence sur le volume recueilli :**

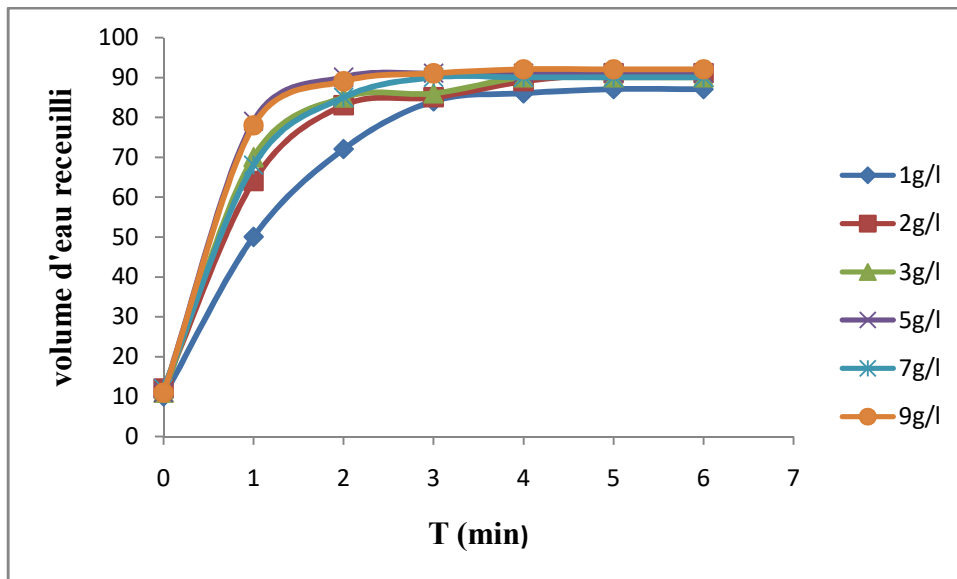


Figure IV-15 : influence de la concentration en NaCl sur le volume filtré. ($\text{pH}=2$; $i=350\text{A/m}^2$; $t_e=45\text{min}$).

La figure IV-15 représente le volume d'eau recueilli en fonction du temps de filtration. D'après la figure, on remarque que les courbes présentent une phase où le volume recueilli varie très rapidement jusqu'à 1 min au-delà de ce temps la filtration prend un régime quasi stationnaire. On remarque aussi que lorsqu'on augmente la concentration en NaCl le volume d'eau recueilli augmente. Ce qui implique qu'on a une bonne séparation solide/liquide.

➤ **Le taux de filtration :**

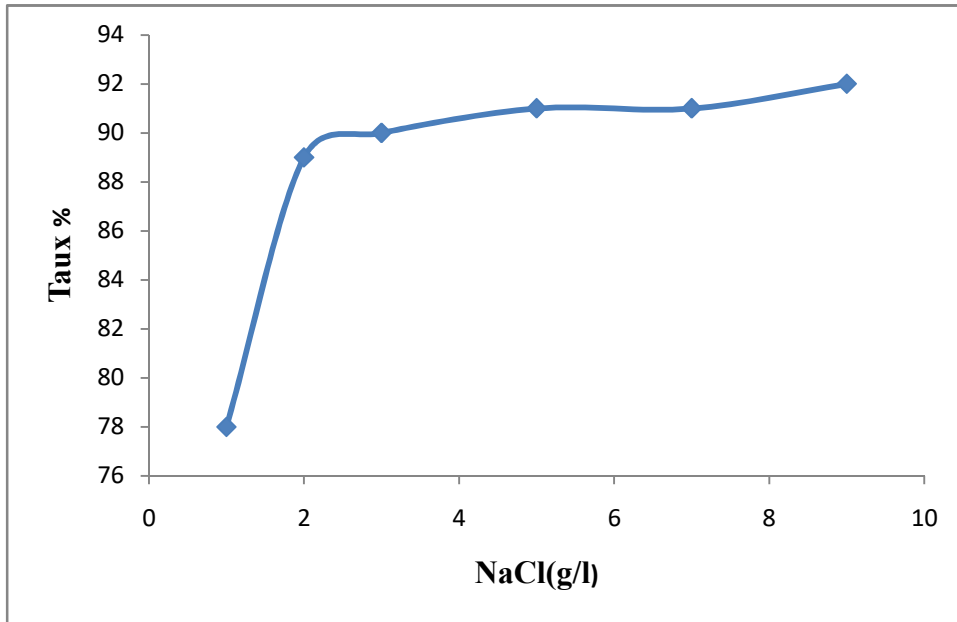


Figure IV-16: influence de la concentration en NaCl sur le taux de filtration. . (pH=2 ; $i=350\text{A/m}^2$; $t_e=45\text{min}$)

La figure IV-16 représente le taux de filtration en fonction de la concentration en NaCl. D'après la figure on a une courbe croissante, on remarque que lorsqu'on augmente la concentration en NaCl le taux augmente aussi, le taux de filtration est de 92% pour une concentration en NaCl=9g/l ; soit un volume de 92 ml pour un temps de filtration de 3,5 min.

➤ **L'influence sur la siccité du gâteau :**

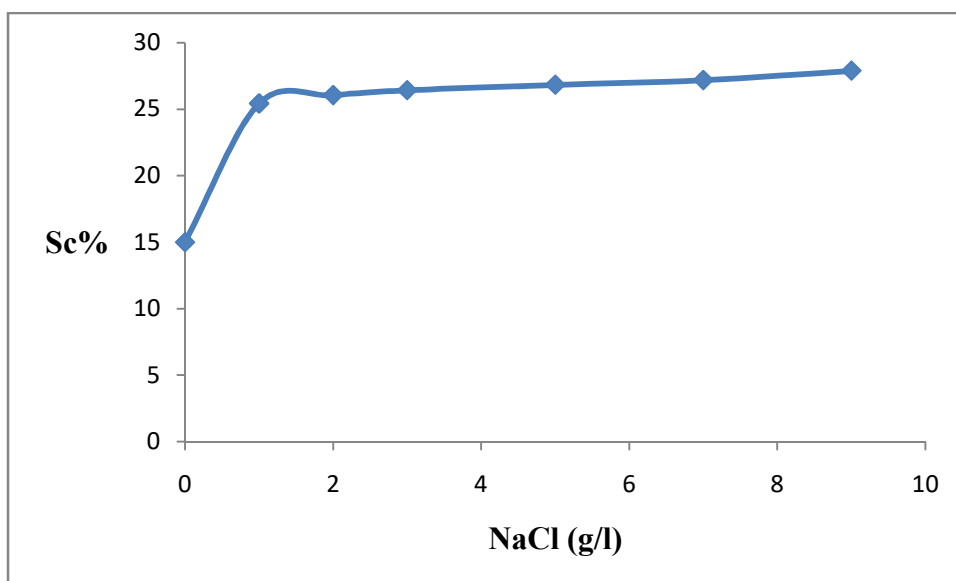


Figure IV-17 : influence de la concentration en NaCl sur la siccité du gâteau. (pH=2 ; $i=350\text{A/m}^2$; $t_e=45\text{min}$).

La figure représente la siccité du gâteau en fonction de la concentration de NaCl.

On remarque une augmentation légère de la siccité du gâteau. la meilleure siccité est obtenue avec une concentration de 9 g/l. ($Sc=27,88\%$), soit environ 28%.

« Les études de (SAUR et al. 1996; HOSNY et al. 1996) montrent que la présence de NaCl diminue la taille des bulles de gaz, spécialement l'hydrogène. En effet le chlorure de sodium augmente la tension superficielle ce qui rigidifie l'interface gaz liquide et par conséquent limite la coalescence des bulles de gaz « D'après KOIDE et al.(1968) ; MARRUCCI et NICODEMO (1967); OLIVEIRA et al. (1999) ; STRICKLAND (1980)». La vitesse ascensionnelle des petites bulles est plus faible que celle des bulles plus larges « D'après BRANDON et al. (1985) ».

La vitesse ascensionnelle d'une bulle de gaz (V_b) dans l'eau en régime laminaire est proportionnelle au carré du diamètre de la bulle de gaz, et elle est donnée par la loi de Stokes :

$$V_b = \frac{g}{18\eta} (\rho_l - \rho_g) d_b^2$$

Où d_b représente le diamètre de la bulle de gaz, ρ_g la masse volumique du gaz, ρ_l la masse volumique du liquide, η la viscosité dynamique et g l'accélération due à la pesanteur.

La vitesse ascensionnelle de la bulle de gaz est donc d'autant plus faible que le diamètre des bulles de gaz diminue. De ce fait elles s'élèvent lentement vers la surface ce qui augmente leur probabilité de collisions avec les colloïdes, ce qui conduit à une amélioration du procédé d'élimination des polluants. Ces auteurs indiquent que les microbulles d'hydrogène sont chargées positivement et elles peuvent neutraliser les polluants dans notre cas les colloïdes chargés négativement. Dans ce cas, la séparation solide/liquide sera la meilleure avec une concentration de 9 g/l de NaCl.

➤ **La RSF de la boue :**

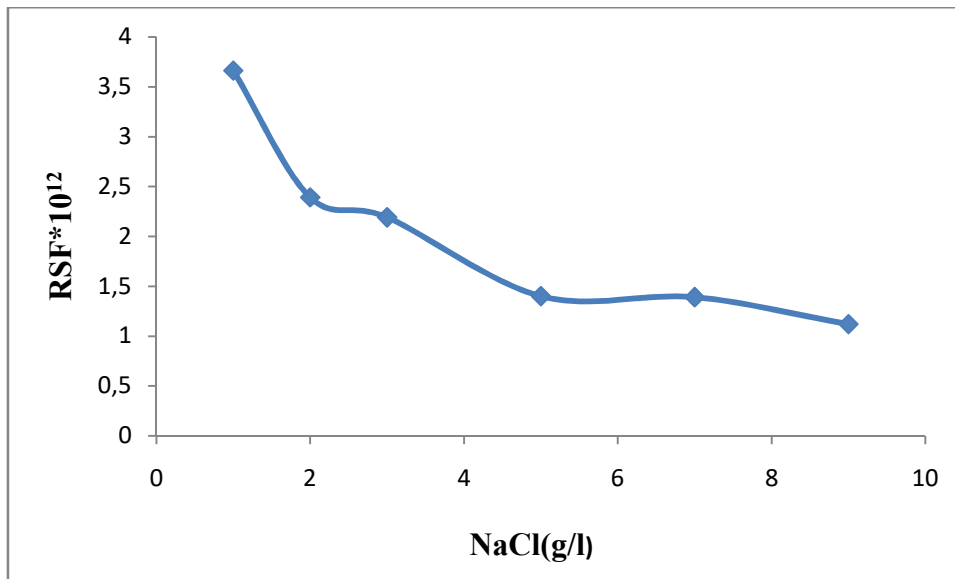


Figure IV- 18 : évolution de la RSF en fonction de la concentration en NaCl. (pH=2 ; $i=350\text{A/m}^2$; $t_e=45\text{min}$).

D'après la figure IV-18 on remarque que la RSF de la boue diminue lorsqu'on augmente la concentration en NaCl, la vitesse de filtration était rapide et à la fin de la filtration on obtient une fine couche de gâteau, l'eau est presque éliminé entièrement, cela peut expliquer la diminution de la RSF. La valeur de la résistance spécifique à pH 2, $i= 350\text{ A/m}^2$, $t_e= 45\text{ min}$ et Nacl 9g/l, est de $1,12*10^{12}\text{ m/kg}$. Ainsi, Dans ces bonnes conditions de conditionnement, nous obtenons une boue solide (**Degrémont, 2005**).

4.4.6. Influence de la masse du coagulant :

Le procédé d'électrocoagulation se caractérise par une génération au sein de l'effluent que l'on souhaite traiter, des cations métalliques par oxydation des anodes en fer ou en aluminium.

Les cations formés in situ conduisent alors à des formes hydroxylées provoquant une coagulation des particules de l'effluent. Les floes qui se forment, ensuite peuvent alors être séparés par flottation, par décantation ou bien par filtration.

En électrocoagulation, la coagulation constitue l'étape principale de la déstabilisation et de l'agrégation des particules colloïdales.

L'utilisation de la seconde loi de Faraday permet d'accéder à la quantité théorique de fer dissous à l'anode et connaissant le débit d'alimentation du réacteur ; de déterminer la quantité de fer dissous en gramme par litre donnée par l'équation 14.

De même, il a été défini une efficacité de courant (CE) ; qui est un rendement faradique pour la dissolution du métal (fer dans notre cas) ; et qui permet de comparer les quantités de fer dissous réellement et ceux prévues par la loi de Faraday . Cette efficacité de courant (CE) est le rapport de la masse expérimentale de l'électrode consommée sur la masse théorique donnée par la loi de Faraday, donnée par l'équation 15.

L'application de la loi de Faraday sur des échantillons de boues dans les conditions suivantes a donné les résultats représentés sur les tableaux IV-2 et IV-3.

pH	i (A/m ²)	i (A)	F_e exp(g)	F_e theo(g)	CE (%)
2	350	1,31	1,36	1,023	132,9
3	350	1,31	1,44	1,023	140
3,5	350	1,31	1,5	1,023	146,6
4	350	1,31	1,56	1,023	152,4
4,5	350	1,31	1,59	1,023	155,4
5	350	1,31	1,63	1,023	159,33
6	350	1,31	1,66	1,023	162,26
8	350	1,31	1,55	1,023	151,5
10	350	1,31	1,49	1,023	145,65
12	350	1,31	1,38	1,023	134,89

Tableau IV-2 : Efficacité de courant pour des pH de 2 à 12 ($i=350$ A/m², $t=45$ min).

i (A/m ²)	i (A)	F_e exp(g)	F_e theo(g)	CE (%)
150	0,56	0,2	0,145	137,9

250	0,93	0,26	0,242	161,15
300	1,12	0,39	0,29	193,1
350	1,31	0,5	0,34	200
400	1,5	0,56	0,39	166
450	1,7	0,68	0,44	113,6
500	1,9	0,91	0,49	185,6
550	2	1,06	0,52	203,5
600	2,3	1,18	0,59	200
700	2,6	1,21	0,67	180,59

Tableau IV-3 : Efficacité de courant CE :(t= 15 min, pH initial.)

D'après les résultats représentés sur les tableaux ; nous avons constaté suivant l'efficacité de courant que la loi de Faraday est applicable.

Deux facteurs jouant un rôle prépondérant dans l'épuration par électrocoagulation qui sont l'intensité imposée aux bornes des électrodes et le débit d'alimentation du réacteur.

Ces deux paramètres sont essentiels dans le contrôle de la quantité de fer mise en œuvre lors de l'épuration (loi de Faraday). **(A.Guediri 2008)**.

L'écart existant entre les valeurs de l'efficacité de courant dans certains cas est dû à la perturbation du processus à cause de la variation de l'intensité de courant à certain moment.

La loi de Faraday joue un rôle important dans le processus d'électrocoagulation, surtout en ce qui concerne la détermination de la masse du métal anodique dissous dans la solution, ce qui permet de connaître la durée de vie des électrodes.

La masse du métal anodique dissous dans la solution, peut augmenter ou diminuer par rapport à la valeur théorique, à cause des caractéristiques de l'effluent, et des conditions opératoires.

4-5. Discussion générale:

Cette recherche a permis la mise au point du procédé électrochimique pour le conditionnement des boues de la STEP de Beni-Messous, suivi de leur déshydratation.

Une cellule électrolytique constituée d'électrodes de fer avec un système continu a été conçue.

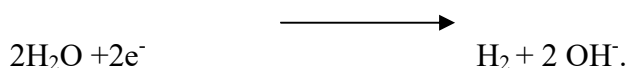
Les phénomènes mis en jeu durant le processus sont les suivants :

- Une agitation de la solution due à l'attraction des colloïdes vers l'anode.
- Un dégagement d'hydrogène (H_2) à la cathode et d'oxygène (O_2) au niveau de l'anode, ces gaz participent aussi à l'agitation de la solution.
- Formation de floccs de couleur verdâtre (présence d'hydroxyde de fer), cette couleur devient rapidement jaune-orangé-brun ce changement de la couleur est dû à l'oxygénation du milieu (l'hydroxyde ferreux s'oxyde en hydroxyde ferrique).
- Formation d'une espèce de mousse à la surface de la solution.
- Dégagement de la chaleur due à l'augmentation de la température de la solution.
- Un dépôt de floccs se colle sur l'anode vers la fin de l'expérience.

Les essais d'électrocoagulation ont permis de montrer l'intérêt de la densité de courant sur l'efficacité du procédé, par contre elle présente un inconvénient du point de vue économique (une augmentation de la densité de courant entraîne une augmentation de l'énergie consommée).

La variation du temps d'électrolyse nous a montré que pour une densité de courant de 700 A/m^2 et un temps de 15min on peut avoir la même valeur de siccité que pour $i=350 \text{ A/m}^2$ et $t=45 \text{ min}$. Ces résultats obtenus sont en accord avec ceux trouvés par **(MORENO, 2007)**

D'une autre part l'augmentation de la température s'accompagne par une augmentation du pH de la solution cette augmentation est due au dégagement des bulles de gaz sur la cathode provenant de la réaction de réduction des molécules d'eau :



Pour la suite des expériences, nous avons pris $i=350 \text{ A/m}^2$ et $t=45 \text{ min}$ comme des paramètres constants pendant la variation du pH, les valeurs du pH varient de 2 à 12.

On peut tirer de cet essai que des boues acidifiées ont une bonne déshydratabilité que des boues non acidifiées. D'après Moreno.....qu'en milieu acide la vitesse de corrosion du fer est très accélérée donc une forte génération de coagulant provenant de la dissolution de l'anode, ce qui favorise un bon déroulement du processus (déstabilisation d'une grande charge colloïdale).

Par contre nous n'avons pas eu de bon résultat en ce qui concerne l'élimination de la turbidité, des précipités d'hydroxyde ferreux et d'hydroxyde ferrique existent dans la solution sous forme solide de même la couleur jaune-orangé-brun influent sur la turbidité de la solution, on remarque aussi que la consommation énergétique varie dans le sens inverse avec le pH, la valeur la plus faible est obtenue pour des pH inférieur à 5.

Enfin pour la variation de la conductivité électrique de la solution on choisit de prendre pH=2 comme valeur constante. la conductivité électrique avait un avantage sur la diminution de l'énergie consommée, on a pu remarquer que l'ajout d'un électrolyte dans notre cas NaCl augmente la conductivité de la solution, celle qui a favorisée un transfert entre électrode donc une faible consommation énergétique. La meilleure valeur de la siccité est obtenue pour une concentration en NaCl=9g/l, soit une valeur de la siccité de 28% , une RSF de 10^{12} m/kg et un taux de filtration de 92% avec un temps de filtration de 3,5 min. Dans ces bonnes conditions, nous obtenons des boues solides (**degremont 2005**).

Ainsi les boues acidifiées ont une bonne déshydratabilité ce résultat est en accord avec les résultats du brevet (**Blaiz.J.F et al,2004**) qui montre que les boues acidifiées améliorent significativement les caractéristiques de deshydratabilité des boues en haussant la siccité de ces dernières lors de leur deshydratabilité mécanique.

CONCLUSION

Dans le contexte de l'épuration des eaux usées, le conditionnement des boues est amené à se développer dans un avenir proche. En effet, le problème de la gestion des boues va devenir, d'ici quelques années, crucial d'après les experts, parmi les différents type de conditionnement on a l'électrocoagulation, c'est une méthode de traitement des eaux usées développée en 1889 (**Chen 2003 ; Débillement 1996**), après avoir délaissée pendant quelque années elle reprend de l'importance dans plusieurs domaines du traitement des eaux.

L'objectif de ce présent travail vise à optimiser le conditionnement et la déshydratation des boues de la STEP de Beni-Messous.

Pour cela nous avons réalisé des essais d'électrocoagulation dans un système électrochimique continu avec des électrodes de fer, les densités de courant variant de 150 à 700 A/m², le temps de traitement est maintenu constant (15 min), en appliquant une lente agitation (40tr/min).

Les processus électrolytiques impliquant le passage d'un courant électrique au sein de la solution à traiter, et en même temps, diverses réactions chimiques se produisent aux électrodes. Ces réactions peuvent mettre en jeu le dégagement de gaz, la séparation de substances, la dissolution de l'électrode ou l'apparition de nouvelles substances dans la solution (formation de floes).

Ces essais ont permis de montrer l'intérêt de la densité de courant, une bonne séparation solide /liquide s'améliore en augmentant la densité de courant, la meilleur valeur de la siccité (Sc.= 23,19%) est obtenue avec $i=700\text{A/m}^2$, mais avec une forte consommation énergétique soit $P=28,6\text{ KWh/m}^3$.

On a choisis de varier le temps avec deux valeurs de densités, qui sont respectivement de 350 et de 700A/m². Les valeurs du temps d'électrolyse sont respectivement de 15 ,30 ,45 ,60 et 75 min.

On peut tirer de ces essais, qu'approximativement la même valeur de la siccité est obtenue en augmentant le temps et en diminuant la densité de courant. Ainsi, nous obtenons une valeur de siccité de 23,19 % pour une densité de 700A/m² et un temps de 15 min et une valeur de siccité de 23,89% pour une densité de 350 A/m² et un temps de 45 min

De même nous avons réalisé des essais en variant le pH de la solution avec $i=350\text{A/m}^2$ et $t=45\text{min}$, les valeurs du pH sont comprises entre 2 et 12.

A pH 2 on a obtenu la meilleure siccité, soit $Sc = 26,6\%$, de même le volume de filtrat augmente par apport au cas $pH_{initial}$. Nous obtenons un volume de filtrat de 79 ml avec un temps de filtration de 32 min à $pH_{initial}$. Par contre pour un pH 2, le volume du filtrat est de 92 ml avec un temps de filtration de 10 min.

En dernier lieu, nous avons fixé le pH à la valeur de 2, la densité de courant a $350A/m^2$ et le temps d'électrolyse a 45min pour faire varier le dernier paramètre qui est la conductivité électrique.

On constate que dans les conditions ou la densité de courant est de $350A/m^2$, le temps d'électrolyse de 45min, le pH 2 et la concentration en NaCl de 9g/l ; nous obtenons les meilleurs résultats ; soit une augmentation de la siccité « 28% », une diminution de la puissance consommée « 5,89 KWh/m³ », une diminution de la RSF « $1,12 \cdot 10^{12}$ » et enfin, un taux de filtration de 92% avec un temps de filtration de 3,5 min. Ainsi les boues acidifiées ont une bonne déshydratabilité et permettent l'obtention de boues solides (**degremont 2005**).

Ces résultats sont globalement encourageants et incitent à poursuivre la recherche. Des essais supplémentaires pourraient améliorer l'efficacité de l'électrocoagulation des boues.

- **Adhoum N. et L. Monser (2004)**. Decolourization and removal of phenolic compound from olive mill wastewaters by electrocoagulation. *Chem. Eng. Process.*, 43, 1281-1287
- **Anane Ouerdia(2008)**. Amélioration de la technique de defluoruration par le nouveau procédé d'électrocoagulation bipolaire ; magister en chimie de l'environnement, Université de Tizi-Ouzou ; 138p.
- **Amir Soumia (2005)** Contribution à la valorisation de boues de stations d'épuration par compostage : devenir des micropolluants métalliques et organiques et bilan humique du compost. /docteur en science agronomique. /Toulouse/341p.
- **Barrera-Diaz C, Urena-Nunez F, Campos E, Palomar-Pardave M, Romero-Romo M. (2003)**. A combined electrochemical-irradiation treatment of highly colored and polluted industrial wastewater, *Radiat. Phys.Chem.* **67**:657-663
- **Baudez Jean Christophe /2001/**premiere approche dans l'épuration/Ecole Nationale du Génie Rural,des Eaux et des Forets(Paris).
- **Blais.J.F;Drogui.P;Barau.M.A;Mercier.G.** « procédés électrochimique de conditionnement et de stabilisation des boues d'épuration municipales et industrielles », brevet canadien N° :C02F11/12(2006,01) déposé le 29/06/2004.
- **Boeglin J.C /1997/**. Inventaire des traitements d'eaux résiduaires/technique de l'ingénieur/j3944-1
- **Bougreir Claire /2005/** Optimisation du procédé de méthanisation par mise en place d'un Co traitement physico-chimique : Application au gisement de biogaz représenté par les boues d'épuration des eaux usées mémoire de doctorat de l'université Montpellier II.
- **Bureau.Marc André (2004)**, Stabilisation et traitement électrochimique des boues d'épuration municipales et industrielles, docteur a l'université du Québec ; eau terre et environnement/123p
- **Chafou Ahmed/2007/** Performance du procédé Electrocoagulation pour L'épuration d'une émulsion d'huile de coupe/Mémoire de Fin d'Etude d'ingénieur en Hydraulique (ENSH – Blida)
- **Chen L.Lai ,Sheng H. Lin. (2003)** electrocoagulation of chemical mechanical polishing (CMP) wastewater from semiconductor fabrication.*Chemical Engineering journal* 95.205-211.
- **Coiftier Aline /2005./**analyse critique de la réglementation relative à la valorisation agricole des boues de station d'épuration/Ingénieur du Génie Sanitaire/ENSP/206.

- **Colin, F. /1990 /:** Caractérisation et typologie des boues résiduaires en vue de leur utilisation agricole. /Institut de recherche hydrique de Nancy/ co-traitement physico-chimique : Application au gisement de biogaz 120p
- **Daneshvar,N; Ashassi sorkhadi.H;Tizpar.A/2003/**decolorization of orange II by electrocoagulation method /separ .purif .technol.31(2),153-162.
- **Dégremont 2005,** Mémento Technique de L'eau, Paris : Lavoisier technique et documentation. Tome 1. 932p
- **Degremont 1998.** Mémento Technique de L'eau, Paris : Lavoisier technique et documentation. Tome2 .1524p
- **Degrémont/1989, OTV, 1997.**
- **Deschamps et al /1989 /**traitement des sols contaminés par les métaux lourds/202p.
- **Durand.B ;Larue.O; Voroliev.E; Vu .C/2003/**electrocoagulation and coagulation by iron of latex particles in aqueous suspensions/separ.purif.technol./31 (2), 177-192.
- **Eckflender/**traduit de l'américain par L .vandevenne./gestion des eaux usées urbaine et industrielle. Electrocoagulation d'Eaux Faiblement Minéralisées/doctorat de l'université de Limoges/chimie et microbiologie de l'eau/282p.
- **Gaid Abdelkader /1984/:** épuration biologique des eaux usées urbaines / Ed : N° 1274 Alger
- **Gaujous D/1995. /** La pollution des milieux aquatiques : aide-mémoire. /Edition technique et documentation Lavoisier. Paris
- **Guediri Abdelmadjid / 2008/** Etude De L'épuration Par Electrocoagulation Des Eaux Usées Urbaines Mémoire de Fin d'Etude d'Ingénieur en Hydraulique/ (ENSH).
- **Guibelin Eric/1999/**lutte contre la pollution des eaux, traitement des boues d'épuration/technique de l'ingénieur.
- **Hadj Kouider Saida/2011/**caractérisation et traitement des boues d'épuration de la ville d'Alger/magister en génie de l'environnement/USDB/111.
- **Henry Monchy (1978),** Mémento d'assainissement, Edition Eyrolles. Paris
- **Irdemez S., Yildiz Y.S., Tosunoglu V. (2006)** Optimisation of phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with aluminium plate electrodes. Separation and Purification Technology ,52(2),394-401.

- **Jardé Emilie/2002/** composition organique de boues résiduelles de station d'épuration lorraines : caractérisation moléculaire et effets de la biodégradation. /docteur de l'université Henri Poincaré,Nancy/286.
- **Jean-Pierre Bechac, Pierre Boutin, Bernard Mercier, Pierre Nuer/1984/**traitement des eaux usées/ Paris Eyrolles .281p.
- **Koby M .,Hiz H .,Senturk E .,Aydiner C., Demirbas E.(2006).**treatment of potato chips manufacturing wastewater by electrocoagulation .dessalination ,201-211.
- **Koby M.,Demirbas E., Dedili A ., SensoyM.T.(2010)** treatment of rinse water from zinc phosphate coating by batch and continuous electrocoagulation process .Journal of Hazardous Materials.173,326-334.
- **Khemis M., J.P. Leclerc, G. Tanguy, G. Valentin et F. Lopicque (2006).** Treatment of industrial liquid wastes by electrocoagulation. Experimental investigations and an interpretation model. *Chem. Eng. Sci.*, 61, 3602-3609.
- **Koparal A.S.,Ogutveren UB.(2002)** removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation .Journal of Hazardous Materials,B89,83-94.
- **Kumar N.S.,Goel S.(2010)** factor influencing arsenic and nitrate removal from drinking water in a continuous flow electrocoagulation process. Journal of Hazardous Materials 173 ,528-533.
- **Labanowski J.,Pallier V., Feuillade-Cathalifaud G.(2010)** .Study of organic matter during coagulation and electrocoagulation process :application to a stabilized landfill leachate.Journal of Hazardous Materials 179.166-172.
- **Lassée C (1985).**analyse des boues ; utilisation agricole des boues .AFEE, tome 3, paris 122p
- **Laubenberger et Hartmann/1997/**réutilisation des eaux épurées dans l'agriculture/76-82. Ecole National du Génie Rural des Eaux et Forêts Paris,
- **Leonard Angélique /2002/** étude du séchage convectif de boues de station d'épuration, suivi de la texture par microtopographie a rayons X/ docteur en science appliquées/université de liège/273p.
- **Malakootian M.,Mansoorian H.J.,Moosazadeh M.(2010).**performance evaluation of electrocoagulationprocess using iron-rod electrodes for removing hardness from drinking water.dessalination 225.67-71.
- **Matteson M.J .,Dobson.R.L .,Glenn Jr R.W .,Kukunoor N.S. ;Waits III W.H & Clayfield E.J. (1995)** electrocoagulation and separation of aqueous suspensions of

ultrafine particles. *Colloids and surfaces A :Physicochemical and Engineering aspects*.104,101-109.

- **Ministère de l'environnement.**/1994/ Cahier Technique/ L'assainissement des agglomérations. Techniques d'épurations actuelles et évolution.
- **Moletta .R/2003/** Le traitement des boues des stations d'épuration/ Document d'information générale -Diffusion référencée libre/6p.
- **Mollah M.A; Schennac.R; Parga; J.R.Cocke,D.L/2001/electrocoagulation (EC), science and application, J.Hazardous.Mater. B.84 (1), 29-41.**
- **Morel J .L/1978 /:** boues résiduelles et fertilisation phosphatée. *Revue phosphore et agriculture*, pp. 15 – 22.
- **Moreno-Cassilas HA, Cocke DL, Gomes JAG, Morkovsky P, Parga JR, Peterson E. (2007).** Electrocoagulation mechanism for COD removal. *Sep. Purif. Technol.* **56**:204-211
- **Mounir Bennajah/2007/traitement des rejets industriels liquide par electrocoagulation, electroflotation en réacteur airlift/**docteur de l'institut polytechnique de Toulouse/génie des procédés et de l'environnement/204p.
- **Navas.A .Bermudez,A et Machin,J./1992/influence of sewage sludge application on phesical and chemical properties of gypsisols/pp,87-135.**
- **Nikolaev.N.V., A.S. Kozlovski et I.I. Utkin (1982).**Treating natural waters in small water systems by filtration with electrocoagulation. *Soviet J. Water Chem. Technol.*, **4**, 244-247.
- **Novikora S.P., T.L. Shkorbatova et E.Y. Sokol(1982).**Purification of effluents from the production of synthetic detergents by electrocoagulation. *Soviet J. Water Chem. Technol.*, **4**, 353-357.
- **Ofir E.,Oren Y., & Adin .A.(2007)** comparing pretreatment by iron of electroflocculation and chemical flocculation.desalination,204,87-93.
- **Parama Kalyani K.S., Balasubramanian N.,Srinivasakannan C.(2009)** .decolorizationand DCO reduction of paper industrial effluent using electrocoagulation.*Chemical Engineering Journal* **151**.97-104.
- **Parga J.R .,Cocke D.L .,Valverde V., Gomes J.A.G .,Kesmez M .,Moreno H .,Weir M.& Mencrer D.(2005).**Characterization of electrocoagulation for removal of chromium and arsenic .*Chemical Engineering and Technology* ,**28**.605-612.

- **Petit .Karine.Marie.Béatrice** /2007/actualisation des connaissances sur les éléments biologiques et minéraux persistants dans les boues de station d'épuration. Impact sur la santé publique. /doctorat vétérinaire/école nationale vétérinaire alfort./141.p
- **Phillipe duchene cemagref**/1990/les systèmes de traitement des boues des stations d'épuration des petites collectivités/documentation technique/30.
- **Pommel.**/1979/ valorisation des déchets ; les boues résiduelles des stations d'épuration ; station d'agronomie de Bordeaux. représenté par les boues d'épuration des eaux usées/doctorat de l'université Montpellier/Génie des procédés/INRA.
- **Ramel. C**/ la valorisation agricole des boues liquide de station d'épuration. Institut national polytechnique de Toulouse. (article)
- **Selhani Soumia**/2009/ Etude des possibilités d'utilisation des eaux et boues d'épuration,mémoire de fin d'étude d'ingénieur en hydraulique (ENSP).
- **Sengil IA, Ozacar M.** 2006.Treatment of dairy wastewaters by electrocoagulation using mild steel electrodes. J. Haz. Mater. **137**:1197-1205.
- **Sergio Perez Fabiel**/ Etude de la biodégradabilité de boues secondaires soumises à un traitement thermique à 65°C et du couplage digestion anaérobie et digestion thermophile aérobie pour la réduction de boues/doctorat en science des procédés/229p
- **Smollen**/1988/traitement des eaux usées par un procédé biologique/132p.
- **Virginie Pallier**/2008/ Elimination de l'Arsenic par Coagulation Flocculation et electrocoagulation d'eaux faiblement minéralisées,chimie et microbiologie de l'eau.doctorat de l'université de Limoges.282p
- **Xinhua X, Xiangfen Z.** 2004.Treatment of refractory oily wastewater by electrocoagulation process. Chemosphere. **56**:889-894.
- **Xueming chen and al** (2000), separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation; separation and purification technology, 19; 65-76.

