

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE BLIDA 1



Faculté de technologie

Département des sciences de l'eau et l'environnement

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de master en Sciences de l'Eau

Filière : Hydraulique

Spécialité : Sciences de l'eau

Thème :

Conditionnement électrochimique des boues d'épuration des eaux usées urbaines avec ajout d'un biofloculant (poudre de cactus) : Cas de la station d'épuration des eaux usées de la ville de Beni-Messous (Wilaya d'Alger).

Présenté par :

M^{elle} SAYAH Hind

Devant le jury composé de :

Mme ANSER M.	Maître de conférences A	Univ. Blida 1	Promotrice.
M. BESSENASSE M.	Professeur	Univ. Blida 1	Président.
M. BENSAFIA D.	Maître de conférences B	Univ. Blida 1	Examinateur.
Mme BOUZOUIDJA S.	Maître assistante A	Univ. Blida 1	Examinatrice.

Année universitaire : 2015/2016

Remerciements :

Avant toute chose, je remercie ALLAH, le tout puissant, pour m'avoir donnée la force et la patience.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements et mes sincères reconnaissances à ma promotrice Mme Anser M. pour avoir accepté de diriger ce travail, pour la confiance, sa disponibilité et son aide précieuse.

J'exprime mes profonds remerciements et ma reconnaissance à Mr Bensafia D., le chef de département de science de l'eau et l'environnement et Mme Bensafia de m'avoir accueilli et procuré tous les moyens pour réaliser mes travaux expérimentaux au sein de laboratoire du traitement des eaux

Je remercie vivement Mr Aouabed A., professeur au département de chimie industrielle, pour son aide, pour toutes les précieux conseils et de nous fournir le matériel de la filtration sous vide et d'autres appareils.

Je remercie l'équipe de la station d'épuration des eaux usées de benimessous pour leur aide précieuse.

Je remercie tous les membres de jury d'avoir bien voulu accepter de juger ce travail.

En fin, j'exprime mes vifs remerciement à tous ceux et celles qui ont contribué, de de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace :

Je dédie ce mémoire

A ma chère mère et mon père qui m'encourager.

A mes chers frères.

A ma grand-mère et mon grand-père.

A tous mes oncles et tantes, cousin et cousines.

A mes meilleur amis surtout : B. Manel, T. Soumia, B. Asmaa, A. Asmaa, T. Ielía. Et à tous ceux qui me connaissent.

A tous mes professeurs.

Résumé :

Ce travail concerne l'étude de conditionnement électrochimique des boues résiduelles d'une station d'épuration des eaux usées (STEP de la ville de Beni-Messous wilaya d'Alger). Le procédé électrochimique qui est l'électrocoagulation a été combiné avec la poudre de cactus "Opuntia ficus indica" algérienne (comme un bioflocculant) afin d'améliorer le conditionnement. La déshydratation en suite a été examinée par l'application d'une filtration sous vide. Le but de ce travail est d'augmenter la siccité et diminuer la résistance spécifique à la filtration $r_{0,5}$.

Au cours de ce travail, nous avons étudié l'influence de la densité de courant, le temps d'électrolyse, l'ajout de différentes dose de bioflocculant et l'ajustement de pH, afin de déduire les conditions optimales de ce procédé.

L'application de procédé d'électrocoagulation nous a permis d'augmenter la siccité de 14.34 % jusqu'à 26.45 % et diminuer la résistance spécifique de $9.72 \times 10^{13} \text{ m.kg}^{-1}$ jusqu'à $1.54 \times 10^{13} \text{ m.kg}^{-1}$ par l'application d'une densité de courant de 100 A.m^{-2} avec un temps d'électrolyse de 15 min. l'ajout de bioflocculant qui est la poudre de cactus a amélioré la déshydratation, nous avons trouvé une bonne résistance spécifique qui a été diminué jusqu'à 8.49×10^{12} avec une dose de 0.5 g.kg^{-1} , une densité de courant 100 A.m^{-2} et un temps d'électrolyse de 15 min.

Mots clés : boues résiduelles, électrocoagulation, conditionnement, déshydratation, siccité, résistance spécifique à la filtration, opuntia ficus indica, bioflocculant, la poudre de cactus.

:

يتعلق هذا
مياه الواقعة بمدينة
تكييف الكهروكيميائي
مياه الولاية
" اوبنتيا فيكيس أنديكا "
(حيوي) لتحسين التكتيف.
عملية
هو زيادة جفاف وتخفيض المقاومة المحدد للترشيح.
جرعات مختلفة من المكثف الحيوي وتعديل
هذا تأثير تيار، التكهرب
، حتى نستنتج الشروط المثلى لهذه العملية.

تطبيق عملية التكتيف الكهربي
لترشيح من $10^{13} \times 9.72$. $10^{13} \times 1.54$.
15 دقيقة. إضافة المكثف الحيوي الذي هو مسحوق الصبار حسن
لترشيح جيدة حيث
عملية التكتيف
مدة تكهرب 15 دقيقة.

الكلمات المفتاحية :
مياه
اوبنتيا فيكيس انديكا،
حيوي

Abstract :

This work concerns the study of electrochemical conditioning of sewage sludge from a treatment plant wastewater (WWTP Beni-Messous wilaya of Algiers). The electrochemical process is that electrocoagulation was combined with the cactus powder 'Opuntia ficus indica' 'Algerian (as a biofloculant) to ameliorate the conditioning. Dehydration after was examined by applying vacuum filtration. The aim of this work is to increase dryness and reduce the specific resistance to filtration $r_{0.5}$.

In this work, we studied the influence of the current density, the electrolysis time, addition of different dose of biofloculant and the adjustment of pH, to derive the optimum conditions of this process.

The application of electrocoagulation process allows us to increase the dryness of 14.34% to 26.45% and reduce the specific resistance of $9.72 \times 10^{13} \text{ m.kg}^{-1}$ to $1.54 \times 10^{13} \text{ m. kg}^{-1}$ by applying a density of current of 100 Am^{-2} with an electrolysis time of 15 min. the addition of biofloculant which is the cactus powder has improved dehydration, we found a good specific resistance was decreased to 8.49×10^{12} with a dose of 0.5 g.kg^{-1} , a density current 100 Am^{-2} and an electrolysis time of 15 min.

Key words: sewage sludge, electrocoagulation, conditioning, dehydration, dryness, specific filtration resistance, Opuntia ficus indica, biofloculant, the cactus powder.

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
الملخص	
Abstract	
Table des matières	
Liste des annexes	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des symboles et des abréviations	
Introduction générale.....	2
Chapitre I : Synthèse bibliographique	
I.1. Introduction.....	4
I.2. Origine des eaux résiduaires urbaines (ERU)	5
I.3. Description d'une station d'épuration des eaux usées urbaines.....	5
I.3.1. Définition d'une station d'épuration des eaux usées.....	5
I.3.2. Etapes de traitement dans la station d'épuration des eaux résiduaires urbaines.....	6
I.3.2.1. Filière eau.....	6
I.3.2.2. Filière boue.....	8
I.3.2.2.1 Définition d'une boue	8
I.3.2.2.2. Origine et nature des boues	9
I.3.2.2.3. Composition des boues.....	10
I.3.2.2.4. Caractéristiques des boues.....	10
I.3.2.2.5. Etapes de traitement des boues.....	11
I.4. Destination finale des boues traitées.....	13
I.5. Le conditionnement des boues.....	13
I.5.1. Conditionnement chimique.....	13
I.5.2. Conditionnement thermique.....	14

I.5.3. Conditionnement électrochimique.....	14
I.6. La déshydratation.....	14
I.6.1. Déshydratation naturelle.....	14
I.6.2. Déshydratation mécanique.....	14
I.6.2.1. La filtration	14
I.6.2.2. Centrifugation.....	17
I.7. Rappel sur la coagulation-floculation.....	17
I.8. Le procédé d'électrocoagulation.....	17
I.8.1. Théorie de l'électrolyse.....	17
I.8.2. Définition d'électrocoagulation.....	18
I.8.3. Historique des applications du procédé d'électrocoagulation.....	18
I.8.4. Principe de l'électrocoagulation.....	19
I.8.5. Mécanisme du procédé d'électrocoagulation.....	20
I.8.6. Facteurs influençant l'électrocoagulation.....	22
I.8.7. Avantages et inconvénients de l'électrocoagulation.....	24
I.9. Généralité sur l'Opuntia ficus indica.....	26
I.9.1. Origine et diffusion.....	26
I.9.2. Position systématique.....	26
I.9.3. Description de la plante.....	27
I.9.4. Composition chimique des cladodes.....	28
I.9.5. L'importance de l'Opuntia ficus indica (OFI).....	29
I.9.6. Utilisation de l'Opuntia ficus indica dans le traitement des eaux.....	30
I.10. Conclusion.....	32

Chapitre II : Matériels et méthodes

II.1. Introduction.....	34
II.2. Objectifs de l'étude expérimentale.....	34
II.3. Présentation de la station d'épuration de Beni Messous (wilaya d'Alger).....	34

II.4. Matériels de travail.....	34
II.4.1. Verreries.....	34
II.4.2. Produits chimiques.....	34
II.4.3. Appareils.....	34
II.5. Méthodologie.....	35
II.5.1. Echantillonnage et méthode de caractérisation de la boue stabilisée.....	35
II.5.1.1. Echantillonnage.....	35
II.5.1.2. Méthode de caractérisation de la boue stabilisée.....	35
II.5.2. Techniques expérimentales.....	36
II.5.2.1. Le conditionnement par électrocoagulation.....	36
II.5.2.1.1. Mode opératoire.....	36
II.5.2.1.2. Méthode de caractérisation de l'électrocoagulation.....	37
II.5.2.2. La filtration sou vide.....	38
II.5.2.2.1. Mode opératoire.....	38
II.5.2.2.2. Méthode de caractérisation de la filtration sou vide.....	39
II.5.2.3. Préparation de biofloculant (la poudre de cactus).....	40
II.5.2.4. Les conditions opératoires pour l'étude expérimentale.....	42
II.6. Conclusion.....	43

Chapitre II : Résultats et discussions

III.1. Introduction.....	45
III.2. Caractérisation physico-chimique de l'échantillon de boue stabilisée (non conditionnée).....	45
III.3. L'influence de la densité de courant.....	45
III.3.1. L'influence de la densité de courant sur l'énergie consommée.....	45
III.3.2. L'influence de la densité de courant sur la concentration en fer dissous.....	46
III.3.3. L'influence de la densité de courant sur le pH final de la solution.....	47
III.3.4. L'influence de la densité de courant sur la siccité du gâteau.....	48

III.3.5. L'influence de la densité de courant sur la résistance spécifique.....	49
III.3.6. L'influence de la densité de courant sur le volume de filtrat recueilli.....	50
III.4. L'influence de temps d'électrolyse.....	52
III.4.1. L'influence de temps d'électrolyse sur l'énergie consommée.....	52
III.4.2. L'influence de temps d'électrolyse sur la concentration en fer dissous.....	53
III.4.3. L'influence de temps d'électrolyse sur le pH final de la solution.....	54
III.4.4. L'influence de temps d'électrolyse sur la siccité du gâteau.....	55
III.4.5. L'influence de temps d'électrolyse sur la résistance spécifique.....	56
III.4.6. L'influence de temps d'électrolyse sur le volume de filtrat recueilli.....	58
III.5. L'influence de la dose de biofloculant.....	60
III.5.1. L'influence de la dose de biofloculant sur l'énergie consommée.....	61
III.5.2. L'influence de la dose de biofloculant sur la siccité du gâteau.....	62
III.5.3. L'influence de la dose de biofloculant sur la résistance spécifique.....	63
III.5.4. L'influence de la dose de biofloculant sur le volume de filtrat recueilli.....	65
III.6. L'influence de pH.....	66
III.6.1. L'influence de pH sur l'énergie consommée.....	67
III.6.2. L'influence de pH sur la conductivité de la boue.....	67
III.6.3. L'influence de pH sur siccité du gâteau.....	68
III.6.4. L'influence de pH sur la résistance spécifique.....	69
III.6.5. L'influence de pH sur le volume de filtrat recueilli.....	70
III.7. Conclusion.....	72
Conclusion générale.....	74

Références bibliographiques

Annexes

Liste des annexes :

Annexe 1 : Matériels utilisés.....87

Annexe 2 : Calcule de la Resistance spécifique à la filtration de la boue stabilisée.....88

Annexe 3 : Préparation des doses de biofloculant (la poudre de cactus).....89

Liste des Figures

Figure I.1 : L'origine des eaux résiduaires urbaines (ERU).....	5
Figure I.2 : Schéma d'une station d'épuration des eaux résiduaires urbaines (ERU).....	6
Figure I.3 : Boues liquides provenant de l'épuration des eaux usées.....	8
Figure I.4 : Schéma de la filière de traitement des boues d'épuration.....	11
Figure I.5 : Photo d'un filtre à tambour rotatifs (filtration sous vide).....	15
Figure I.6 : Photo d'un filtre-pressé (filtration sous pression).....	16
Figure I.7 : Photo d'un filtre à bande (filtration sous pression).....	16
Figure I.8 : Schéma de fonctionnement de la décanteuse centrifugeuse.....	17
Figure I.9 : Réacteur simple d'électrolyse.....	18
Figure I.10 : Schéma du principe du processus d'électrocoagulation.....	20
Figure I.11 : Diagramme de Pourbaix du fer.....	23
Figure I.12 : Vitesse de corrosion du fer en fonction du pH.....	23
Figure I.13 : Distribution géographique du figuier de Barbarie.....	26
Figure I.14 : L'Opuntia ficus indica (Le figuier de barbarie).....	27
Figure I.15 : a) Les raquettes (cladodes), b) Les épines, c) Les aréoles, d) fleur d'OFI, e) Fruit d'OFI.....	28
Figure II.1 : Bassin de stabilisation de la STEP de Beni Messous.....	35
Figure II.2 : Photo de montage expérimentale de l'électrocoagulation.....	36
Figure II.3 : Photo de montage expérimentale de la filtration sous vide.....	38
Figure II.4 : (a) Elimination des épines d'une cladode de cactus, (b) Découpage de la cladode en dés.....	41
Figure II.5 : Séchage des morceaux de cactus au soleil.....	41
Figure II.6 : Les dés de cactus après séchage au soleil.....	42
Figure II.7 : (a) Photographie d'un broyeur de laboratoire, (b) La poudre de cactus après broyage et tamisage.....	42
Figure III.1 : L'influence de la densité de courant sur l'énergie consommée (W).....	46

Figure III.2 : L'influence de la densité de courant sur la concentration en fer dissous (C Fe).....	47
Figure III.3 : L'influence de la densité de courant sur pH final de la boue.....	47
Figure III.4 : L'influence de la densité de courant sur la siccité du gâteau (Sc).....	48
Figure III.5 : L'influence de la densité de courant sur la résistance spécifique (Rsf).....	49
Figure III.6 : L'influence de la densité de courant sur le volume de filtrat recueilli.....	50
Figure III.7 : a) L'état de l'anode et la cathode après électrocoagulation, b) Anode après électrocoagulation nettoyé avec l'eau.....	51
Figure III.8 : Boue après électrocoagulation avec $i= 150 \text{ A.m}^{-2}$ et $T= 15 \text{ min}$	52
Figure III.9 : L'influence de temps d'électrolyse sur l'énergie consommée (W).....	53
Figure III.10 : L'influence de temps d'électrolyse sur la concentration en fer dissous (C Fe).....	53
Figure III.11 : L'influence de temps d'électrolyse sur pH final de la boue.....	54
Figure III.12 : L'influence de temps d'électrolyse sur pH final de la boue.....	55
Figure III.13: L'influence de temps d'électrolyse sur la siccité du gâteau (Sc).....	56
Figure III.14 : L'influence de temps d'électrolyse sur la résistance spécifique (Rsf).....	57
Figure III.15 : L'influence de temps d'électrolyse sur le volume de filtrat recueilli.....	58
Figure III.16 : L'influence de temps d'électrolyse sur le volume de filtrat recueilli.....	58
Figure III.17 : Photos obtenus après l'électrocoagulation de la boue.....	59
Figure III.18 : Photo obtenu après environ une minute de l'électrocoagulation.....	60
Figure III.19 : L'influence de la dose de biofloculant sur l'énergie consommée (W).....	61
Figure III.20 : L'influence de la dose de biofloculant sur l'énergie consommée (W).....	61
Figure III.21 : L'influence de la dose de biofloculant sur la siccité du gâteau (Sc).....	62
Figure III.22 : L'influence de la dose de biofloculant sur la résistance spécifique.....	64
Figure III.23 : L'influence de la dose de biofloculant sur le volume de filtrat recueilli.....	65
Figure III.24 : L'influence de la dose de biofloculant sur le volume de filtrat recueilli.....	65
Figure III.25 : Photo obtenue après électrocoagulation avec biofloculant. $i= 100 \text{ A.m}^{-2}$,	

T=15 min et D= 0,5 g/kg.....	66
Figure III.26 : L'influence de pH sur l'énergie consommée (W).....	67
Figure III.27 : L'influence de pH sur la conductivité final de la boue.....	68
Figure III.28 : L'influence de pH sur la siccité du gâteau (Sc).....	68
Figure III.29 : L'influence de pH sur la résistance spécifique.....	69
Figure III.30 : L'influence de pH sur le volume de filtrat recueilli.....	70
Figure III.31 : Photos des boues obtenues après conditionnement (électrocoagulation + la poudre de cactus) avec différents pH et avec $i= 100 \text{ A.m}^{-2}$, T= 15 min et D= 0.5 g/kg.....	71

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Différentes boues obtenue selon diverses origines.....	9
Tableau I.2 : Les éléments fertilisants dans les boues fraîches.....	10
Tableau I.3 : Historique des applications du procédé.....	19
Tableau I.4 : Composition chimique moyenne de raquettes d'Opuntia.....	28
Tableau III.1 : Caractérisation physico-chimique de l'échantillon de boue stabilisée de la STEP de Béni-Messous.....	45
Tableau III.2 : la résistance spécifique et la siccité par rapport aux densités de courant.....	51
Tableau III.3 : la résistance spécifique et la siccité par rapport aux densités de courant.....	57
Tableau III.4 : Comparaison entre les siccités trouvés sans et avec biofloculant avec les densités de courant 100 A.m^{-2} et 150 A.m^{-2} et un temps d'électrolyse de 15 min.....	63
Tableau III.5 : Comparaison entre les valeurs de la résistance spécifique trouvées sans et avec biofloculant avec les densités de courant 100 A.m^{-2} et 150 A.m^{-2} et un temps d'électrolyse de 15 min.....	64

Liste des symboles et des abréviations

Symboles	désignation	Unité
a	Pente de la droite obtenue lors de l'essai de filtrabilité	s.m ⁻⁶
C	Concentration des boues à entrée de l'appareil	kg.m ⁻³
CFe	Concentration en fer dissous expérim	g.L ⁻¹
D	Dose de biofloculant	g.kg ⁻¹
DBO ₅	Demande biologique en oxygène à 5 jours	mg.L ⁻¹
DCO	Demande chimique en oxygène	mg.L ⁻¹
EC	Electrocoagulation	
ERU	Eaux residuaires urbaines	
g	acceleration de la pensateur	m.s ⁻²
i	Densité de courant électrique	A.m ⁻²
I	Intensité de courant électrique	A
m	Masse	g
M ₀	Masse du papier filtre	
M ₀ '	Masse du Coupelle en aluminium vide.	g
M ₁	Masse du gâteau humide + le papier filtre	g
M ₂	Masse gâteau sec (à 105°C) + le papier filtre	g
M ₃	Masse du gâteau sec (à 550°C) + la coupelle en aluminium	g
MES	Matière en suspension	g.L ⁻¹
MM	Teneur en matière minéral	g.L ⁻¹
MO	Matière organique	g.L ⁻¹
MS	Matière sèche	g.L ⁻¹
MVS	Matière volatile	g.L ⁻¹
OFI	Opuntia ficus idica	
pH	Potentiel d'Hydrogène	
p	Pression	Pa

r (ou RSF)	Résistance spécifique à la filtration	m.kg^{-1}
S	Surface filtrante	m^2
Sc	Siccité de la boue	%
STEP	Station d'épuration	
T	Temps d'électrolyse	min
t	Temps de filtration	min
U	Le tension appliqué entre les deux électrodes	V
V	Volume	mL
W	Energie électrique consommé	kWh.m^{-3}
η	Viscosité dynamique du filtrat	Pa.s

Introduction générale

Introduction générale :

L'eau est essentielle pour la vie de l'être vivant. Au cours de ces dernières années la croissance démographique de la population a été augmentée, par conséquent l'utilisation de l'eau a été augmentée aussi. Cette utilisation excessive de l'eau produit des grandes quantités des eaux usées, c'est pourquoi le traitement de ces eaux usées devient un défi considérable pour les sociétés actuelles.

Les eaux usées sont collectées puis acheminées vers les stations d'épuration où elles sont traitées et rejetées dans le milieu naturel.

La station d'épuration génère un sous-produit qui est les boues d'épuration, elles sont composées d'eau et de matières sèches contenant des substances minérales et organiques. Ces boues après leur traitement doivent être éliminées par l'incinération, la mise en décharge ou la valorisation agricole.

Les boues d'épuration sont volumineuses et chargées en eau, elles subissent plusieurs traitements tels que l'épaississement et la déshydratation pour diminuer leur forte teneur en eau et réduire leur volume afin de faciliter leur élimination, réduire la mauvaise odeur, minimiser les opérations de manutention et diminuer le coût de transport.

La déshydratation consiste de faire passer les boues de l'état liquide à un état solide, et pour un bon fonctionnement de la déshydratation il faut passer par l'étape de conditionnement qui permet la floculation des boues en cassant la stabilité colloïdale et facilite ainsi l'évacuation de l'eau libre ainsi que la diminution de la résistance spécifique et l'augmentation du coefficient de compressibilité.

Ce travail concerne l'étude du conditionnement électrochimique et la déshydratation des boues résiduaires d'une station d'épuration des eaux usées (STEP de la ville de Beni-Messous wilaya d'Alger) avec l'ajout de la poudre de cactus comme un biofloculant en combinaison avec l'électrocoagulation. Dans cette recherche on a essayé d'économiser le maximum d'énergie électrique et on a ajouté un biofloculant la poudre de cactus pour le conditionnement des boues, après on a déshydraté les boues conditionnées par un filtre sous vide et au cours de cette recherche on a étudié l'effet des paramètres suivantes: 'la densité de courant, le temps d'électrolyse, l'ajout de différentes doses de poudre de cactus, l'ajustement du pH' lors de l'application de ce procédé combiné afin d'augmenter la siccité du gâteau et diminuer la résistance spécifique à la filtration.

Dans le cadre de ce mémoire l'objectif recherché est d'améliorer le conditionnement électrochimique par un ajout d'un biofloculant la poudre de cactus pour avoir une bonne déshydratation des boues résiduaires.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

-) Le chapitre I: synthèse bibliographique, ce chapitre comporte principalement : l'origine des eaux résiduaires urbaines, le fonctionnement d'une station d'épuration des ERU,

l'étape de conditionnement et de déshydratation dans la filière de traitement des boues d'épuration, le processus d'électrocoagulation et l'Opuntia ficus indica (le figuier de barbarie).

-) Le chapitre II : Matériels et méthodes, ce chapitre est consacré aux matériels utilisés, les techniques expérimentales et les méthodes de caractérisation.
-) Le chapitre III : Résultats et discussions, ce chapitre illustre les résultats obtenus, suivi des interprétations et discussions.

Enfin, une conclusion générale sera présentée. Elle résumera les principaux résultats obtenus lors de ce travail.

Synthèse bibliographique

I.1. Introduction :

Différentes activités humaines produisent des eaux usées. Ces eaux usées sont collectées et acheminées vers la station d'épuration où elles sont traitées pour qu'elles ne dégradent pas la qualité du milieu naturel dans lequel elles seront finalement rejetées. L'épuration des eaux usées génère un sous-produit qui est la boue d'épuration qui doit être traitée et éliminée.

Les boues d'épuration sont volumineuses et chargées en eau, elles subissent plusieurs traitements pour diminuer leur forte teneur en eau et réduire leur volume afin de faciliter leur transport. Parmi les traitements nous citons le conditionnement et la déshydratation. La déshydratation consiste à faire passer les boues de l'état liquide à un état solide, et pour un bon fonctionnement de la déshydratation il faut passer par l'étape de conditionnement qui permet d'augmenter la siccité des boues.

L'aspect non polluant et les facilités d'automatisation que l'électricité apporte, devraient permettre un développement significatif des techniques électrochimique de traitement dans les prochaines années (Persin F. et Rumeau M., 1989). L'électrocoagulation est un procédé d'électrolyse à électrodes solubles qui met en solution un cation métallique (fer ou aluminium) provoquant la coagulation des colloïdes.

L'*Opuntia ficus indica* (le figuier de Barbarie) est un arbre qui est répandu dans plusieurs régions à climats arides et semi-aride. En Algérie cette plante est disponible avec très grande quantité. Cette culture a des plusieurs intérêts dans différents domaines : domaine fourragère et maraichère, l'industrie des cosmétiques, alimentaire, médicinal et aussi dans le domaine d'épuration des eaux usées.

I.2. Origine des eaux résiduaires urbaines (ERU) :

Les effluents urbains comprennent :

- Les eaux résiduaires ou eaux usées.
- Les eaux pluviales (Degrémont, 1989).

L'origine des eaux résiduaires urbaines (ERU) est principalement domestique (eaux vannes, eaux "grises") ; la part d'origine industrielle est généralement croissante avec la taille de l'agglomération. Les établissements industriels qui rejettent une pollution proportionnellement trop importante ou exigeant un traitement spécifique sont généralement dotés d'un système d'épuration autonome. Suivant le niveau de ce traitement, l'effluent industriel rejoint ensuite le milieu récepteur ou le système de collecte et de traitement des ERU (Degrémont, 1989).

La figure I.1 : représente L'origine des eaux résiduaires urbaines (ERU)

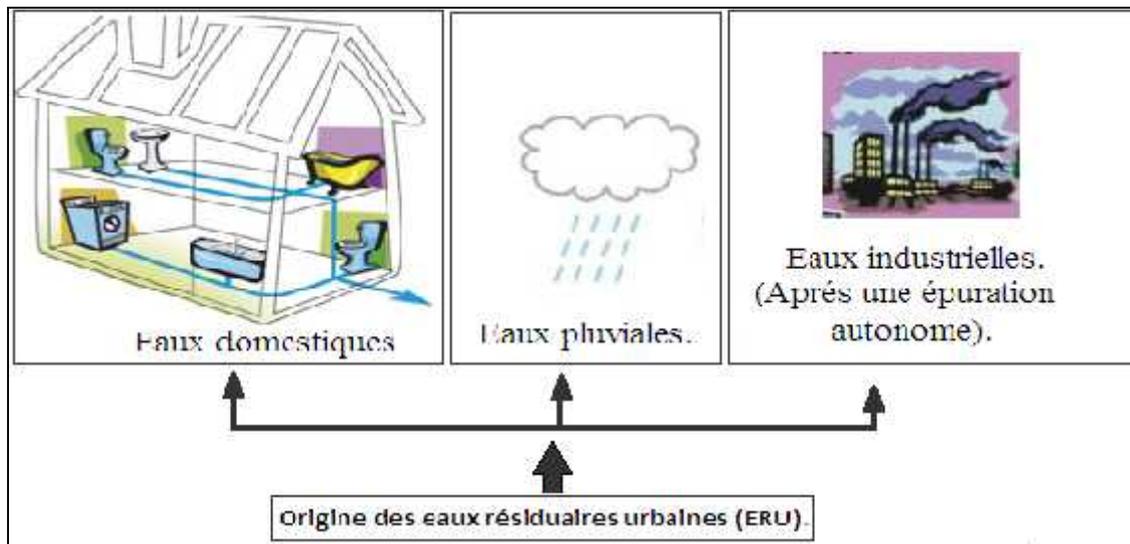


Figure I.1 : L'origine des eaux résiduaires urbaines (ERU).

Le système d'assainissement englobe, collecte et transport les effluents urbains vers la station d'épuration.

I.3. Description d'une station d'épuration des eaux usées urbaines :

I.3.1. Définition d'une station d'épuration des eaux usées :

La station d'épuration est une installation destinée à épurer les eaux usées domestiques ou industrielles et les eaux pluviales avant le rejet dans le milieu naturel. Le but du traitement est de séparer l'eau des substances indésirables pour le milieu récepteur.

Une station d'épuration est généralement installée à l'extrémité d'un réseau de collecte. Elle est constituée d'une succession de dispositifs, conçus pour extraire en différentes étapes les différents polluants contenus dans les eaux usées. La pollution retenue dans la station d'épuration est transformée sous forme de boues. La succession des dispositifs est calculée en

fonction de la nature des eaux usées recueillies sur le réseau et des types de pollutions à traiter. [a]

I.3.2. Etapes de traitement dans la station d'épuration des eaux résiduaires urbaines :

Les effluents urbains qui arrivent jusqu'à la station d'épuration contiennent :

-) Déchets divers, sables et des huiles ;
-) Des matières en suspensions (matières organiques et substances minérales.).

La station d'épuration contient deux filières de traitement: Filière eaux et filière boues.

I.3.2.1. Filière eau :

La figure I.2 : représente un schéma de principe de fonctionnement d'une station d'épuration des eaux résiduaires urbaines.

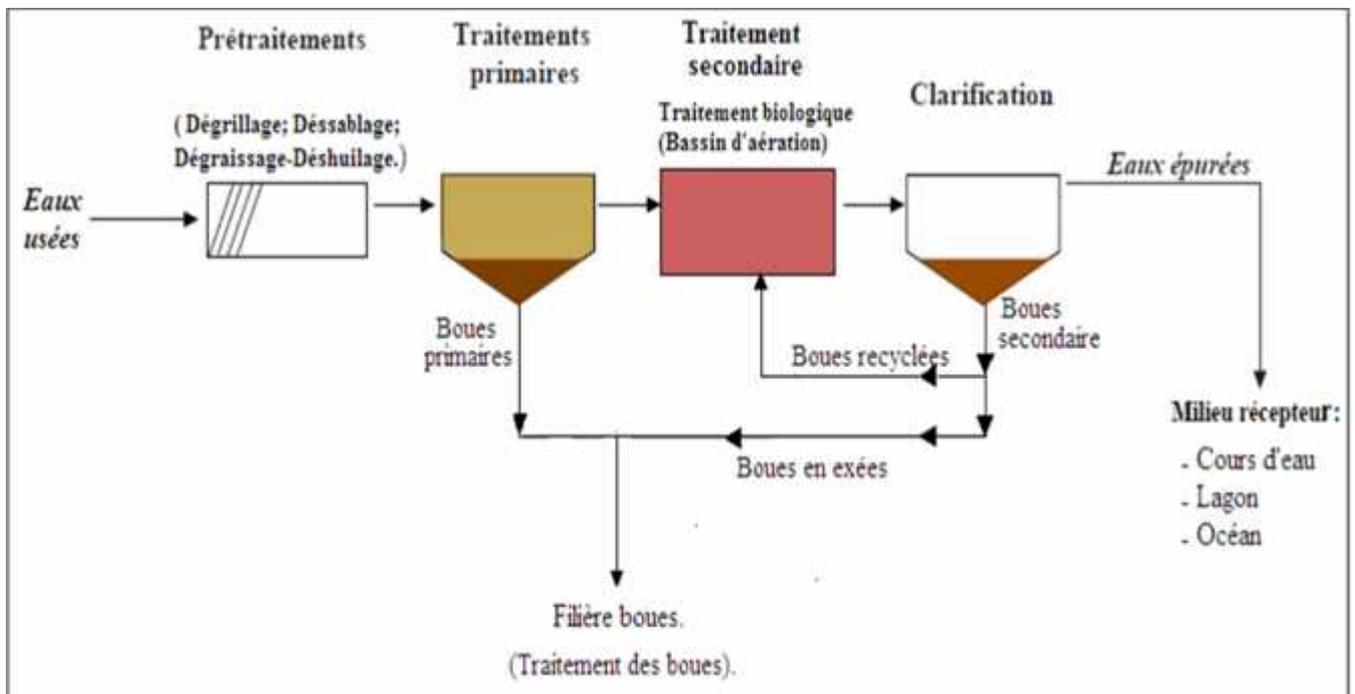


Figure I.2 : Schéma d'une station d'épuration des eaux résiduaires urbaines (ERU).

a) Prétraitement :

Les prétraitements physiques constituent une série d'opérations susceptibles d'alléger les eaux brutes des matières les plus grossières d'une part ou celles pouvant gêner le processus du traitement ultérieur (Gaid A., 1984).

Les opérations de prétraitement sont [b]:

Ñ Le dégrillage :

Il consiste à faire passer les eaux usées au travers d'une grille qui retient les déchets les plus grossiers.

Ñ Le dessablage :

Les sables contenus dans les eaux usées se déposent au fond du dessaleur.

Ñ Le dégraissage ou déshuilage :

Il consiste à retenir les matières flottantes solides, des graisses et des huiles par flottation naturelle de ces matières. [b]

b) Le traitement primaire : (Décanteur primaire)

Il a pour objectif de séparer par décantation les matières solides encore contenues dans le liquide provenant du prétraitement. [c]

Le traitement primaire élimine jusqu'à 60% de matières en suspension.

Les matières solides décantées se déposent dans le fond de l'ouvrage appelé décanteur pour former les boues primaire. Ces dernières sont récupérées au moyen d'un système de raclage (Boumediene M., 2013).

c) Le traitement secondaire :

Dans les stations d'épuration des eaux usées urbaines, il existe un traitement biologique car l'effluent reçu est biodégradable. Ce traitement ce fait par les bactéries qui dégradent la matière organique.

Parmi les divers micro-organismes responsables de la dégradation on trouve les bactéries aérobies et les bactéries anaérobies :

-)] Procédés biologiques à cultures aérobies (Bactéries aérobies) : cultures libres (boues activées, lagunage) ou fixées (Lit bactérien, disque biologique, biofiltres.) ;
-)] Procédés biologiques à cultures anaérobies (Bactéries anaérobies): réservés aux industriels, températures élevées, transformations lentes. [d]

➤ **Le procédé à boues activées :**

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

Le procédé à boues activées est un système fonctionnant en continu dans lequel, des micro-organismes sont mis en contact avec les eaux usées contenant des matières organiques. De l'oxygène est injecté dans le mélange, permettant de fournir aux bactéries cet élément vital à leurs besoins respiratoires.

En fait, on peut considérer que le système à boues activées est une extension artificielle des phénomènes d'épuration naturels. Dans un cours d'eau ou une rivière, les phénomènes entrant en jeu sont identiques à se présents dans les systèmes à boues activées, seule varie la concentration en micro-organismes dans le milieu et, à fortiori, la vitesse de la réaction de dégradation (Gaid A., 1984).

d) La clarification : (Décanteur secondaire)

Cette étape permet de séparer, par décantation, l'eau dépolluée et les boues ou résidus secondaires issus de la dégradation des matières organiques. Cette décantation est opérée dans des bassins spéciaux, les "clarificateurs".

L'eau, dans la plupart des cas, peut alors être rendue au milieu naturel, dans une rivière, à la mer ou à l'océan.

- e) Des traitements complémentaires (**traitements tertiaires**) destinés à éliminer l'azote et le phosphore peuvent être utilisés selon les contraintes de qualité du milieu naturel où sont rejetées les eaux. [e]

I.3.2.2. Filière boue :

Il n'existe pas de traitement d'épuration d'eau qui n'aboutisse à la production de résidu concentrés contenant les matières de pollution et les produits de transformation insolubles. Ces résidus appelés boues, ont diverses origines. Il convient de les traiter d'une manière rationnelle, économique, sans pour autant conduire à d'autres nuisances. (Gaid A., 1984)

I.3.2.2.1 Définition d'une boue :

Les éléments polluants et leurs produits de transformation retirés de la phase liquide au cours de tout traitement d'eau, quelle qu'en soit la nature, se trouvent finalement rassemblés dans la très grande majorité des cas dans des suspensions plus ou moins concentrées dénommées "Boues" (Degrémont, 1989).

La figure I.3 : représente les boues liquides provenant de l'épuration des eaux usées.



Figure I.3 : Boues liquides provenant de l'épuration des eaux usées. [f]

I.3.2.2.2. Origine et nature des boues :

Selon leur origine, les boues ont une composition différente qu'elles proviennent d'un traitement d'eau potable, d'un procédé physico-chimique ou biologique, d'une eau usée urbaine ou industrielle (Gaid A., 1984).

La nature de la boue est donc liée à la composition de l'effluent traité, et aussi aux techniques de traitement utilisées (Gaid A., 1984).

On peut d'ores et déjà distinguer deux types de boues :

- Les boues à caractère essentiellement minéral ou assimilable.
- Les boues à caractère organique.

Le tableau suivant donne une idée des différentes boues obtenue selon diverses origines :

Boue minérale	Traitement utilisé	Origine
Caractère cristallin hydrophobes	Décantation– décarbonatation, neutralisation.	Industrie minière, cimenterie, fonderie.
Caractère colloïdale	Décantation floculation	Eau potable papèterie, raffinerie.
Boue organique		
Caractère colloïdale et hydrophile	Décantation, traitement biologique	Eau urbaine et industrielle

Tableau I.1 : Différentes boues obtenue selon diverses origines (Gaid A., 1984).

Ainsi par exemple, l'origine d'une boue urbaine vient essentiellement des déchets minéraux ou organiques présents dans l'effluent brut, et aussi de la transformation bactérienne des matières organiques dissoutes colloïdales (Gaid A., 1984).

Dans une station d'épuration d'eau usée urbaine, la récupération des boues provient du décanteur primaire et du décanteur secondaire :

) Décanteur primaire :

Boues primaires : Ce sont des Boues obtenues par simple décantation primaire des eaux usées. Elles sont constituées de matières minérales (sable, terre...) et de matières organiques qui peuvent évoluer. Ce sont des boues présentant des concentrations élevées. (Telli S., 2013)

) Décanteur secondaire :

Boues biologiques ou secondaires : Ce sont les boues issues du traitement biologique. Elles sont essentiellement constituées de bactéries et sont très organiques et peu concentrées (Telli S., 2013).

Les boues secondaires sont récupérées après le décanteur secondaire (clarificateur), au niveau de la purge.

-) Le mélange des boues primaires et des boues secondaires (biologiques) nous donnent des boues mixtes. La boue mixte doit être traitée et éliminée.

I.3.2.2.3. Composition des boues :

Les boues primaires sont très hétérogènes et sont constituées de 65 à 70 % de matières organiques putrescibles. Leur teneur en eau est de 90 à 95 % (Gaid A., 1984).

Les boues secondaires présentent une teneur en matière organique égale à 75 % et une teneur en eau d'environ 99 %. Ce type de boues a une teneur en matières organiques dépendant fortement du traitement utilisé (Gaid A., 1984).

Les boues fraîches contiennent des éléments fertilisants, le tableau ci-dessous présente les valeurs qui sont généralement obtenues (exprimées en % de M.S) :

Eléments	Boues fraîches
Azote (Z)	3 – 5 %
Phosphore (P)	1 – 5 %
Potasse (K)	0.5 – 1 %
Matière organiques	60 – 80 %
Carbone (C)	30 – 45 %

Tableau I.2 : Les éléments fertilisants dans les boues fraîches (Gaid A., 1984).

I.3.2.2.4. Caractéristiques des boues :

Les trois caractéristiques importantes à retenir en matière de traitement sont :

-) **Matière sèche MS et siccité S :**

La teneur en matières sèches inclut à la fois les matières en suspension et les sels dissous. C'est le résidu sec appelé parfois extrait sec, utilisé aussi pour déterminer la siccité de la boue (exprimée en %) (Degrémont, 1989).

-) **La Matière Volatile en Suspension : (MVS)**

Exprimée en pourcentage en poids des M.S. Elle se détermine par gazéification dans un four à 550 – 600 °C. Pour les boues de la classe organohydrophile notamment, elle est souvent proche de la teneur en matières organiques (MO) et est caractéristique de la teneur en matières azotées (Degrémont, 1989).

) La consistance des boues :

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

-) Boues liquide : siccité de 0 à 10%
-) Boues pâteuses : siccité de 10 à 25%
-) Boues solides : siccité de 25 à 85%
-) Boues sèche : siccité supérieure à 85% (Degrémont, 2005).

I.3.2.2.5. Etapes de traitement des boues :

Le choix de la filière de traitement des boues est fondamental car il engage la continuité et la qualité du traitement des eaux. Une station d'épuration d'ERU produit environ 2 litres de boue liquide par équivalent habitant et par jour (Degrémont, 1989).

Le choix est difficile car il dépend :

-) Du type de traitement d'eau et de la nature de l'effluent,
-) De l'importance de l'installation,
-) Des possibilités financières.
-) De la destination ultime des boues et, donc, de la forme sous laquelle se présente le produit final (Degrémont, 1989).

Le traitement des boues vise deux principaux objectifs :

-) Réduction du volume. (Épaississement, déshydratation)
-) Réduction du pouvoir fermentescible. (Stabilisation)

Les filières de traitement des boues diffèrent mais l'objectif reste le même.

Figure I.4 : Représente un schéma de différentes étapes de traitement des boues d'épuration.

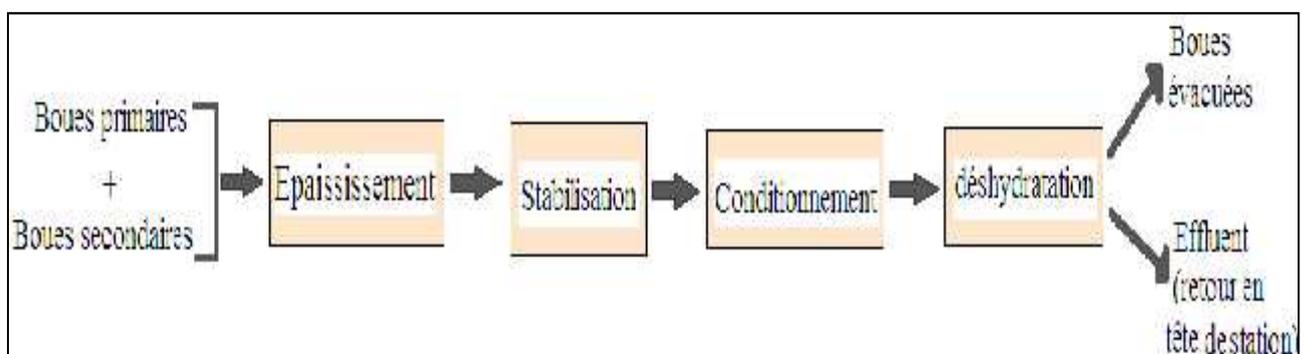


Figure I.4 : Schéma de la filière de traitement des boues d'épuration.

Les étapes de traitement des boues sont :

a) Epaissement :

L'épaissement constitue, en fait, le premier stade de réduction de volume des boues. Cette étape se situe avant la digestion (Gaid A., 1984).

) **Epaissement par décantation :**

La suspension boueuse est introduite dans une cuve (épaisseur) où le temps de séjour est élevé, de façon à provoquer le tassement des boues dont l'évacuation se fait par le fond tandis que le liquide surnageant est évacué par le haut (Degrémont., 1989).

) **Epaissement dynamique :**

L'épaissement dynamique se fait sous l'action de forces mécaniques soit par flottation, égouttage ou centrifugation

b) La stabilisation :

La stabilisation se fait Pour empêcher ou réduire les problèmes de fermentation et d'éviter ainsi les nuisances olfactives.

) **Stabilisation biologique :**

La stabilisation biologique présente l'avantage de limiter l'évolution ultérieure de la composition des boues. Il existe deux types de stabilisation biologique :

- **Stabilisation anaérobie (Digestion anaérobie) :**

La fermentation méthanique a un pouvoir de destruction cellulaire parmi les plus puissants du monde biologique, et permet l'élimination d'une quantité importante de MO (Degrémont, 1989).

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) (Degrémont, 2005).

- **Stabilisation aérobie :**

Au contraire de la stabilisation anaérobie, le principe de la stabilisation aérobie est d'obtenir la diminution des matières organiques fermentescibles contenues dans les boues, grâce à l'activité de populations bactériennes aérobies placées dans des conditions de désassimilation (Bechac J. P. et coll., 1984).

) **Stabilisation chimique :**

La stabilisation des boues par voie biologique (anaérobie ou aérobie), nécessite des ouvrages importants. Lorsque la réduction du montant des investissements est un objectif prioritaire, le pouvoir fermentescible de la boue peut être diminué, au moins temporairement, par la seule

adjonction d'agents chimiques utilisés à des doses bactériostatiques. Il s'ensuit une inactivation importante des germes pathogènes. Cette technique ne modifie donc pas la quantité de MO biodégradables contenue dans la boue ; une reprise de fermentation est possible si l'évolution ultérieure des conditions du milieu le permet. La chaux, du fait de son coût réduit, de son alcalinité et de son effet favorable à un renforcement de la structure physique de la boue, est le réactif le plus utilisé (Degrémont, 1989).

La stabilisation chimique est une stabilisation temporaire, qui n'autorise pas un stockage de longue durée.

c) Conditionnement et déshydratation :

Les boues ont une résistance à la filtration et un facteur de compressibilité encore trop élevées afin d'assurer une séparation optimale de l'eau et de la matière. C'est pourquoi, il faut préalablement « casser » la cohésion colloïdale de la boue et augmenter artificiellement la taille des particules. C'est l'objet du conditionnement qui est la base du bon fonctionnement de l'atelier de déshydratation. [g]

I.4. Destination finale des boues traitées :

Une destination régulière et fiable est souvent difficile à trouver.

Il existe trois destinations possibles sont :

-) La valorisation agricole ;
-) La mise en décharge ;
-) L'incinération.

I.5. Le conditionnement des boues :

Le conditionnement a pour objectif de préparer les boues à la déshydratation. En conséquence, il en est indissociable. Cette opération permet la floculation des boues en cassant la stabilité colloïdale et facilite ainsi l'évacuation de l'eau libre ainsi que la diminution de la résistance spécifique et l'augmentation du coefficient de compressibilité (Dagot C. et Laurent J., 2014).

I.5.1. Conditionnement chimique :

Le conditionnement chimique utilise des réactifs minéraux (électrolytes minéraux à polycations) 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 coll, 1990).

I.5.2. Conditionnement thermique :

Les liaisons de l'eau et de la matière colloïdale peuvent également être rompues par voie thermique, notamment par montée en température des boues.

La température de cuisson adoptée varie entre 150 et 200 °C et le temps de cuisson entre 30 et 60 minutes (Degremont, 1989).

I.5.3. Conditionnement électrochimique :

L'électrocoagulation est une technique dérivée de la coagulation classique. Elle permet d'éliminer les particules colloïdales et la pollution dissoute grâce à la production in situ de floccs d'hydroxydes obtenus par dissolution anodique d'électrodes solubles (Fe, Al) (Chen et coll.,2000; Ibanez et coll., 1998). Les floccs d'hydroxydes générés par voie électrochimique sont plus compacts que ceux obtenus par la méthode chimique (Persin et Rumeau, 1989). En outre, l'électrocoagulation requiert moins de réactifs et permet de réduire le volume de boues générées comparativement à la coagulation chimique qui nécessite des concentrations très élevées de réactifs, entraînant ainsi une augmentation du volume de boues (Persin F. et Rumeau M., 1989).

I.6. La déshydratation :

La déshydratation constitue la seconde étape de réduction du volume des boues sur les boues épaissies, stabilisées ou non, afin d'obtenir une siccité plus poussée (en moyenne comprise entre 20 et 30% selon la nature des boues) ; elle conditionne le choix de la filière de valorisation ou d'élimination finale (Amorce, 2012).

Il existe deux types de déshydratation :

-) Déshydratation naturelle.
-) Déshydratation mécanique.

I.6.1. Déshydratation naturelle :

La déshydratation naturelle se fait par des lits de séchage à l'air libre qui permettent l'évaporation naturelle et le drainage de l'eau libre à travers une couche filtrante de gravies ou de sable.

I.6.2. Déshydratation mécanique :

I.6.2.1. La filtration :

a) 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 à tambour rotatifs (Gaid A., 1984).

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 des milieux poreux qui retient les matières solides mais permet au liquide de le traverser. Les médiateurs utilisés sont des tissus, des tamis métalliques ou des ressorts à boudins très serrés. Dans l'opération de filtration sous vide, un tambour rotatif plonge dans la cuve contenant la suspension et les matières solides sont retenues à 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 médium filtrant. Le temps pendant lequel le tambour reste immergé dans la suspension est le temps de formation. Lorsque le tambour émerge, 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 (Degremont, 2005).



Figure I.5 : Photo d'un filtre à tambour rotatifs (filtration sous vide). [h]

b) La filtration sous pression :

) **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 médiateurs filtrants (ou toiles) peuvent éventuellement être munis d'une pré-couche (avant passage de la boue). Au terme de la filtration, quand les chambres ont atteint une siccité suffisante, les plateaux sont séparés pour l'enlèvement (ou décharge) des gâteaux (Degremont, 2005).



Figure I.6 : Photo d'un filtre-presse (filtration sous pression). [i]

) Filtre à bande :

Le filtre à bande est composé d'une toile ou bande de filtration circulant entre différents rouleaux de pressage.

Suite au conditionnement (chaux, chlorure ferrique), le mélange est déversé sur la bande d'égouttage ou des bobines permettent une pré-filtration et un pré épaissement. L'étape de pressage consiste à prendre cette boue pré-épaissie entre 2 bandes de pressage circulant entre deux rouleaux de grosses tailles puis une série d'une dizaine de rouleaux, compressant et cisillant les boues, les rouleaux sont disposés en 2 étages afin d'augmenter la longueur de bande (6 m environ). La boue déshydratée est raclée et évacuée par convoyage. Les bandes sont lavées en continu. Eau extraite et eau de lavage retournent en tête de station. La puissance totale est d'une dizaine de kW (Dagot C. et Laurent J., 2014).



Figure I.7 : Photo d'un filtre à bande (filtration sous pression). [j]

I.6.2.2. Centrifugation :

La centrifugation est une séparation solide-liquide, dont le principe qui relève de la loi de la pesanteur peut être assimilé à 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 compatible (Degremont, 1989).

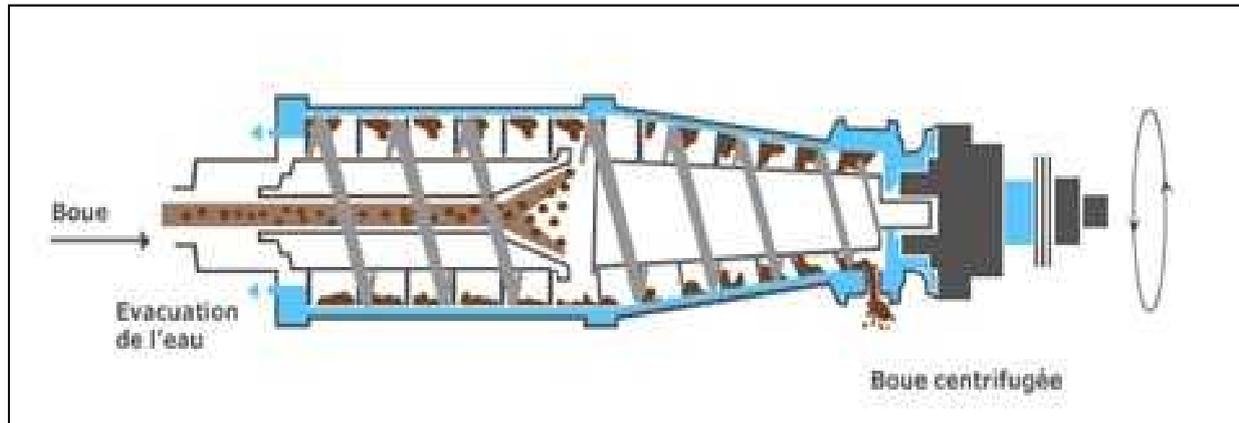


Figure I.8 : Schéma de fonctionnement de la décanteuse centrifugeuse. [k]

I.7. Rappel sur la coagulation-floculation :

Le processus de coagulation-floculation facilite l'élimination des matières en suspension et des particules colloïdales.

Les colloïdes sont des particules organiques ou minérales dont leur diamètre est très faible comprise entre quelques nanomètres et un micromètre environ. Dans les effluents liquides, elles sont notamment responsables de la turbidité.

Les particules colloïdales dans l'eau possèdent une charge électrique négative. Comme elles ont toutes la même charge, elles se repoussent et n'ont pas tendance à former de gros agrégats facilement éliminés. Elles demeurent donc stables. Elles ont donc de grandes difficultés à se décarter naturellement, il est très difficile de les éliminer de l'eau. Alors il faut faire un traitement physico-chimique appelé la coagulation-floculation pour faciliter l'agrégation de ces particules

La coagulation est la déstabilisation des particules colloïdales par addition d'un réactif chimique, le coagulant (Degremont 1989).

La floculation est l'agglomération de ces particules "déchargées" en micro-floc, puis en flocons volumineux et décantables, le floc (Degremont 1989).

I.8. Le procédé d'électrocoagulation :

I.8.1. Théorie de l'électrolyse :

L'électrolyse est le processus au cours duquel des réactions chimiques se produisent sous l'effet du courant électrique ; les réactions sont très diverses suivant la nature du solvant, le

matériau d'électrode et la présence de d'autres substances dans la solution. Les particules chargées, les ions, sont attirées vers l'électrode de signe contraire à leur charge, les anions(-) vers l'anode et les cations (+) vers la cathode (Tir M., 2009).

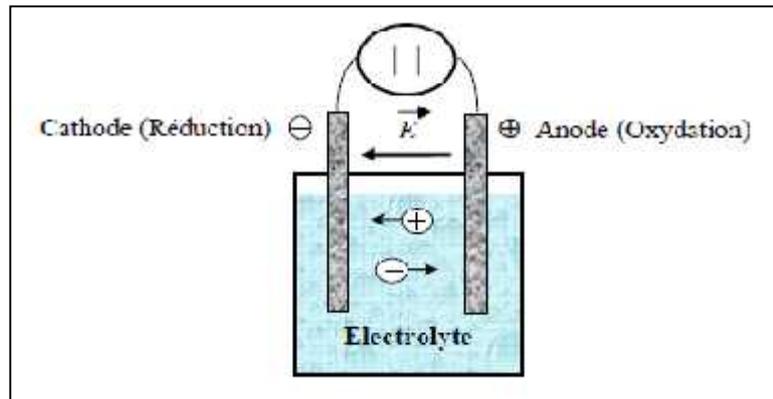


Figure I.9 : Réacteur simple d'électrolyse (M.Tir., 2009).

I.8.2. Définition d'électrocoagulation :

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

I.8.3. Historique des applications 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 (Picard, 2000).

L'historique de l'électrocoagulation peut être divisé en deux périodes. Une période pendant laquelle son efficacité n'avait pas été optimisée pour intéresser les industriels et les scientifiques (avant 1990) ; et une deuxième période correspondant à la renaissance de l'électrocoagulation (après 1990), avec un très grand nombre d'articles (Moreno et coll., 2007)

Le tableau suivant résume l'historique des applications du procédé d'électrocoagulation :

Date	Auteurs	Types d'électrodes	Applications
1909 1947	Harries Bonilla	Al Fe sel cuivre Al	Eaux usées urbaines
1956 1970 1971	Holden Sadek Beck et coll.	Al Al Fe	Eau de surface Eau riche en phosphates
1981 1985	Vik et coll. Pazenko et coll.	Al	Eau très chargée en substances humiques Emulsions d'huiles
1988 1989 1992 1996	Renk Ryan et coll. Shen et coll. Lin et coll.	Al + Fe	Eau riche en sable bitumineux et schistes pétrolifères Suspension d'argile Eau de teinture et d'impression Effluents de l'industrie textile
2000 2002 2003 2005 2007	Chen et coll. Abuzaid et coll. Shen et coll. Khemis et coll. Essadki et coll.	Al	Rejets liquides des industries de la restauration Eau riche en dérivés de nitrates Eau industrielle chargée en fluorures Emulsions d'huiles industrielles Rejets de textiles et eaux industrielles chargées en fluorures

Tableau I.3 : Historique des applications du procédé d'électrocoagulation (Bennajah M., 2007).

I.8.4. Principe de l'électrocoagulation :

L'électrocoagulation est une méthode de traitement des eaux basée sur la dissolution électrochimique d'un métal sacrificiel qui, une fois dans l'effluent et moyennant les autres réactions connexes telle que l'électrolyse de l'eau, donne des complexes d'hydroxydes métalliques qui vont assurer l'adsorption puis la floculation des particules et des composés polluants dissous (Zongo I., 2009).

Elle est considérée comme un procédé complexe avec une multitude de mécanismes synergiques concourant au traitement de la pollution. Holt et coll. (2002) ont pu identifier trois catégories de mécanismes en électrocoagulation :

- Les phénomènes électrochimiques,
- La coagulation,
- l'hydrodynamique.

L'action directe d'un champ électrique sur une eau résiduaire permet de créer des conditions d'une bonne coagulation-floculation (Rovel, 1947). En effet le champ électrique permet de créer, d'une part, un gradient de vitesse affectant toutes les particules chargées notamment les ions et les colloïdes facilitant leur rencontre (Debillemont, 1996), et d'autre part, en utilisant les anodes de fer ou d'aluminium, on arrive à faire passer en solution des quantités contrôlables d'ions métalliques indispensables à la création de floccs de taille suffisante (Zongo I., 2009).

Mollah et coll. (2001) résumant ce processus comme suit :

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

I.8.5. Mécanisme du procédé d'électrocoagulation :

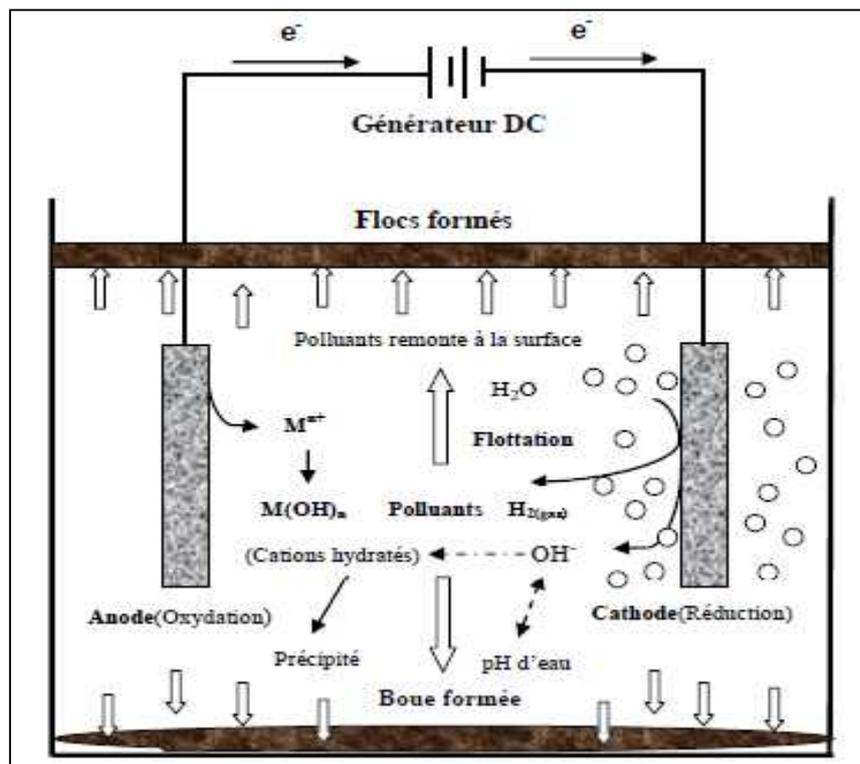


Figure I.10 : Schéma du principe du processus d'électrocoagulation (Tir M., 2009).

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 floccs 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).

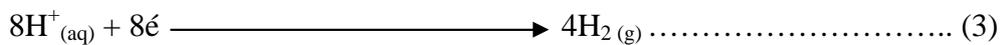
Deux mécanismes ont été proposés pour expliquer la formation de $\text{Fe}(\text{OH})_n$ (Daneshvar et coll., 2003; Larue et coll., 2002; Mollah et coll., 2001) :

) Premier mécanisme :

Anode :



Cathode :

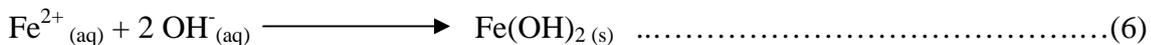
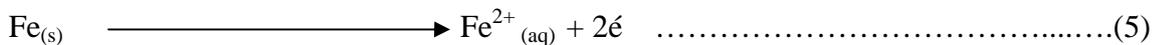


Global :



) Deuxième mécanisme:

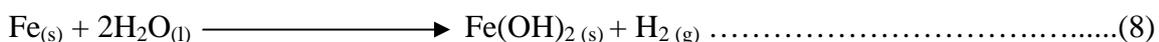
Anode



Cathode



Global



L'hydrogène ainsi généré participe donc à la flottation des floccs et favorise ainsi tant l'élimination des matières en suspension que l'élimination des composés organiques dissous adsorbés partiellement sur les floccs.

Les hydroxydes de fer ($\text{Fe}(\text{OH})_{n(s)}$) restent dans la solution aqueuse sous forme d'une suspension gélatineuse, pouvant éliminer les polluants de l'eau usée (Ibanez et coll., 1998; Xinhua X. et Xiangfeng Z., 2004) soit par :

) Complexation de surface :

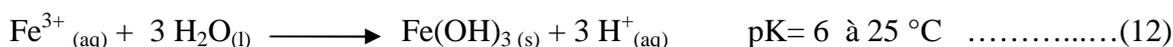
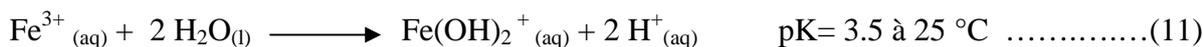
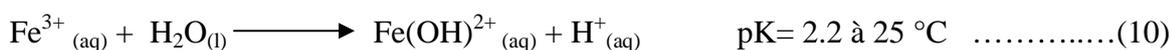
le polluant est comme un ligand (L) qui se fixe chimiquement à l'ion hydraté $\text{Fe}(\text{OH})_n$:



) Attraction électrostatiques :

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

Les ions Fe^{3+} subiront une hydratation, la forme du modèle dépendra du pH. En milieu acide, les réactions suivantes ont été proposées (Xinhua X. et Xiangfeng Z., 2004) :



D'autres formes hydratées de l'ion Fe^{3+} , dépendant du pH, ont été suggérées (KOBAYA et coll., 2003) : $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_2^{3+}$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5\text{OH}^{2+}$, $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Fe}(\text{OH})_2^{+}$, $\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{4+}$, $\text{Fe}(\text{OH})_4^{-}$, $\text{Fe}(\text{OH})_6^{3-}$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})_2^{+}$, $\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O})_8(\text{OH})_2^{4+}$ et $\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O})_6(\text{OH})_4^{2+}$.

Les complexes s'adsorbent sur les particules et annulent aussi leurs charges colloïdales, ce qui conduit à déstabiliser l'émulsion. Cela se passe de cette manière dans le cas de la coagulation chimique. On note les différences au niveau de la source de coagulant chimique et électrochimique et au niveau de la présence du champ électrique dans le cas de l'électrocoagulation qui facilite la migration des espèces (Zongo I., 2009).

I.8.6. Facteurs influençant l'électrocoagulation :

) **La densité de courant:**

La densité de courant est jugée comme un paramètre essentiel en électrocoagulation (Mollah et coll., 2001 ; Bayramoglu et coll., 2007).

La densité de courant est le courant délivré à l'électrode divisé par l'aire active de l'électrode. Elle est considérée comme un paramètre critique dans l'électrocoagulation. Elle détermine à la fois la vitesse de la dissolution métallique électrochimique dans l'eau et la densité de production électrolytique des bulles (Holt et coll., 1999).

) **Temps d'électrolyse :**

Afin de limiter les pertes inutiles en chaleur et la production exagérée de boues métallique, il est important de faire une étude cinétique pour imposer le courant électrique le moins longtemps possible (Asselin M., 2007).

) **Le pH :**

Le pH de la solution est considéré comme un facteur opératoire important, influençant la performance des processus électrochimiques (Xueming et coll., 2000; Daneshvar et coll., 2003; Xinhua et Xiangfeng, 2004; Kobya et coll. 2006; Sengil et coll. 2006).

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 (Xinhua et Xiangfeng, 2004).

Les diagrammes de Pourbaix, aussi appelés diagrammes potentiel-pH (ou E-pH), furent initialement développés par Marcel Pourbaix en 1938. Ils indiquent sur un plan E-pH les domaines d'existence ou de prédominance des différentes formes (ions, complexe, précipité, métal) d'un élément [L].

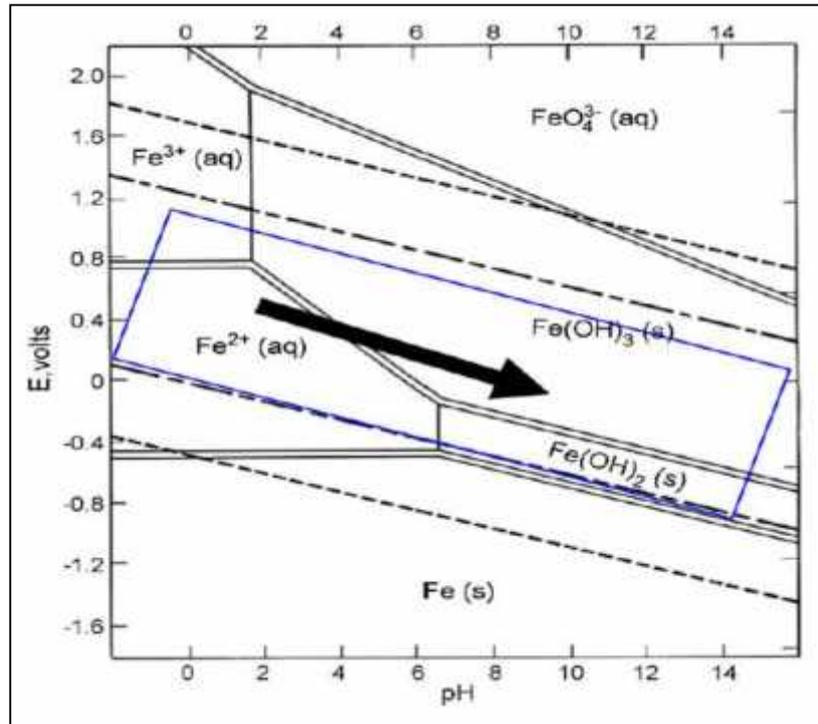


Figure I.11 : Diagramme de Pourbaix du fer (Monero-Casillas et al. 2007).

En plus le pH a une influence sur la dissolution anodique, quand le pH tend vers la basicité la vitesse de corrosion diminue.

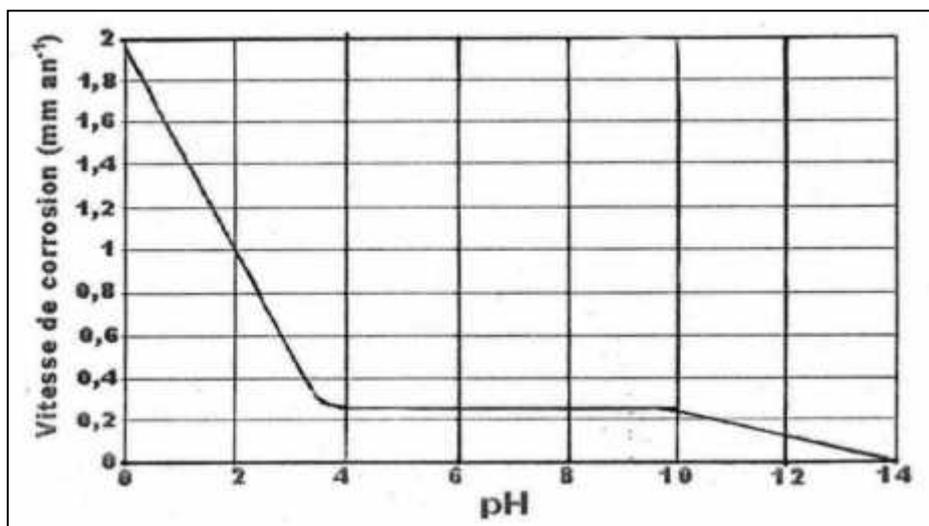


Figure I.12 : Vitesse de corrosion du fer en fonction du pH (Moreno-Casillas et al. 2007).

) La conductivité :

La conductivité de l'électrolyte a aussi un impact sur le procédé ; si elle est trop faible, la résistance de l'eau au passage de courant est forte, la consommation énergétique est très importante ; et sa température peut alors fortement augmenter.

L'ajout d'ions chlorure permet d'éviter la passivation des électrodes. Le problème de la conductivité constitue un inconvénient majeur au fonctionnement d'un procédé d'EC (Holt et coll., 2002).

) Nature des électrodes :

Les électrodes constituent la partie la plus importante, et sont considérée comme le cœur de l'unité d'électrocoagulation. La nature des électrodes, et en particulier celle des anodes, joue un rôle primordial sur l'efficacité et le rendement du procédé. Le matériau d'électrode détermine le cation introduit en solution. En effet, les plaques d'aluminium ou de fer sont les électrodes les plus utilisés en raison de leur bas coût, disponibilité et efficacité prouvée (Holt et coll, 1999).

) Température :

L'efficacité du traitement par oxydation électrochimique des eaux contaminées dépend aussi de la température du milieu. En général, la vitesse de réactions chimiques et électrochimiques augmente avec l'accroissement de température du milieu. A priori le traitement est plus efficace lorsque la température de l'eau est plus élevée. Cependant, en pratique, l'épuration des eaux industrielles ne peut s'effectuer qu'à la température intrinsèque de l'effluent pour des raisons techniques et économiques. Par ailleurs, le traitement à température élevée diminuera la durée de vie de l'électrode. En effet, la plupart des anodes en métaux ou en oxydes de métaux ne peuvent résister aux attaques des oxydants abondamment générés, à des températures élevées (Trongo, 1999).

) La vitesse d'agitation :

Une bonne agitation à l'intérieur de la cellule d'EC est importante pour un temps de contact suffisant entre les particules polluantes et l'agent coagulant (Holt et coll., 2002).

) La distance entre électrodes :

La distance inter-électrode peut également influencer la qualité du traitement. Cette distance peut varier selon le type d'eau à traiter et surtout selon sa conductivité. De plus, la distance entre les électrodes doit également tenir compte de l'encrassement possible et de la facilité à nettoyer le système (Asselin M., 2007).

I.8.7. Avantages et inconvénients de l'électrocoagulation :

) L'électrocoagulation exige un équipement simple, compact et est facile à utiliser avec le suffisamment de l'attitude opérationnel pour traiter la plupart des problèmes produits sur le fonctionnement. (Tir M., 2009);

- J L'électrocoagulation évite l'utilisation des produits chimiques, de ce fait, aucune possibilité de pollution secondaire provoquée par ces produits ajoutés à des concentrations élevées ;
- J Larue et Vorobiev (2003) ont obtenu des boues plus denses et moins hydrophiles. Cela rend la décantation et la flottation plus aisée et diminue le volume des boues. Ces travaux ont montré une réduction du temps et des coûts de traitement des boues.
- J Les micro-bulles de gaz produites pendant l'électrolyse peuvent porter le polluant jusqu'au dessus de la solution où il peut plus facilement être concentré, rassemblé et éliminé. (Tir M., 2009);
- J L'électrocoagulation offre la possibilité de réduire remarquablement de nombreuses pollutions et composés dissous tel que la DCO, MES, les métaux lourds, etc. ;
- J Selon Rumeau (1989) l'EC permet d'éliminer 60 à 80 % de la charge polluante. Les odeurs et la couleur de l'effluent peuvent également être éliminées (Mollah et coll., 2001)
- J Le procédé de l'EC a l'avantage d'éliminer les plus petites particules colloïdales. Cela a été montré par Persin F. et Rumeau M. (1989) et Kannan et coll. (2006). L'application d'un champ électrique entre les électrodes entraîne les particules dans un mouvement plus rapide, facilitant de ce fait leur agglomération ;
- J V. E. Cenkin et A. Belevtsev 1985 ont montré que l'utilisation de l'électrocoagulation permet de réduire le temps de traitement : ce procédé permet un grand gain en compacité des installations et une possibilité d'automatisation ;
- J La technique d'électrocoagulation peut être commodément employée dans des secteurs ruraux où l'électricité n'est pas disponible. Puisqu'un panneau solaire attaché à l'unité peut être suffisant pour suivre le processus. (Tir M., 2009) ;
- J l'électrocoagulation permet également d'augmenter la biodégradabilité de l'effluent, ce qui permet aussi de faciliter un traitement biologique subséquent (Alinsafi et coll., 2005 ; Persin F. et Rumeau M., 1989)

En plus de ces avantages, l'électrocoagulation présente quelques inconvénients parmi lesquels on peut citer :

- J Les électrodes sacrificatoires sont dissoutes dans l'effluent à traiter en raison de l'oxydation, et doivent être régulièrement remplacées (Tir M., 2009) ;
- J La conductivité souvent faible de l'eau polluée et la formation des dépôts sur les électrodes. En effet, la conductivité du rejet doit être suffisante pour permettre le passage du courant sans consommation excessive d'électricité (yousuf et coll., 2001 ; Mollah et coll., 2004 ; Kim et coll., 2002 ; Yang et Dluhy, 2002). Lorsque la conductivité de l'eau polluée est trop faible, un rajout du chlorure de sodium est généralement nécessaire ;
- J L'usage d'électricité peut être coûteux dans certains endroits. L'utilisation de l'énergie électrique, assez coûteuse, et le coût des électrodes consommables constituent un désavantage pour le procédé d'électrocoagulation ;
- J La maintenance des installations est parfois coûteuse. Le nettoyage et changement des électrodes nécessite l'arrêt du procédé au cours de ces opérations (Tir M., 2009).

I.9. Généralité sur l'*Opuntia ficus indica* :

I.9.1. Origine et diffusion :

Le genre *Opuntia* est originaire du Mexique (Orwa et coll., 2009) et figure d'ailleurs sur l'emblème du drapeau mexicain. Sa distribution géographique est très large (Figure I.13) : Mexique, Sicile, Chili, Brésil, Turquie, Corée, Israël, Argentine et Afrique du Nord (Barbera et coll., 1992 ; Nerd et Mizrahi, 1994 ; Felker et coll., 2005 ; Kabas et coll. 2006 ; Saleem et coll., 2006 ; Snyman, 2006). Il a été introduit d'abord en Espagne et plus tard au 16e siècle au Nord et au Sud de l'Afrique. Il s'est diffusé rapidement dans le bassin méditerranéen et s'y est naturalisé au point de devenir un élément caractéristique du paysage (Le Houerou, 1996 ; Erre et coll., 2009). Il est par essence développé sur la partie Ouest de la Méditerranée : Sud de l'Espagne, le Portugal, et l'Afrique du Nord (Tunisie, Algérie et Maroc) (Bensalem et coll., 2002 ; Arba, 2009). A titre d'exemple, la superficie cultivée dans la région du WANA (Ouest d'Asie et le Nord africain) est d'environ 900.000 ha (Nefzaoui et Bensalem, 1998). Dans certains pays tels que l'Italie, l'Espagne, le Mexique, ou Israël, la culture du cactus est pratiquée de façon intensive et moderne avec des programmes de recherche-développement pour la production du fruit ou de fourrage et même pour des usages industriels (Mulas et Mulas, 2004). En revanche, en Australie et en Afrique du Sud (Dean et Milton, 2000 ; Orwa et coll., 2009), ce végétal, en particulier la variété asperme est considérée comme une mauvaise herbe à cause de la facilité avec laquelle, elle se propage.

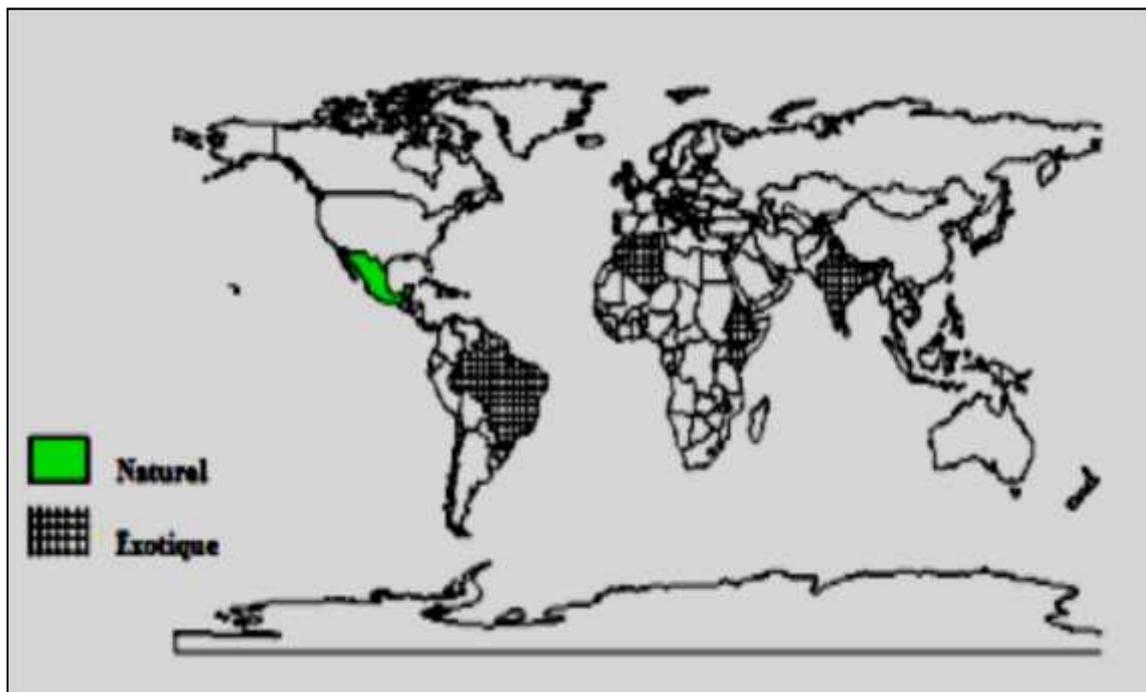


Figure I.13 : Distribution géographique du figuier de Barbarie (Orwa et coll., 2009).

I.9.2. Position systématique :

Règne : Plantae

Sous règne : Tracheobionta

Division : Magnoliophyta

Classe : Magnoliopsida

Sous classe : Caryophyllidae

Ordre : Caryophyllales
Famille : Cactaceae
Sous-famille : Opuntioideae
Tribu : Opuntieae
Genre : *Opuntia*
Espèce : *Opuntia ficus indica*.

I.9.3. Description de la plante :



Figure I.14 : L'*Opuntia ficus indica* (Le figuier de barbarie). [M]

Le figuier de barbarie est une plante robuste qui peut mesurer jusqu'à 5 mètres de hauteur, avec un tronc épais et ligneux. Ses articles aplatis en forme de raquettes (cladodes) de couleur vert mat, ayant une longueur de 30 à 50 cm et une largeur de 15 à 30 cm, sont couverts de petites aréoles, d'épines et de glochides blancs. Ses fleurs, marginales sur le sommet des cladodes, sont hermaphrodites, de couleur jeune et deviennent rougeâtres à l'approche de la sénescence de la plante. Ses fruits sont des baies charnues ovoïdes ou piriformes pourvues d'épines. Ils sont généralement verdâtres ou jaunes à maturité. La pulpe est toujours juteuse de couleur jaune-orangé, rouge ou pourpre, parsemée de nombreuses petites graines (Feugang et coll., 2006).

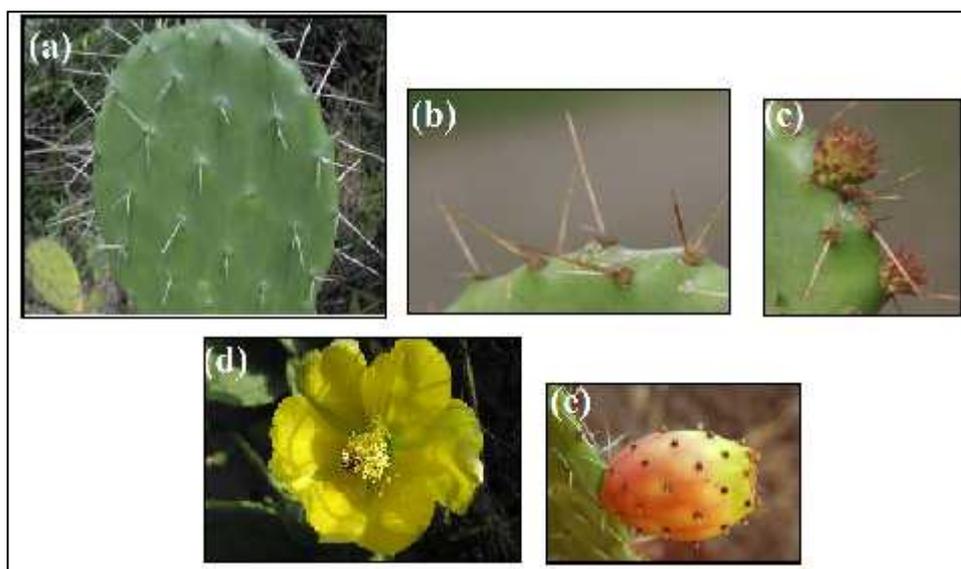


Figure I.15 : a) Les raquettes (cladodes), b) Les épines, c) Les aréoles, d) Fleur d'OFI, e) Fruit d'OFI

I.9.4. Composition chimique des cladodes :

L'opuntia est une plante connue par sa richesse en eau avec un taux d'humidité très élevé de 85 à 90 %, et une faible teneur en matière sèche d'environ 6 à 7 % (Felker, 1995).

Les cladodes, communément appelées "raquettes", sont principalement composées d'eau (80% environ), de fibres et de protéines (Rodriquez- Felix A. et coll., 1988).

Elles sont riches en mucilages qui sont des polysaccharides complexes qui gonflent au contact de l'eau. Ces mucilages sont constitués de glucose, de galactose, d'arabiose, de xylose, de rhamnose, d'acide galacturonique et d'acide glucuronique (Sharma R. et coll., 2012).

Dix-huit des 22 acides aminés du corps humain sont également retrouvés dans la composition des cladodes du figuier de barbarie (Feugang. J. M. et coll., 2006).

Les raquettes de figue barbarie ont d'excellentes activité antioxydants, la présence de plusieurs antioxydants (acide ascorbique, caroténoïdes, glutathion réduit, cystéine, taurine et flavonoïdes telle que la quercétine, le kaempferol et l'isorhamnetin) a été détectée dans les raquettes (Nazareno M. A. et González E., 2008).

Le tableau ci-dessous présente certains éléments existants dans l'OFI :

Eau (%)	Cendres	Protéines crues	Fibres brutes	Ca	P	K	Na
(% du poids sec)							
87	27	38	8.6	8.7	0.04	1.1	0.05

Tableau I.4 : Composition chimique moyenne de raquettes d'Opuntia. (Nefzaoui et Ben Salem, 2002).

I.9.5. L'importance de l'*Opuntia ficus indica* (OFI):

L'adaptation du figuier de Barbarie (*Opuntia ficus indica*) aux conditions aride et semi aride lui permet de constituer une culture à plusieurs intérêts.

L'*Opuntia ficus indica* ou figuier de barbarie, est une plante de type CAM (Crassulacean Acid Metabolism) (Nobel P. S, 1988) qui présente des adaptations physiologiques et morphologiques, lui permettant de résister aux conditions difficiles des régions arides et semi arides. Elle est actuellement intégrée dans les stratégies de lutte contre la désertification dans différents pays (Sudzuki Hills 1995 ; Kartez R., 1996 ; Mulas M., Mulas G., 2004 et Nefzaoui A. et coll., 2012).

Dans certains pays, l'*Opuntia ficus indica* fait l'objet d'une culture à part entière, pour l'exploitation fourragère et maraichère (Barbera G., 1995 ; Sudzuki, F. et coll., 1993). En effet, c'est une plante dont toutes les parties peuvent être consommées : les tiges (ou cladodes) et les fruits. La variété inerme présente par rapport à la variété épineuse, l'avantage d'être facilement manipulée et exploitée comme fourrage. Les cladodes peuvent constituer 35 à 40% de la ration alimentaire de base (Nefzaoui A., 1996), et peuvent constituer une source d'eau pour les animaux. Dans le cas d'agneaux nourris avec une part importante d'*Opuntia*, les besoins en eau sont pratiquement nuls (Mulas M., Mulas G., 2004). Ils peuvent aussi être utilisés dans l'alimentation des petits animaux (Andrade-Montemayora M. et coll., 2010)

Les cladodes (raquettes) sont également valorisées dans l'industrie des cosmétiques. Elles sont utilisées comme additifs dans la fabrication de shampooing, lotions astringentes, crème, savon humectant, gel hydratants pour le visage, assouplissant de cheveux (Barbera G., 1995 et Saenze C., 2006). Elles peuvent aussi stimuler leur régénération et leur mise en forme (Galati E.M., 2003)

Elles sont aussi valorisées dans l'industrie chimique pour la préparation des adhésifs, du papier et du caoutchouc (Trachtenberg S. and Mayer A M., 1982) et comme source de bioénergie et de biogaz. (Varnero T. et coll., 2006) . Leur mucilage composé essentiellement de polysaccharides complexes peut être utilisé comme additif dans de nombreux produits industriels et alimentaires (Saéñz C. et coll., 1992). Cependant, le mucilage a montré une différence de composition significative selon les variétés (Ayne O. Calvo–Arriaga et coll., 2010).

En outre, les jeunes cladodes ou "nopalitos" sont consommés comme légume dans certains pays d'Amérique du Sud, dont le Mexique (Cantwell M., 1991 et Sáenz C., 2002).

Dans le domaine alimentaire, les jeunes cladodes sont utilisées au Chili et au Mexique, pour préparer la poudre de cladodes, les confitures, marmelade et divers plats (Corrales-Garcia Joel et Saenz Carmen, 2006). Leurs mucilages qui constituent un apport de fibres alimentaires, améliorent la digestion (Saenz C. et coll., 2004), ont aussi des propriétés gélifiantes et épaississantes (Trachtenberg S. and Mayer A.M., 1981 ; Nobel S.P. et coll., 1992 et Cardenas A., Goycoolea F., 1997). Ce qui justifie leur introduction comme épaississant à la place des carboxyméthylcellulose (CMC) provenant de la modification de la cellulose (Sepúlveda E.C. et coll. 2003 ; Stintzing F. C. et coll., 2005). Leurs fibres ouvrent ainsi, de nouvelles

perspectives dans la préparation et la formulation des aliments (Stintzing F. C. et coll., 2005; Ayadi M.A. et coll., 2009).

En plus de leur apport nutritionnel dû à leur richesse en sucres, vitamines et minéraux et leur apport en substances bioactives : fibres, polyphénols et pigments (Saenz C. 1998 ; Stintzing F. C. et coll., 2005; Feuang. J. M. et coll., 2006 ; et Betancourt-Dominguez M. A. et coll., 2006), les cladodes ont un potentiel médicinal intéressant (Mulas M., 1993 ; Saénz - Hernandez C. et coll., 2002). En effet, il est reconnu à cette plante un effet antioxydant, anti ulcère, diurétique, anti inflammatoire et cicatrisant (Galati E. M. et coll., 2001 ; Lee J. C. et coll., 2002 ; Galati E.M. et coll., 2002 ; Galati E. M. et coll., 2007). Un effet hypoglycémique et hypochol estérolémiant a été également observé (Cárdenas Medellín M.L. et coll., 1998 ; Galati E.M. et coll., 2003). D'autres travaux mettent en évidence chez cette plante, des propriétés antivirales et antitoxiques vis à vis de l'insecticide Chlorpyrifos (Stintzing F. C. et coll., 2005; Ncibi S. et coll., 2008).

Ainsi, cette plante constitue un candidat potentiel pour le développement d'aliments fonctionnels et sains (Feuang. J. M. et coll., 2006 ; Stintzing F. C. et coll., 2005), répondant à la demande du consommateur, en aliment équilibré en calories, cholestérol, graisse, fibres alimentaires et antioxydant.

I.9.6. Utilisation de l'*Opuntia ficus indica* dans le traitement des eaux :

Diaz A. (1999) a étudié la capacité du cactus d'agir comme un coagulant naturel, en utilisant une eau synthétique d'une turbidité de 100 NTU. Le traitement a permis d'obtenir une eau potable pour la ville de Marakaibo, une eau dont la turbidité finale est proche de 5 NTU.

Jindong Zhang et coll. (2006) ont étudié l'effet coagulant du cactus dans le traitement des eaux prélevés d'une station de traitement d'eau usée située à Wuhan (Chine), les résultats montrent une efficacité d'élimination de la turbidité de 98 %, il a été testé aussi pour traiter une eau usée, les résultats montrent que le cactus a pu diminuer la turbidité de 70 à 10.5 NTU.

Abid et coll. (2009) ont étudié l'utilisation de l'extrait de jus de cactus, dans un procédé physico-chimique (coagulation-floculation) afin de traiter des rejets liquides chargés en chrome. Ce bio-floculant a permis de réduire la turbidité de l'effluent industriel de 100 NTU à des valeurs au dessous de 2 NTU.

Abid et coll. (2009) ont étudié l'utilisation d'un nouveau floculant naturel biodégradable à base de jus de cactus marocain dans un procédé physico-chimique (coagulation-floculation), pour traiter des rejets liquides chargés en cuivre, en zinc et en matière en suspension, et aussi pour tester l'efficacité de ce jus vis-à-vis des autres produits couramment utilisés dans le traitement des eaux usées. L'association d'une coagulation avec la chaux suivie d'une floculation avec le jus de cactus marocain puis d'une décantation, a montré un effet très significatif sur l'élimination du zinc, du cuivre et de la matière en suspension. Le pourcentage d'abattement des métaux dépasse 95 % pour le cuivre et le zinc.

Chan-Yang Yin (2010), a utilisé des coagulants à base de plantes pour le traitement de l'eau et des eaux usées, le cactus est l'un de ces coagulants. Les processus, l'efficacité et les mécanismes de coagulation pour le traitement de l'eau et des eaux usées ont été présentés,

l'utilisation de ces coagulants représente un progrès important dans la technologie de, l'environnement durable car ils sont des ressources renouvelables et leur application est directement liée à l'alimentation de la qualité de vie des communautés sous-développées.

Hadj-Kouider S. (2011) a réalisé un conditionnement chimique de la boue provenant de la station d'épuration des eaux usées de Braki (wilaya d'Alger). Le cactus a été utilisé, afin d'augmenter la siccité des boues déshydratées. Les résultats obtenus par le jus de cactus sont encourageants, puisqu'il diminue la turbidité de 96 % pour une eau filtrée de la boue de Baraki, et permet d'obtenir une siccité de 31 %, obtenue par centrifugation.

Braka N. et coll. (2013) a utilisé la poudre de cladode de l'opuntia ficus indica sans prétraitement comme un biofloculant à faible coût pour l'élimination du Bleu de Méthylène, le Noir d'ériochrome T et l'Alizarine des solutions aqueuses.

Kazi T. et coll. (2013) ont utilisé la poudre de l'OFI dans le traitement des eaux usées de tanneries. Les résultats obtenus ont montré une diminution de la turbidité de 75.54 % et la DCO de 80.65 %.

Belbahloul M. et coll. (2014) ont étudié le pouvoir épuratoire de l'extrait de cactus *Opuntia Ficus Indica* (OFI), dans le traitement des eaux usées préparées au sein de leur laboratoire. L'étude a été réalisée sur des échantillons chargés en Zinc et en Matières En Suspension (MES). Le traitement a été basé sur une coagulation avec la chaux, suivi d'une floculation avec l'extrait de cactus. Ce dernier a montré un effet très significatif sur l'élimination du Zinc et de la MES avec un rendement avoisinant respectivement 96% et 99%.

Sakr F. et coll. (2014) ont étudié l'adsorption du Bleu de Méthylène sur un biomatériau qui est la poudre de cactus. Les résultats expérimentaux ont montré que l'adsorption du colorant Bleu de Méthylène sur le Cactus atteint 61% à pH initial et à température ambiante.

I.10. Conclusion :

Si on parle de l'épuration des eaux usées donc on parle aussi de la boue qui est un sous produit de l'épuration. Le traitement des eaux usées et des boues d'épuration devient un défi dans ces dernières années.

Dans ce chapitre nous avons fait une synthèse bibliographique sur les différents titres incluses dans notre étude. Nous avons parlé de l'origine des eaux résiduaires urbaines, le fonctionnement d'une station d'épuration des ERU, l'étape de conditionnement et de déshydratation dans la filière de traitement des boues d'épuration, Nous avons parlé aussi sur le processus d'électrocoagulation et l'*Opuntia ficus indica* (le figuier de barbarie).

La déshydratation des boues permet d'éliminer un maximum d'eau. Et pour un bon fonctionnement de la déshydratation il faut passer par le conditionnement afin de casser la stabilité colloïdale et augmenter la siccité des boues.

Pour éviter les produits chimiques utilisés avec des grandes quantités dans le processus de coagulation-floculation classique, il faut passer au d'autres procédés alternatives comme l'électrocoagulation qui est une technique dérivée de la coagulation classique. Elle permet d'éliminer les particules colloïdales et la pollution dissoute grâce à la production in situ de floes d'hydroxydes obtenus par dissolution anodique d'électrodes solubles (Fe, Al).

L'électrocoagulation est une méthode simple et efficace pour le traitement des eaux usées, plusieurs recherches assurent la réussite d'EC dans le traitement de plusieurs types de polluants.

Dans le domaine de conditionnement des boues, l'électrocoagulation permet la production des floes plus denses, ce qui rend la décantation et la flottation plus facile et diminue le volume des boues. Alors on obtient une bonne séparation solide-liquide et une bonne déshydratation.

L'*Opuntia ficus indica* (le figuier de barbarie) croit principalement dans les zones arides et semi-arides. L'OFI est capable de produire de grandes quantités de biomasse végétale, même dans des conditions extrêmes.

L'OFI à des intérêts importants dans plusieurs domaines (production fourragère et maraîchère, utilisation médicinale et cosmétique...etc.).

Plusieurs recherches confirment l'efficacité de l'utilisation de l'*Opuntia ficus indica* dans le traitement des eaux usées. Cette plante peut être une alternative naturelle aux produits chimiques utilisés dans la coagulation-floculation classique.

Matériels et méthodes

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la station d'épuration de Beni Messous, et les matériels et méthodes utilisées dans l'étude expérimentale.

II.2. Objectifs de l'étude expérimentale :

Dans le cadre de ce mémoire l'objectif recherché est d'améliorer le conditionnement électrochimique par un ajout d'un biofloculant la poudre de cactus pour avoir une bonne déshydratation des boues résiduaires.

II.3. Présentation de la station d'épuration de Beni Messous (wilaya d'Alger) :

La station d'épuration de la ville de Beni 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 méditerranéenne et à l'embouchure de l'oued Beni Messous.

La station est délimitée par la mer Méditerranéenne, à l'Ouest, l'Oued Béni Messous au Sud, la route nationale N°11 reliant Ain Benian et Staouéli à l'Est et au nord par l'institut d'hôtellerie. Cette station occupée une superficie totale d'environ 12.7 ha.

La station d'épuration de Beni Messous destinée à épurer les eaux résiduaires urbaines avec l'utilisation d'un traitement biologique.

II.4. Matériels de travail :

II.4.1. Verreries :

Béchers, pipettes, éprouvettes, pipettes, jaugées verre de montre, erlenmeyers, Coupelle en verre et en aluminium....etc.

II.4.2. Produits chimiques :

-) Acide sulfurique H_2SO_4
-) hydroxyde de sodium NaOH.

II.4.3. Appareils :

-) Agitateur magnétique de type IKAMAG.
-) Générateur de courant de marque PHYWE type STELLTRAFO MIT GLEICHR.
-) Ampèremètre DIGITAL MULTIMETRE modèle DT-830D.
-) Voltmètre PHYWE 07035-00.
-) Appareil de marque CRISON pour la mesure de pH, conductivité, température et le taux de matières solides.
-) Turbidimètre de type HACH modèle 2100A.
-) Etuve de marque Heraus INSTRUMENTS.
-) Four de marque Heraeus INSTRUMENTS.
-) Balance de marque Sartorius pour les petit poids jusqu'à 150g.
-) Balance de marque PROFESSIONAL DIGITAL TABLE TOP SCALE pour les poids jusqu'à 500 g.

-) Cellule de filtration sous vide conçue au laboratoire pour la mesure de la résistance spécifique.

II.5. Méthodologie :

II.5.1. Echantillonnage et méthode de caractérisation de la boue stabilisée :

II.5.1.1. Echantillonnage

Les échantillons de boues ont été prélevés au niveau de bassin de stabilisation à l'aide d'un bidon lié à un fil métallique. La boue a été transportée dans des jerricans et conservée au laboratoire dans un réfrigérateur à une température de 4 °C.



Figure II.1 : Bassin de stabilisation de la STEP de Beni Messous.

II.5.1.2. Méthode de caractérisation de la boue stabilisée :

-) Dans le laboratoire nous avons mesuré le pH, la conductivité, la température et le taux de matières solides de la boue stabilisée.
-) Nous avons déterminé la siccité (Sc), la matière en suspension (MES) et la matière volatile (MVS) de la boue stabilisée non conditionnée.
-) Nous avons fait un teste de filtrabilité pour la boue stabilisée non conditionnée.
-) Après filtration nous avons mesuré la turbidité, le pH, la conductivité, la température et le taux de matières solides du filtrat, et nous avons calculé la résistance spécifique à la filtration, la siccité du gâteau obtenue, la matière en suspension et la matière volatile.

II.5.2. Techniques expérimentales :

II.5.2.1. Le conditionnement par électrocoagulation :

Le dispositif du procédé d'électrocoagulation comprend :

-) Un générateur.
-) Agitateur magnétique.
-) 2 électrodes en fer plongées dans un bécher contenant 500 ml de la boue.
-) Voltmètre, ampèremètre et des câbles.

II.5.2.1.1. Mode opératoire :

-) On met un bécher rempli avec 500 ml de boue stabilisée sur un agitateur magnétique réglé sur une agitation de 40 tour/min.
-) On plonge deux électrodes en fer de mêmes dimensions dans le bécher, la surface immergée (active) des deux électrodes est constante égale 30 cm^2 , et la distance constante entre les deux égale 2 cm.
-) On branche un ampèremètre entre le générateur de courant et l'anode, pour mesurer l'intensité passant dans la solution, et un voltmètre entre les deux électrodes pour mesurer la tension.
-) Après le montage de dispositifs, on met le générateur de courant et l'agitateur en fonctionnement pour démarrer le processus d'électrocoagulation.

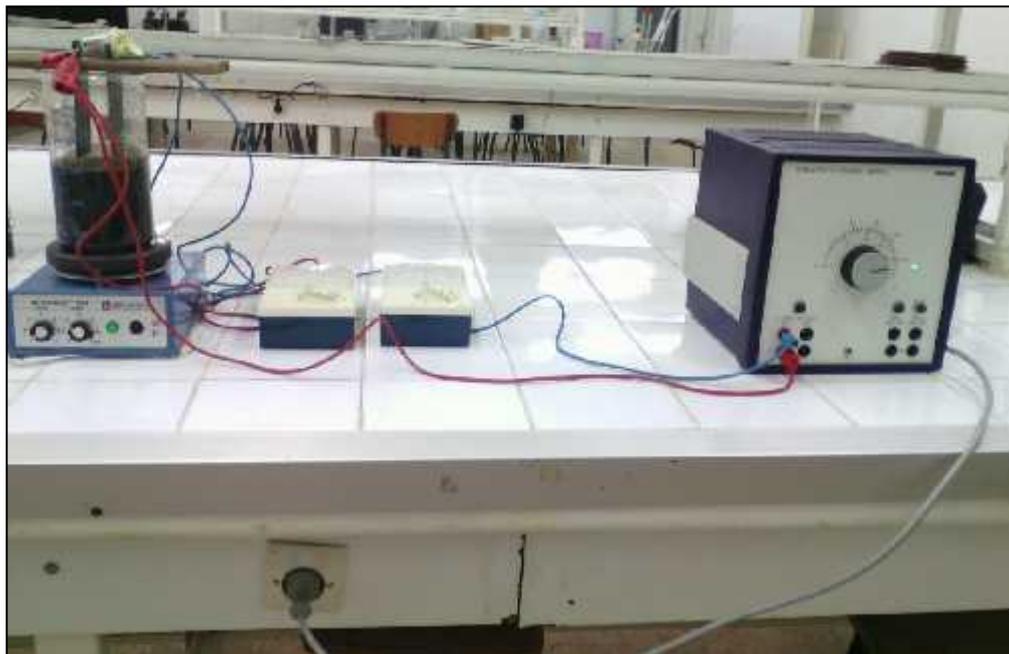


Figure II.2 : Photo de montage expérimentale de l'électrocoagulation.

❖ Préparation des électrodes :

Avant chaque essai d'électrocoagulation, les électrodes sont nettoyées comme suite :

-) Polissage avec un papier abrasif.
-) Rinçage à l'eau distillée.
-) Dégraissage avec hydroxyde de sodium NaOH (0.1 M) pendant 20 seconds.
-) Décapage avec l'acide sulfurique H₂SO₄ (20%) pendant 30 minutes.
-) Rinçage à l'eau distillée.

II.5.2.1.2. Méthode de caractérisation de l'électrocoagulation :

a) Caractérisation de la boue avant et après électrocoagulation :

Ñ La mesure de pH, conductivité, température et le taux de matières solides :

Les mesures de ces paramètres avant et après conditionnement sont réalisées à l'aide d'un appareil de marque CRISON (Voir annexe 1). La lecture se fait lorsque les valeurs restent constantes. La conductivité en ms.cm⁻¹, la température en °C et le taux de matières solides en mg.l⁻¹.

b) Méthode de détermination des paramètres liés au courant électrique :

Ñ L'énergie consommée :

L'énergie consommée W exprimée en kWh.m⁻³, est donnée par la relation suivante :

$$W = X \frac{U \cdot I \cdot T}{V} \mid 1000$$

U : la tension appliquée entre les deux électrodes en volt (V).

I : intensité de courant en ampère (A).

T : la période d'électrocoagulation en heure.

V : volume de la boue conditionnée en m³.

Ñ La concentration en fer dissous expérimentale :

La concentration en fer dissous C_{Fe} exprimée en g.l⁻¹, est calculée par la relation suivante :

$$C_{Fe} = X \frac{m}{V}$$

m : la différence entre la masse initiale de l'anode avant électrocoagulation et la masse finale après l'électrocoagulation en g.

V : le volume de la boue conditionnée en l.

II.5.2.2. La filtration sous vide :

Le dispositif du procédé de filtration sous vide comprend :

-) Un erlenmeyer de 2 litres.
-) Un buchner.
-) Une éprouvette graduée.
-) Un caoutchouc isolant.
-) Papier filtre normal.
-) Manomètre.
-) Une pompe à vide régulé, permettant d'établir un vide de 0.5 bar.

II.5.2.2.1. Mode opératoire :

-) Humidifier le papier filtre et mettre le sur le fond de buchner.
-) Mettre l'éprouvette graduée dans un erlenmeyer de 2 litres.
-) Poser le buchner sur l'erlenmeyer, et ajuster l'entonnoir de buchner dans l'éprouvette.
-) Mettre la pompe à vide en marche, verser 100 ml de la boue conditionnée dans le buchner et rechercher rapidement la pression 0.5 bar et veiller à ce qu'elle reste constante tout au long de l'essai.
-) Quand la pression atteint 0.5 bar, déclencher le chronomètre et noter le volume de filtra déjà recueilli V_0 correspondant au t_0 .
-) Au cours de l'essai, noter les volumes du filtrat recueilli V_x jusqu'à l'essorage du gâteau pour différents temps de filtration t_x .



Figure II.3 : Photo de montage expérimentale de la filtration sous vide.

II.5.2.2.2. Méthode de caractérisation de la filtration sous vide :**a) Caractérisation du filtrat :****Ñ La mesure de la turbidité :**

Nous avons mesuré la turbidité du filtrat par un turbidimètre de type HACH modèle 2100A. La lecture se fait lorsque la valeur reste constante en NTU.

Ñ **La mesure de pH, conductivité, température et le taux de matières solides :** par l'appareil CRISON (Voir annexe 1).

b) Caractérisation du gâteau :**Ñ Détermination de la siccité du gâteau, la matière en suspension MES et la matière volatile MVS :**

- ✓ Peser le papier filtre vide. (M_0 en g)
- ✓ Peser le gâteau humide + le papier filtre. (M_1 en g)
- ✓ Mettre le gâteau dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures.
- ✓ Peser le gâteau sec + le papier filtre. (M_2 en g)

Calcul de siccité :
$$Sc \times \frac{M_2 - M_0}{M_1 - M_0} \times 100 \text{ en \%}$$

V : volume de la boue filtrée (V=100 ml).

Calcul de la matière en suspension:
$$MES \times \frac{M_1 - M_0}{V} \times 1000 \text{ en g/l}$$

- ✓ Peser une coupelle en aluminium. (M_0' en g)
- ✓ Verser le gâteau sec dans la coupelle en aluminium et mettre la coupelle dans un four à moufle à 550°C pendant 2 heures.
- ✓ Peser la coupelle en aluminium + le gâteau sec. (M_3 en g)

Calcul de la matière volatile :
$$MVS \times \frac{M_2 - M_0 - (M_3 - M_0')}{V} \times 1000$$

c) Détermination de la résistance spécifique à la filtration :

C'est la résistance qu'oppose à la filtration (ou cheminement du filtrat) une quantité de gâteau déposée sur 1m² de surface filtrante et contenant 1 kg de produit sec. (Degrémont 1989)

Il est d'usage d'établir les comparatifs entre différentes boues à partir de $r_{0,5}$ (filtration sous une pression différentielle de 0.5 bar ou 49 kPa), et elle permet d'évaluer approximativement la capacité d'un filtre sous vide industriel et de fixer les dosages optimaux de réactifs sur filtre presse. La valeur $r_{0,5}$ pour une boue mixte se situe au environ de 10¹⁴ à 10¹⁵ m.kg⁻¹ valeur incompatible avec un passage direct sur filtre presse. Il faudra donc faire appel à un

conditionnement, pour faire chuter $r_{0,5}$ à une valeur proche de 10^{12} m.kg⁻¹, valeur permettant une filtration acceptable et donc l'obtention d'un gâteau de déshydratation (Degrémont 2005).

Après le teste de filtrabilité, la résistance spécifique ce calcul par la relation suivante :

$$r \times \frac{2.a.P.S^2}{y.C} \quad \text{en m.kg}^{-1}.$$

P : pression de filtration en pascal (soit 49×10^3 pa).

y : la viscosité dynamique du filtrat en pa.s (à 20°C, voisin de $1,1 \times 10^{-3}$ pa.s).

C : concentration des (MES) à l'entrée de l'appareil en kg.m⁻³.

S : surface filtrante en m² (dans notre étude $S = 6.35 \times 10^{-3}$).

a : pente de la droite obtenue dans l'essai de filtrabilité.

II.5.2.3. Préparation de biofloculant (la poudre de cactus) :

La préparation de biofloculant la poudre de cactus a été réalisée par Derbal M. (2016) comme suite :

Les raquettes de cactus ont été collectées à Sidi Aissa, située dans la commune de Guerouaou, à environ 6km au nord- est de Blida (40 km au sud- ouest d'Alger, Algerie). La région de Guerouaou bénéficie d'un climat méditerranéen, il se caractérise par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides

Les raquettes collectées sont de tailles différentes, leur poids variant de 600 g à 2 kg. Elles ont été lavées avec l'eau du robinet, nettoyées et débarrassées de leurs épines avant d'être coupées en petits morceaux (1cm×1cm) avec un simple couteau de cuisine. Ces derniers ont été rincés avec de l'eau distillée (Figure II.4) pour préparer par la suite notre poudre.

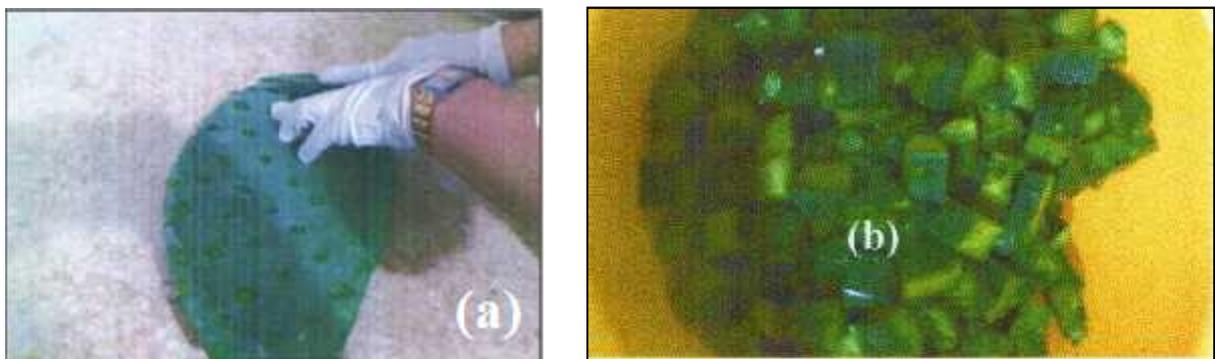


Figure II.4 : (a) Elimination des épines d'une cladode de cactus, (b) Découpage de la cladode en dés.

Les morceaux de cactus (1cm×1cm) ont été pesés puis déposés les uns devant les autres sur des plateaux bien nettoyés et couverts avec du papier cellophane. On a mis ces plateaux sur le toit de la maison (Figure II.5), pour qu'ils soient exposés au soleil tout au long de la journée. On vérifiait régulièrement le changement de couleur qui est un bon indicateur sur déshydratation (Figure II.6).

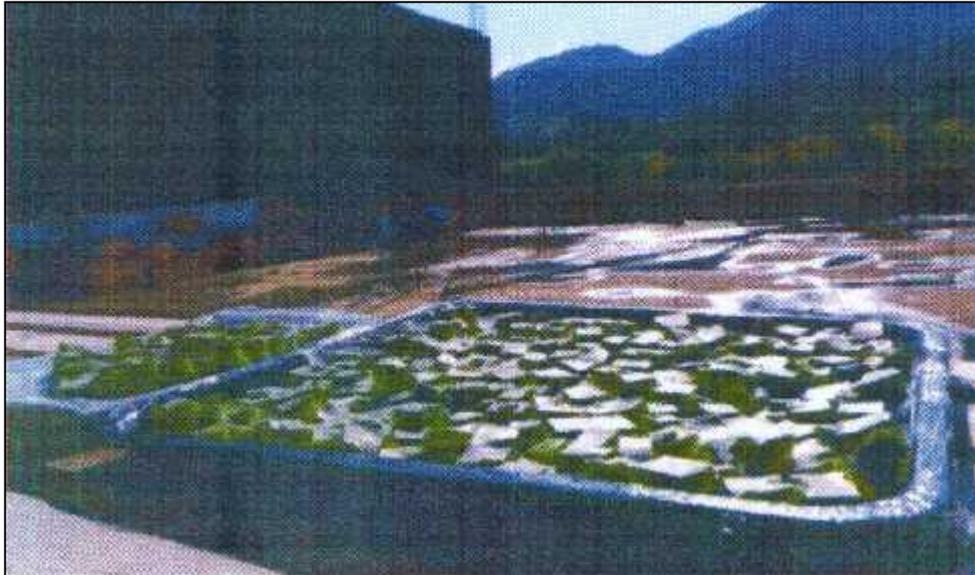


Figure II.5 : Séchage des morceaux de cactus au soleil.

Le séchage au soleil était supposé durer 15 jours (Kazi T. et Virupakshi A., 2013), mais suite à une précipitation durant cette période, la durée a été prolongée de 09 jours. Il a fallu, par conséquent, 24 jours en tout pour avoir des morceaux de cactus bien secs sans aucune trace d'eau.



Figure II.6 : Les dés de cactus après séchage au soleil.

Après le séchage, les morceaux de cactus ont été pesés, puis broyés avec un broyeur de laboratoire et tamisés à 400 μm . A la fin, on a obtenu une poudre très fine, d'une couleur verdâtre (Figure II.7).



Figure II.7 : (a) Photographie d'un broyeur de laboratoire, (b) La poudre de cactus après broyage et tamisage.

En notant la masse initiale et la masse finale on a pu calculer le pourcentage d'eau présente dans les raquettes et qui de l'ordre de 94.3 %

II.5.2.4. Les conditions opératoires pour l'étude expérimentale :

Les paramètres constants durant tous les essais sont :

-) Le Volume de la boue à conditionnée : 500 ml.
-) Agitation : 40tr/min.
-) Distance entre les deux électrodes : $d = 2$ cm.
-) Température ambiante.

a) L'influence de la densité de courant :

Pour étudier l'influence de la densité de courant sur différents paramètres nous avons fait des essais d'électrocoagulation avec différents intensités de courant dans les conditions suivantes :

-) Intensité de courant (I) en Ampère : 0.15 ; 0.30 ; 0.60 ; 0.75 et 0.90 A.
-) La surface immergée (active) : $S = l \times L = 5 \times 6 = 30$ cm^2 .
-) La densité de courant (i) calculé par la loi suivant : $i = I/S$ en ($\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$), alors on trouve les densités de courant suivantes : 50 ; 100 ; 150 ; 200 ; 250 et 300 $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$.
-) Le temps d'électrolyse constant : $T = 15$ min.
-) pH de la boue stabilisée.

b) L'influence de temps d'électrolyse :

Afin d'étudier l'influence de temps d'électrolyse sur différents paramètres nous avons fait des essais d'électrocoagulation avec densités de courant optimales dans les conditions suivantes :

-) Les densités de courant (i) optimales sélectionnées d'après les essais précédentes de l'influence de la densité de courant sont : 100 ; 150 et 200 A.m⁻²
-) Les temps d'électrolyse (T) : 15 ; 30 ; 45 ; 60 et 75 min.
-) pH de la boue stabilisée.

c) L'influence de la dose de biofloculant :

D'après les essais précédents, nous avons fixé les conditions opératoires suivantes pour les prochains essais de l'ajout de biofloculant :

-) Nous avons choisie deux densités de courant optimales : 100 A.m⁻² et 150 A.m⁻².
-) Le temps d'électrolyse optimale : 15 min.
-) pH de la boue stabilisée.

Les doses de biofloculant (la poudre de cactus) sont : 0.5 g/kg ; 1 g/kg ; 1.5 g/kg ; 2 g/kg ; 2.5 g/kg ; 3 g/kg. Nous avons ajouté la poudre de cactus au début de l'électrocoagulation à t=0.

d) L'influence de pH :

D'après les résultats des essais précédents, nous avons choisie les conditions opératoires suivantes pour les prochains essais de pH :

-) La densité de courant : 100 A.m⁻².
-) Le temps d'électrolyse : 15 min.
-) La dose optimale de biofloculant : 0.5 g.kg⁻¹.

Les pH étudiés sont : 2 ; 4 ; 6.79 (pH de la boue) ; 8 ; 10.

II.6. Conclusion :

Ce chapitre, englobe tous les matériels, les techniques expérimentales, les méthodes de caractérisation et les conditions opératoires qui nous permettent de faire notre étude expérimentale.

Résultats et discussion

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous avons discuté et interprété les résultats obtenues par l'application du procédé d'électrocoagulation et l'ajout d'un biofloculant dans le conditionnement d'une boue stabilisée.

Au début nous avons fait une caractérisation physico-chimique de la boue stabilisée non conditionnée, après nous avons étudié l'influence de la densité de courant, le temps d'électrolyse sur différents paramètres afin de choisir les densités de courant optimales et la durée d'électrolyse optimale, en suite nous avons étudié l'influence de la combinaison de l'électrocoagulation avec l'ajout de différentes doses de biofloculant (la poudre de cactus), et enfin, nous avons étudié l'influence du pH sur le procédé combiné l'électrocoagulation+ biofloculant.

III.2. Caractérisation physico-chimique de l'échantillon de boue stabilisée (non conditionnée):

Paramètre	pH	Conductivité (ms.cm ⁻¹)	MES (g.l ⁻¹)	Siccité sans filtration (%)	Turbidité du filtrat (NTU)	Siccité après filtration (%)	RSF (m.kg ⁻¹)
valeur	7.31	2.47	46.54	4.31	101	14.34	9.73×10 ¹³

Tableau III.1 : Caractérisation physico-chimique de l'échantillon de boue stabilisée de la STEP de la ville de Beni-Messous.

D'après le tableau III.1, on remarque que :

-) Le pH de la boue est presque neutre.
-) La siccité de la boue est très faible ce qui indique que la boue est très liquide.
-) La résistance spécifique à la filtration est très élevée, parce que la boue est non conditionnée.

III.3. L'influence de la densité de courant :

Pour l'étude de l'influence de la densité de courant sur différents paramètres, nous avons appliqué les densités de courant suivantes : 50 ; 100 ; 150 ; 200 ; 250 et 300 A.m⁻²., avec un temps d'électrolyse constant : 15 min.

III.3.1. L'influence de la densité de courant sur l'énergie consommée :

Les valeurs d'énergie consommée obtenus par rapport aux différentes densités de courant avec un temps d'électrolyse de 15 min pendant l'électrocoagulation, sont présentées dans la figure III.1.

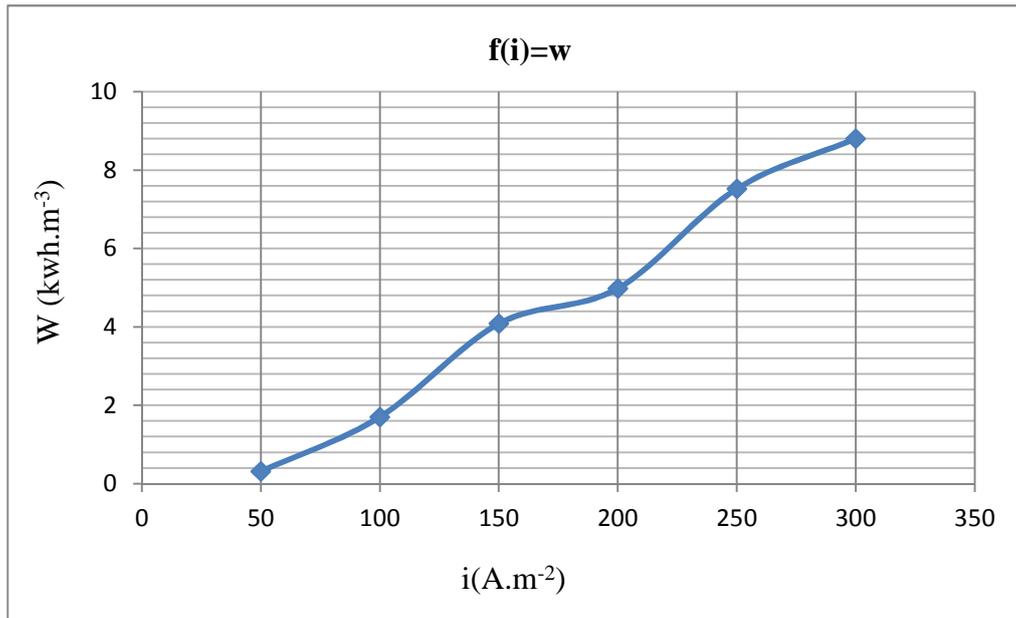


Figure III.1 : L'influence de la densité de courant sur l'énergie consommée (W).

Discussion :

D'après la figure III.1, on remarque qu'il y a une augmentation d'énergie consommée de 0.31 $kwh.m^{-3}$ pour une densité de courant 50 $A.m^{-2}$ jusqu'à 8.8 $kwh.m^{-3}$ pour 100 $A.m^{-2}$.

Nous concluons que plus la densité de courant augmente plus l'énergie consommée devient importante. Selon Chen (2004), les courants élevés provoquent une augmentation de la vitesse de réaction dans ce cas les électrodes attaquées plus rapidement, entraînant une dépense énergétique plus importante et des grandes pertes d'énergie en chaleur dans le système.

III.3.2. L'influence de la densité de courant sur la concentration en fer dissous :

Les concentrations en fer dissous obtenus au cours d'électrocoagulation en fonction de différentes densités de courant sont présentées dans la figure III.2.

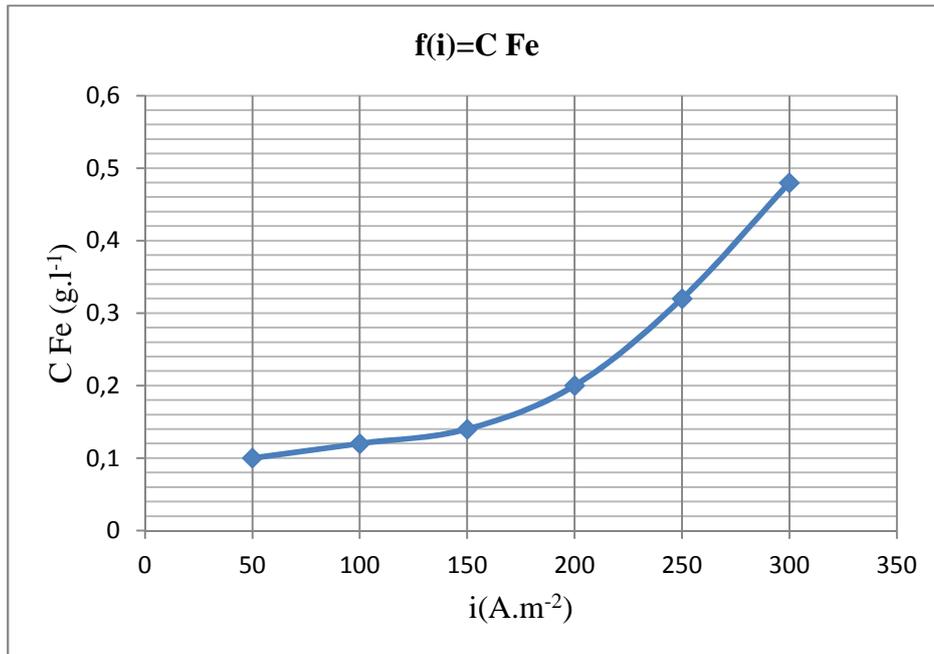
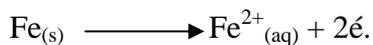


Figure III.2 : L'influence de la densité de courant sur la concentration en fer dissous (C_{Fe}).

Discussion :

A partir de la figure III.2, on remarque que quand la densité de courant augmente la concentration en fer dissous augmente. Nous pouvons donc déduire qu'il y a une libération de fer au niveau de l'anode sous forme d'ion Fe^{2+} par la réaction suivante :



Cette production d'ion Fe^{2+} augmente proportionnellement avec la densité de courant.

III.3.3. L'influence de la densité de courant sur le pH final de la solution :

La variation du pH final de la boue et du filtrat après l'électrocoagulation est présentée dans la figure III.3.

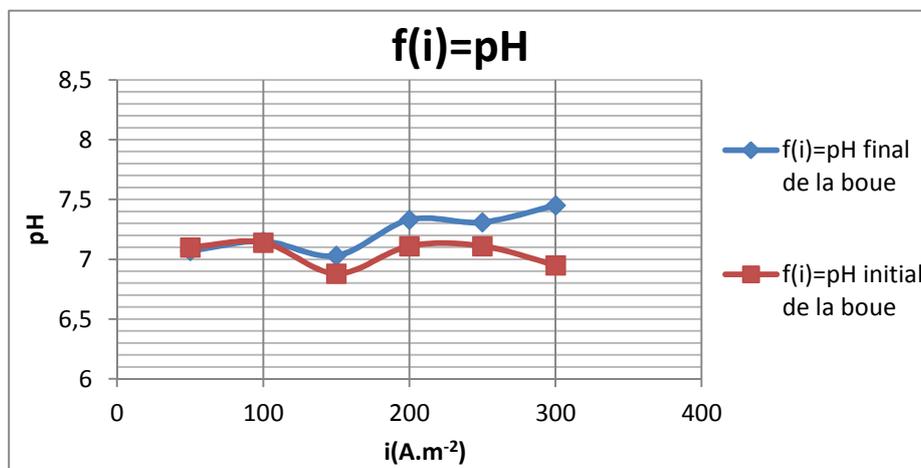
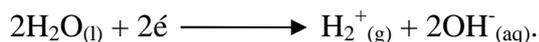


Figure III.3 : L'influence de la densité de courant sur le pH final de la boue.

Discussion :

On remarque que au début les valeurs de pH initial et final sont presque les mêmes pour une densité de courant égale 50 A.m^{-2} , mais après de 100 A.m^{-2} jusqu'à 300 A.m^{-2} les valeurs de pH final augmente. Alors l'augmentation de la densité de courant provoque une élévation de pH final de la boue.

Donc nous constatons qu'il ya une réaction chimique qui produit des ions d'hydroxyles (OH^-) qui provoque l'élévation du pH et cette réaction se fait au niveau de la cathode comme suite :



Cette production d'ion d'hydroxyle (OH^-) augmente avec l'augmentation de densité de courant.

Des chercheurs ont montré que durant le processus d'électrocoagulation, le pH de l'eau augmente approximativement d'une unité (ABUZAID et coll., 2000; RUBACH et SAUR, 1997). De même l'augmentation du pH est due au dégagement de l'hydrogène à la cathode (VIK et coll., 1984).

III.3.4. L'influence de la densité de courant sur la siccité du gâteau :

Les valeurs de siccités obtenues en fonction de densité de courant sont présentées dans la figure III.4.

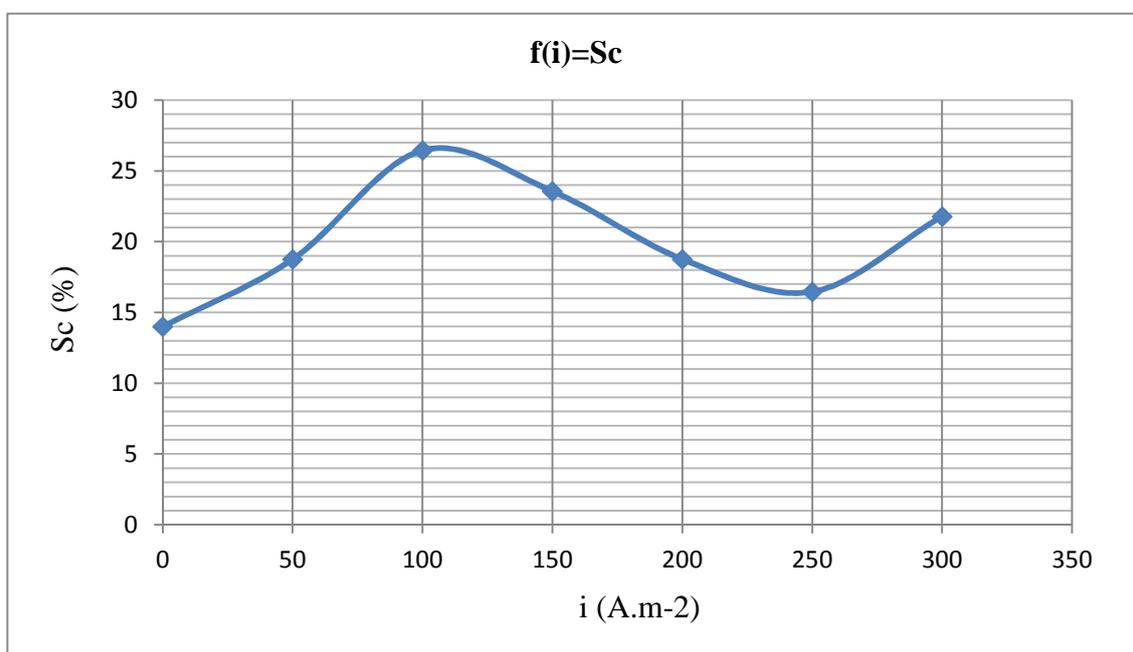


Figure III.4 : L'influence de la densité de courant sur la siccité du gâteau (Sc).

Discussion :

D'après la figure III.4, on remarque une augmentation de la siccité de 14.34 % jusqu'à une valeur maximum 26.45 % qui correspond à une densité de courant de 100 A.m^{-2} , après on remarque une diminution de la siccité de 26.45 % jusqu'à 16.46 % dans l'intervalle de

densité 100 et 250 A.m^{-2} , puis elle remonte encore jusqu'à 21.79 % pour une densité de courant 300 A.m^{-2} .

Quand la siccité est importante on déduit que la quantité des floccs est aussi importante alors il ya une bonne électrocoagulation. À partir des résultats la bonne électrocoagulation correspond à une valeur de densité de courant égale 100 A.m^{-2} avec une siccité égale 26.45 %

Nous concluons que au cours de l'électrocoagulation les ions Fe^{2+} réagissent avec les ions hydroxyles OH^- et nous donnent des coagulants métalliques $\text{Fe}(\text{OH})_2$ avec un dégagement d'hydrogène (H_2), les coagulants métalliques permet la neutralisation des particules colloïdales alors la formation des floccs et le gaz d'hydrogène permet de transporter les matières en suspension vers la surface de solution, ce qui explique la mousse observée à la surface de la boue.

Remarque : la siccité à diminuer dans l'intervalle 100 A.m^{-2} jusqu'à 300 A.m^{-2} pour expliquer cette diminution on peut donner des hypothèses, dans notre étude après le conditionnement nous avons prend les flocc qui sont flottés au surface alors peut être dans cet intervalle il ya une décantation plus que une flottation, peut être aussi que la quantité importante de gaz produite à perturber la flocculation de la boue, on plus que dans toute étude expérimentale on trouve des erreurs opératoire ou manuel.

III.3.5. L'influence de la densité de courant sur la résistance spécifique :

Les valeurs de la résistance spécifique en fonction de densité de courant sont fournit dans la figure III.5.

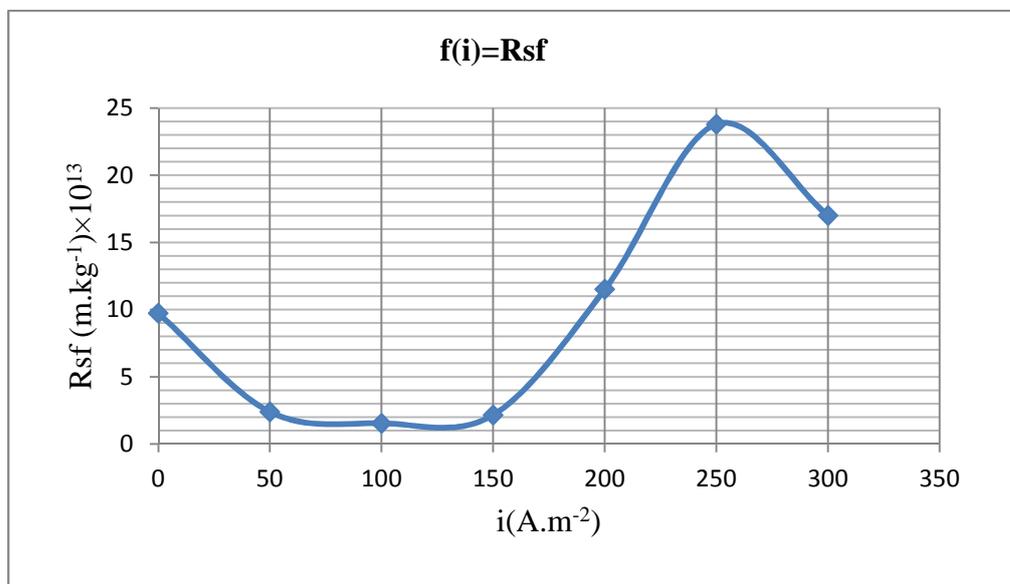


Figure III.5 : L'influence de la densité de courant sur la résistance spécifique (R_{sf}).

Discussion :

La figure III.5 montre une diminution de la résistance spécifique de $9.72 \times 10^{13} \text{ m.kg}^{-1}$ jusqu'à un minimum et meilleure valeur égale $1.54 \times 10^{13} \text{ m.kg}^{-1}$ qui correspond à une densité de courant de 100 A.m^{-2} , après on observe une augmentation de la résistance spécifique vers une valeur maximum $2.38 \times 10^{14} \text{ m.kg}^{-1}$ pour une densité de 250 A.m^{-2} , après la résistance spécifique diminue encore jusqu'à $1.70 \times 10^{14} \text{ m.kg}^{-1}$.

La diminution de la résistance spécifique indique qu'il y a une bonne séparation solide-liquide et alors une bonne filtration et d'après la figure III.5 nous pouvons déduire que la séparation solide-liquide a été meilleure pour une densité de courant de 100 A.m^{-2} .

III.3.6. L'influence de la densité de courant sur le volume de filtrat recueilli :

L'évolution des volumes recueillis en fonction du temps avec différentes densités de courant sont présentés dans la figure III.6.

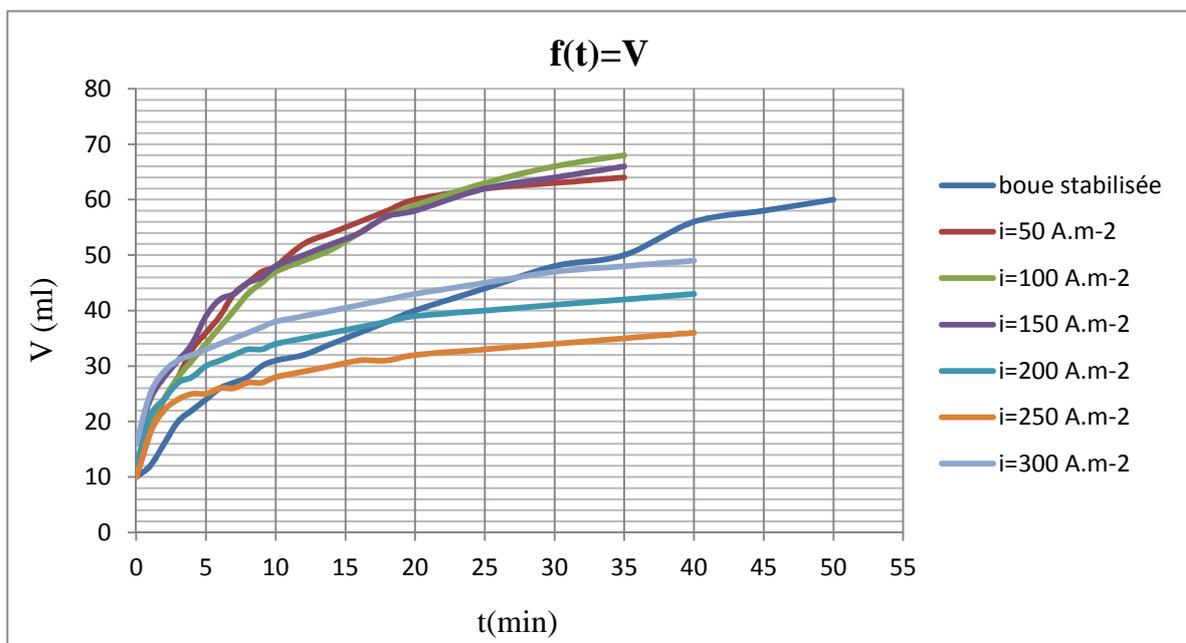


Figure III.6 : L'influence de la densité de courant sur le volume de filtrat recueilli.

Discussion :

D'après la figure III.6, on voit que pour toutes les densités de courant étudiées le volume recueilli augmente en fonction du temps. Et on remarque qu'il y a deux parties, une première partie où la filtration est facile et rapide avec des volumes de filtrat importants pour les densités de courant 50 A.m^{-2} , 100 A.m^{-2} et 150 A.m^{-2} , et une deuxième partie où la filtration devient lente et difficile avec des volumes de filtrat peu importants pour les densités de courant 200 A.m^{-2} , 250 A.m^{-2} et 300 A.m^{-2} .

Une bonne filtration indique qu'il y a une bonne floculation de la boue alors une bonne séparation solide-liquide, et à partir du graphique la bonne filtration correspond à des densités de

courant de 50 A.m^{-2} , 100 A.m^{-2} et 150 A.m^{-2} , et ces densités correspondent aussi à des siccités importantes et des faibles résistances spécifiques (Tableau III.2).

$i \text{ (A.m}^{-2}\text{)}$	$R_{sf} \text{ (m.kg}^{-1}\text{)}$	$Sc \text{ (\%)}$
0	9.72×10^{13}	14.34
50	2.39×10^{13}	18.75
100	1.54×10^{13}	26.45
150	2.16×10^{13}	23.56
200	1.15×10^{14}	18.76
250	2.38×10^{14}	16.46
300	1.70×10^{14}	21.79

Tableau III.2 : la résistance spécifique et la siccité par rapport aux densités de courant.

❖ **Observations durant les essais de l'influence de la densité de courant :**

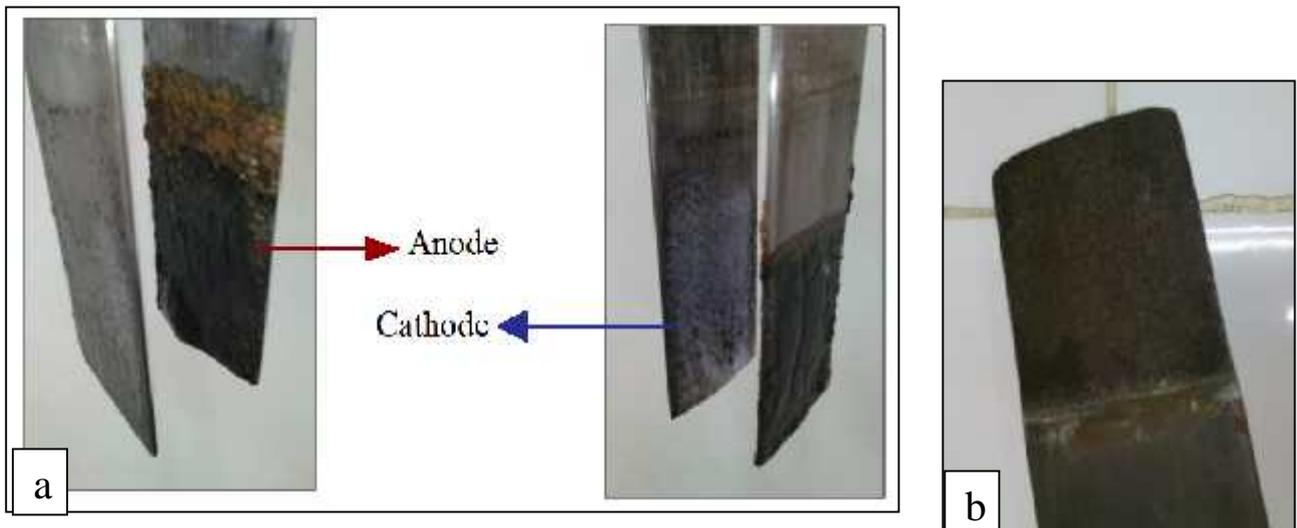


Figure III.7 : a) L'état de l'anode et de la cathode après électrocoagulation, b) Anode après électrocoagulation nettoyée avec l'eau.

Remarque :

On remarque une couleur brun-rouge qui indique qu'il y a l'oxydation du fer au niveau de la surface immergée de l'anode et des bulles de gaz au niveau de la surface immergée de la cathode c'est le gaz d'hydrogène. Après rinçage de l'anode avec l'eau on peut remarquer une rugosité à la surface active de l'anode.

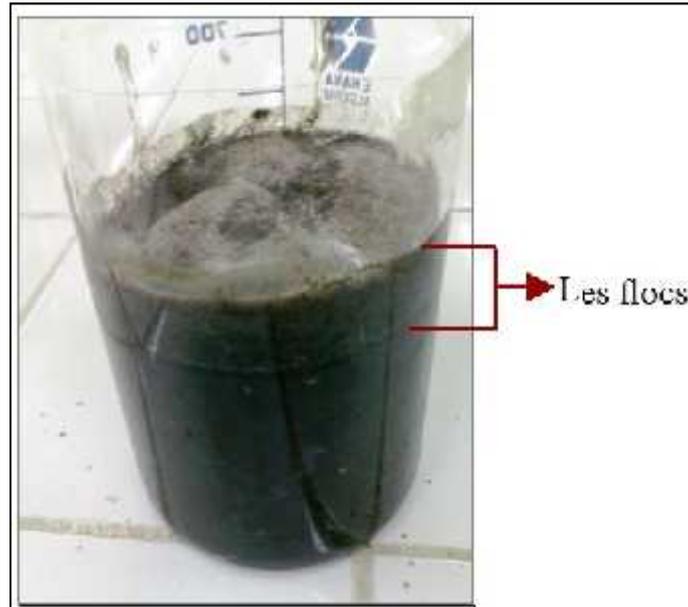
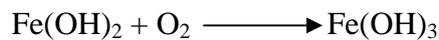


Figure III.8 : Boue après électrocoagulation avec $i= 150 \text{ A.m}^{-2}$ et $T= 15 \text{ min}$.

Remarque :

On remarque une couleur verdâtre due à Fe(OH)_2 , et à la surface on remarque une couleur jaune-orangé due à la présence de Fe(OH)_3 qui a été formé d'après la réaction suivante :



III.4. L'influence de temps d'électrolyse :

D'après les essais précédents, nous avons choisie les densités de courant optimales 100 A.m^{-2} et 150 A.m^{-2} . Et pour étudier l'influence de temps d'électrolyse sur différents paramètres nous avons choisie les temps d'électrolyse suivants : 15 ; 30 ; 45 ; 60 et 75 min.

III.4.1. L'influence de temps d'électrolyse sur l'énergie consommée :

Les valeurs de la consommation d'énergie par rapport aux différents temps d'électrolyse pour les deux densités choisies 100 A.m^{-2} et 150 A.m^{-2} sont présentées dans le graphe suivant :

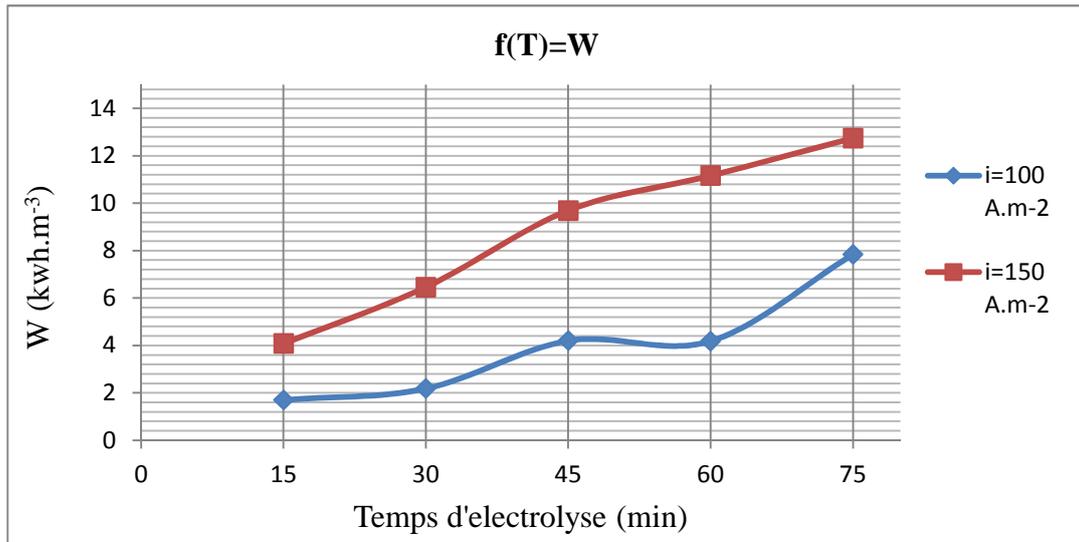


Figure III.9 : L'influence de temps d'électrolyse sur l'énergie consommée (W).

Discussion :

On remarque selon la figure III.9 que l'énergie consommée augmente avec l'augmentation de temps d'électrolyse quel que soit la densité de courant appliquée 100 A.m^{-2} ou 150 A.m^{-2} .

III.4.2. L'influence de temps d'électrolyse sur la concentration en fer dissous :

Les concentrations en fer dissous par rapport aux différents temps d'électrolyse avec les densités de courant choisies (100 et 150 A.m^{-2}) sont présentées dans la figure III.10.

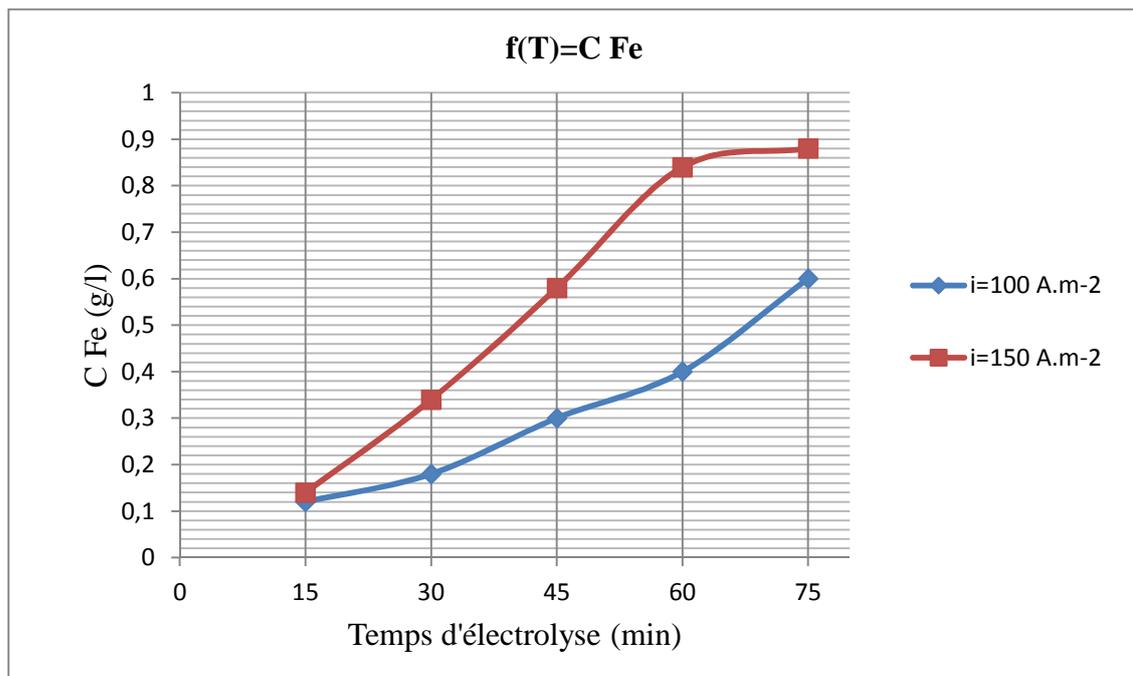


Figure III.10 : L'influence de temps d'électrolyse sur la concentration en fer dissous (C Fe).

Discussion :

A partir de la figure III.10, pour les deux densités de courant la concentration en fer dissous accroître avec la croissance de temps d'électrolyse appliqué.

Nous pouvons donc déduire que quelle que soit la densité de courant la production des ions Fe^{2+} par la dissolution de l'anode augmente avec l'augmentation de temps d'électrolyse.

III.4.3. L'influence de temps d'électrolyse sur le pH final de la solution :

La variation du pH initial et final de la boue en fonction de temps d'électrolyse avec les densités 100 A.m^{-2} et 150 A.m^{-2} , est présentée dans la figure III.11 et la figure III.12

) Pour la densité de courant 100 A.m^{-2} :

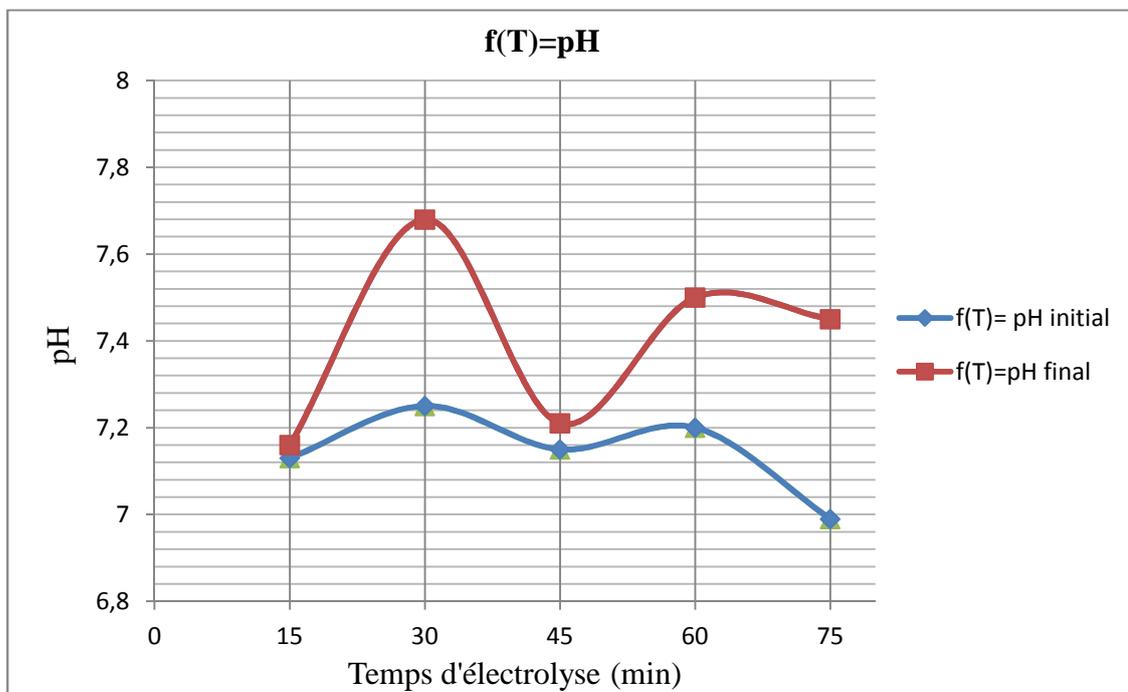


Figure III.11 : L'influence de temps d'électrolyse sur pH final de la boue.

J) Pour la densité de courant 150 A.m^{-2} :

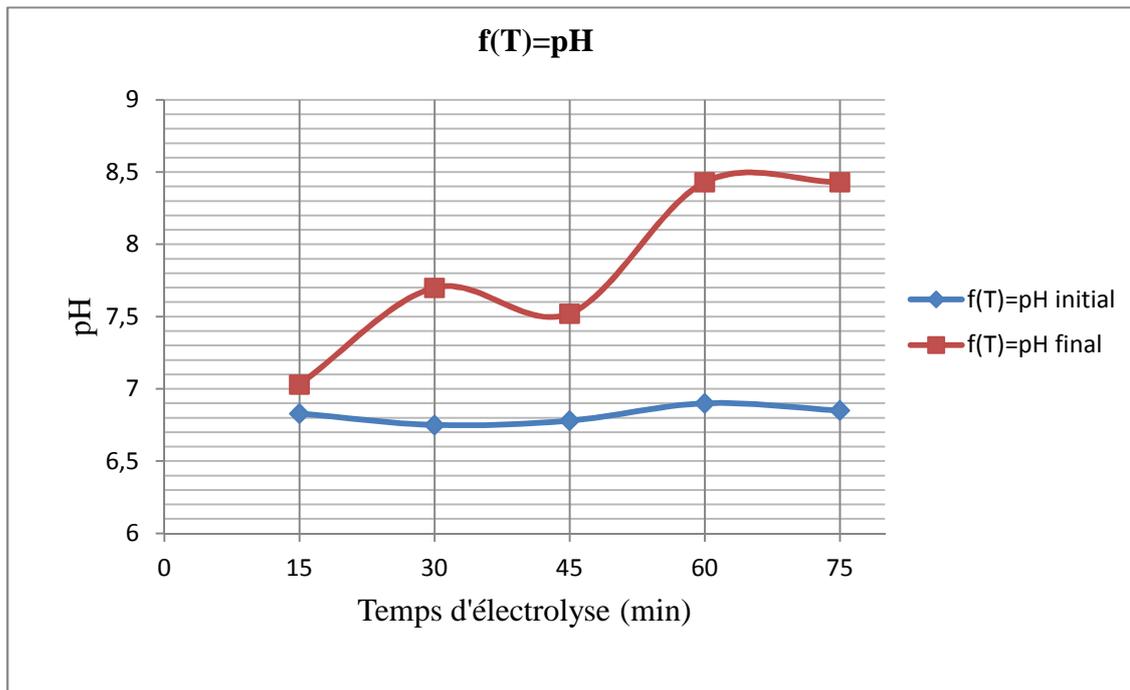


Figure III.12 : L'influence de temps d'électrolyse sur pH final de la boue.

Discussion :

Les figures III.11 et III.12 au dessus montrent que quel que soit la densité de courant, le pH augmente en fonction de temps d'électrolyse.

Alors nous concluons que la production des ions OH^- augmente avec l'augmentation de temps d'électrolyse.

III.4.4. L'influence de temps d'électrolyse sur la siccité du gâteau :

Les valeurs de siccité obtenues par rapport au temps d'électrolyse pour les trois densités de courant 100 A.m^{-2} et 150 A.m^{-2} sont fournis dans la figure III.13.

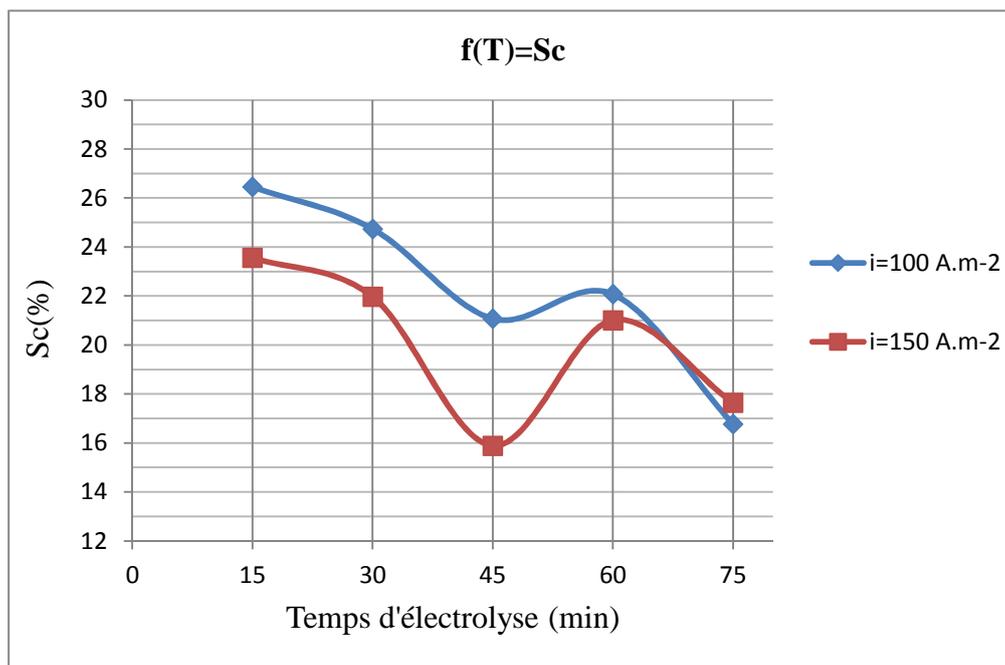


Figure III.13: L'influence de temps d'électrolyse sur la siccité du gâteau (Sc).

Discussion :

D'après la figure III.13, on remarque que pour les densités 100 et 150 A.m⁻² la siccité au début est maximum 26.45 % pour la densité 100 A.m⁻² et 23.56 % pour 150 A.m⁻² avec un temps d'électrolyse égale 15 min après elle diminue en fonction de temps d'électrolyse.

En comparant ces valeurs de siccité avec les valeurs de pH, on remarque que pour les densités 100 A.m⁻² et 150 A.m⁻² où les siccités sont importantes 26.45 % et 23.56 % avec un temps électrolyse égale 15 min, les valeurs de pH final sont variées entre 7.03 et 7.33, mais quand on augmente le temps d'électrolyse les siccités diminuent et le pH final augmente jusqu'à 8.43, alors on peut dire que le milieu devient basique et alors il y a la présence des complexes anioniques qui perturbent la coagulation et la floculation de la boue.

III.4.5. L'influence de temps d'électrolyse sur la résistance spécifique :

Les valeurs de la résistance spécifique en fonction de temps d'électrolyse sont données dans la figure III.14.

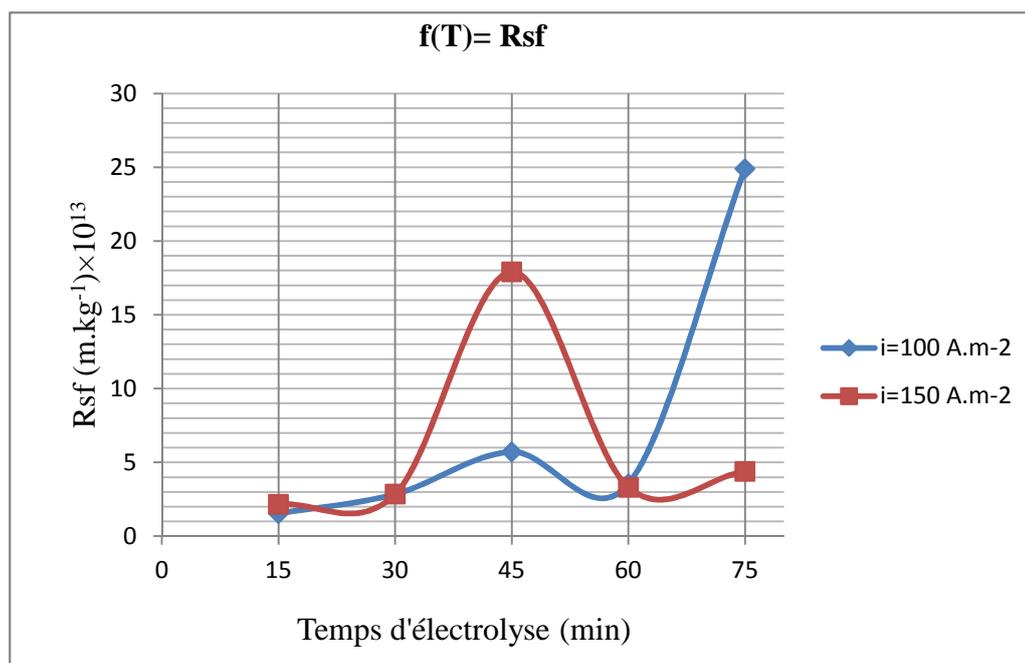


Figure III.14 : L'influence de temps d'électrolyse sur la résistance spécifique (Rsf).

Discussion :

D'après la figure III.14, on voit que la résistance spécifique est meilleure pour les densités de courant 100 A.m^{-2} et 150 A.m^{-2} et égale respectivement $1.54 \times 10^{13} \text{ m.kg}^{-1}$ et $2.16 \times 10^{13} \text{ m.kg}^{-1}$ avec un temps d'électrolyse de 15 min.

Nous pouvons déduire que la séparation solide-liquide est meilleure pour les densités de courant 100 A.m^{-2} et 150 A.m^{-2} avec un temps d'électrolyse de 15 min, si on compare ces résultats avec les résultats de siccité, on remarque qu'il y a une relation proportionnelle, quand la résistance spécifique diminue la siccité augmente (Tableau III.2).

T (min)	i=100 A.m ⁻²		i=150 A.m ⁻²	
	Rsf (m.kg ⁻¹)	Sc (%)	Rsf (m.kg ⁻¹)	Sc (%)
15	1.54×10^{13}	26.45	2.16×10^{13}	23.56
30	2.85×10^{13}	24.74	2.85×10^{13}	21.97
45	5.71×10^{13}	21.07	1.79×10^{14}	15.89
60	3.55×10^{13}	22.07	3.31×10^{13}	21.01
75	2.49×10^{14}	16.77	4.39×10^{14}	17.64

Tableau III.3 : la résistance spécifique et la siccité par rapport aux densités de courant.

A partir des résultats de la siccité et de résistance spécifique, nous pouvons déduire que le meilleur temps d'électrolyse égale 15 min pour les deux densités 100 A.m^{-2} et 150 A.m^{-2} .

III.4.6. L'influence de temps d'électrolyse sur le volume de filtrat recueilli :

Les volumes de filtrat recueilli après filtration des boues conditionnées en fonction de temps avec différents temps d'électrolyse pour les trois densités 100, 150 et 200 A.m⁻² sont présentés dans la figure III.15 et la figure III.16.

) Pour $i=100$ A.m⁻²:

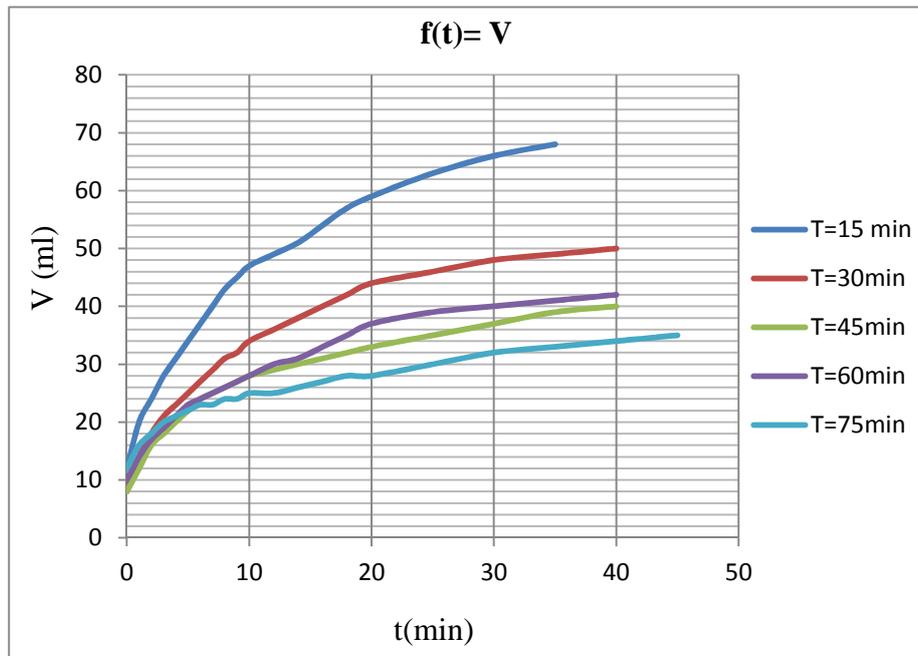


Figure III.15 : L'influence de temps d'électrolyse sur le volume de filtrat recueilli.

) Pour $i=150$ A.m⁻²:

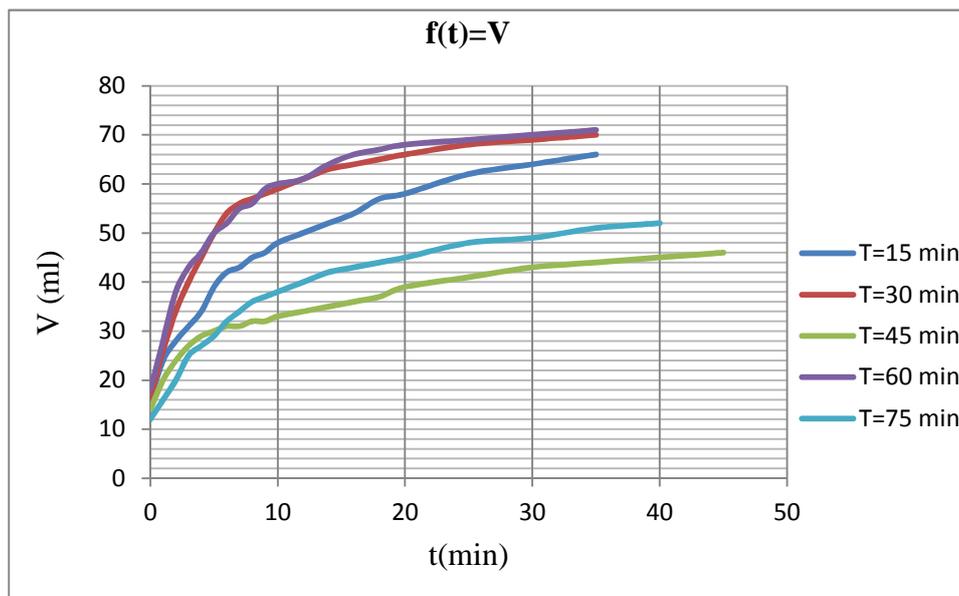


Figure III.16 : L'influence de temps d'électrolyse sur le volume de filtrat recueilli.

Discussion :

Les figures (III.15 et III.16) montrent que pour les deux densités de courant 100 A.m^{-2} et 150 A.m^{-2} il ya une augmentation de volume de filtrat recueillie en fonction de temps avec les différents temps d'électrolyse.

-) Pour $i = 100 \text{ A.m}^{-2}$ le meilleur volume de filtrat recueilli est 68 ml à 35 min avec un temps d'électrolyse égale 15 min.
-) Pour $i = 150 \text{ A.m}^{-2}$ les meilleurs volumes de filtrat recueilli sont 66 ml, 70 ml et 71 ml à 35 min respectivement pour les temps d'électrolyse 15 min, 30 min et 60 min.

❖ Observations durant les essais de l'influence de temps d'électrolyse :

Figure III.17 : Photo obtenu après environ une minute de l'électrocoagulation.

Remarque :

Après environ une minute de le démarre d'électrocoagulation, on observe des bulles de gaz flottent au surface de la boue au niveau de la cathode, due à la formation d'hydrogène.

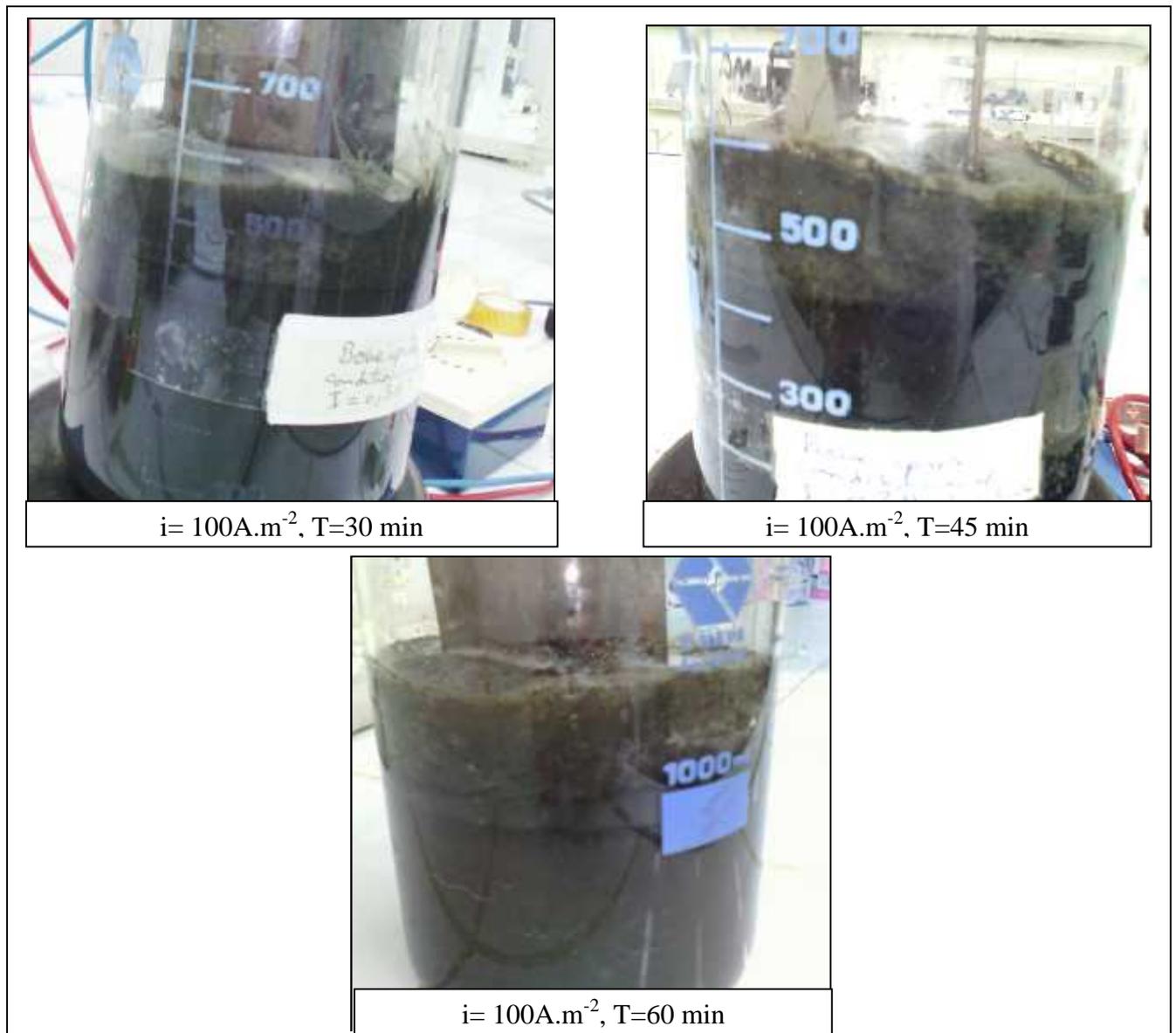


Figure III.18 : Photos obtenus après l'électrocoagulation de la boue.

Remarque :

Après l'électrocoagulation on remarque qu'il ya des floccs qui flottent au surface de la boue et autres qu'ils décantent au fond, et entre les deux il ya du l'eau turbide.

III.5. L'influence de la dose de bioflocculant :

D'après les essais précédents, nous avons choisie deux densités de courant optimales : 100 A.m^{-2} et 150 A.m^{-2} , et un temps d'électrolyse optimale égale 15 min pour les prochains essais de l'ajout de bioflocculant (la poudre de cactus).

III.5.1. L'influence de la dose de biofloculant sur l'énergie consommée :

L'évolution de l'énergie consommée en fonction de différentes doses de biofloculant (poudre de cactus) avec les deux densités de courant optimales 100 A.m^{-2} et 150 A.m^{-2} , est mentionnée dans la figure III.19 et la figure III.20.

) Pour $i = 100 \text{ A.m}^{-2}$:

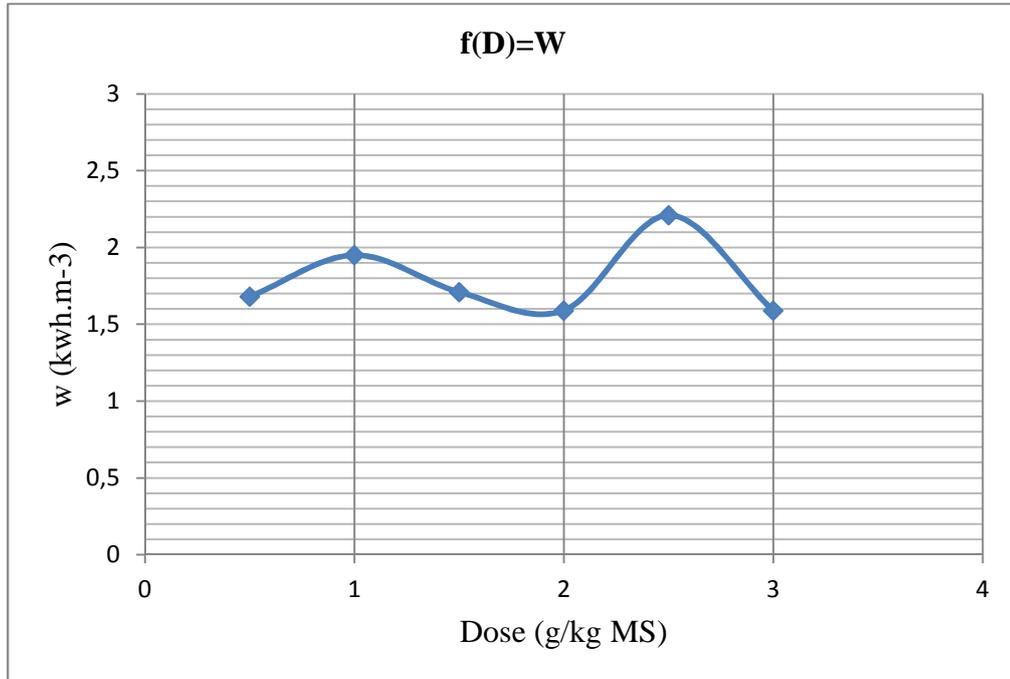


Figure III.19 : L'influence de la dose de biofloculant sur l'énergie consommée (W).

) Pour $i = 150 \text{ A.m}^{-2}$:

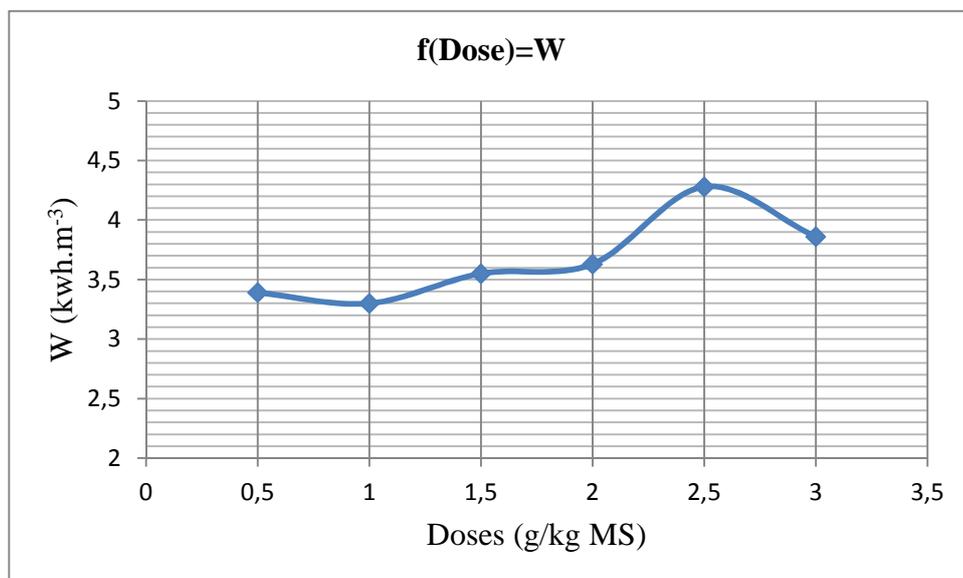


Figure III.20 : L'influence de la dose de biofloculant sur l'énergie consommée (W).

Discussion :

Si on compare ces valeurs d'énergies consommées d'un conditionnement avec biofloculant par les valeurs d'énergies consommées d'un conditionnement sans biofloculant ($W = 1,70 \text{ kWh.m}^{-3}$ pour $i = 100 \text{ A.m}^{-2}$ et $W = 4,08 \text{ kWh.m}^{-3}$ pour $i = 150 \text{ A.m}^{-2}$ à un temps d'électrolyse de 15 min) on remarque :

) Pour $i = 100 \text{ A.m}^{-2}$:

L'énergie consommée a diminuée de $1,70 \text{ kWh.m}^{-3}$ pour un conditionnement sans biofloculant jusqu'à $1,68 \text{ kWh.m}^{-3}$, $1,59 \text{ kWh.m}^{-3}$ et $1,59 \text{ kWh.m}^{-3}$ respectivement pour un conditionnement avec les doses de biofloculant $0,5 \text{ g/kg MS}$, 2 g/kg MS et 3 g/kg MS .

) Pour $i = 150 \text{ A.m}^{-2}$:

L'énergie consommée par un conditionnement sans biofloculant qui est égale $4,08 \text{ kWh.m}^{-3}$ a été diminuée par rapport à un conditionnement avec biofloculant pour toutes les doses $0,5 \text{ g.kg}^{-1}$, 1 g.kg^{-1} , $1,5 \text{ g.kg}^{-1}$, 2 g.kg^{-1} , 3 g.kg^{-1} , sauf pour $2,5 \text{ g.kg}^{-1}$ a été un peu augmentée jusqu'à $4,28 \text{ kWh.m}^{-3}$.

III.5.2. L'influence de la dose de biofloculant sur la siccité du gâteau :

Les siccités obtenues après les essais de filtration des boues conditionnées par combinaison d'un procédé d'électrocoagulation avec l'ajout des différentes doses de biofloculant qui est la poudre de cactus, sont présentées dans la figure III.21.

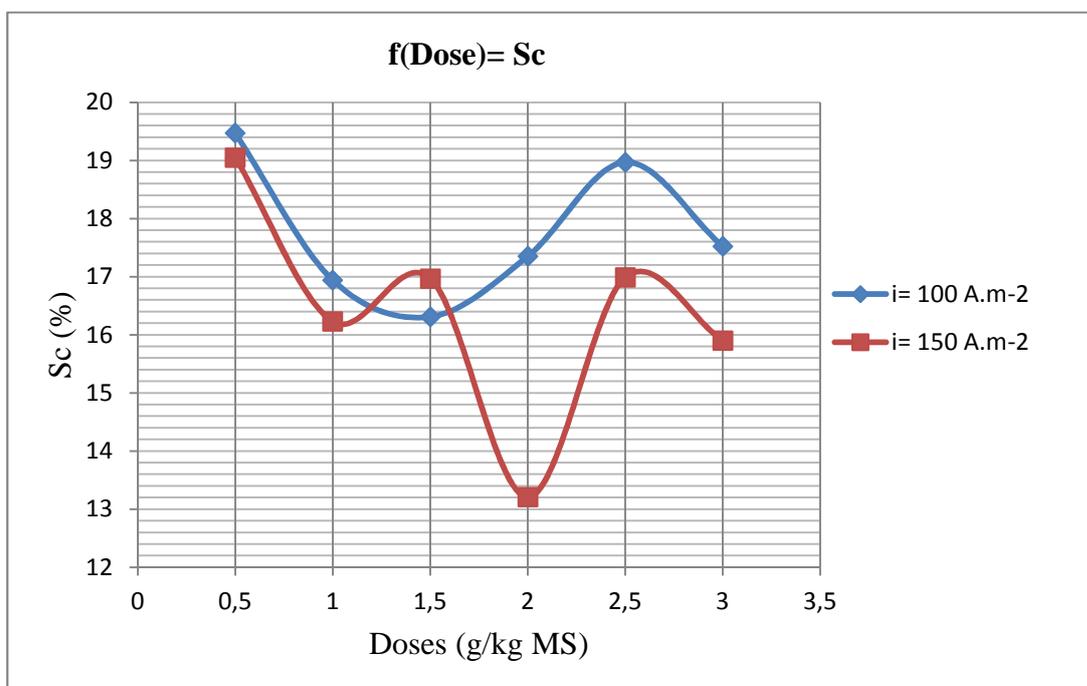


Figure III.21 : L'influence de la dose de biofloculant sur la siccité du gâteau (S_c).

Discussion :

D'après la figure III.21, les siccités trouvées sont faible, les grandes valeurs obtenus sont 19.47 % et 19.05 % respectivement pour les densités de courant 100 A.m^{-2} et 150 A.m^{-2} et avec l'ajout d'un biofloculant de 0.5 g.kg^{-1}

En comparant ces valeurs par les valeurs obtenues après un conditionnement sans biofloculant, on remarque qu'il ya une diminution de siccité (tableau III.3). Nous pouvons dire que cette diminution peut être liée à la faible quantité de l'acide polygalacturonique dans la poudre de cactus, ou à la présence des éléments antioxydants avec des quantités importantes dans le biofloculant qui perturbent la dissolution de l'anode, ou peut être il ya des complexes anioniques dans la poudre de cactus qui perturbent la coagulation de la boue.

Densité de courant i (A.m^{-2})	Sc (%)	
	Conditionnement sans biofloculant (T=15 min)	Conditionnement avec biofloculant (T=15 min)
100	26.45	19.47
150	23.56	19.05

Tableau III.4 : Comparaison entre les siccités trouvés sans et avec biofloculant avec les densités de courant 100 A.m^{-2} et 150 A.m^{-2} et un temps d'électrolyse de 15 min.

III.5.3. L'influence de la dose de biofloculant sur la résistance spécifique :

Les valeurs de résistance spécifique obtenues après la filtration des boues conditionnées par combinaison d'un procédé d'électrocoagulation avec l'ajout des différentes doses de biofloculant (la poudre de cactus), sont présentées dans la figure III.22.

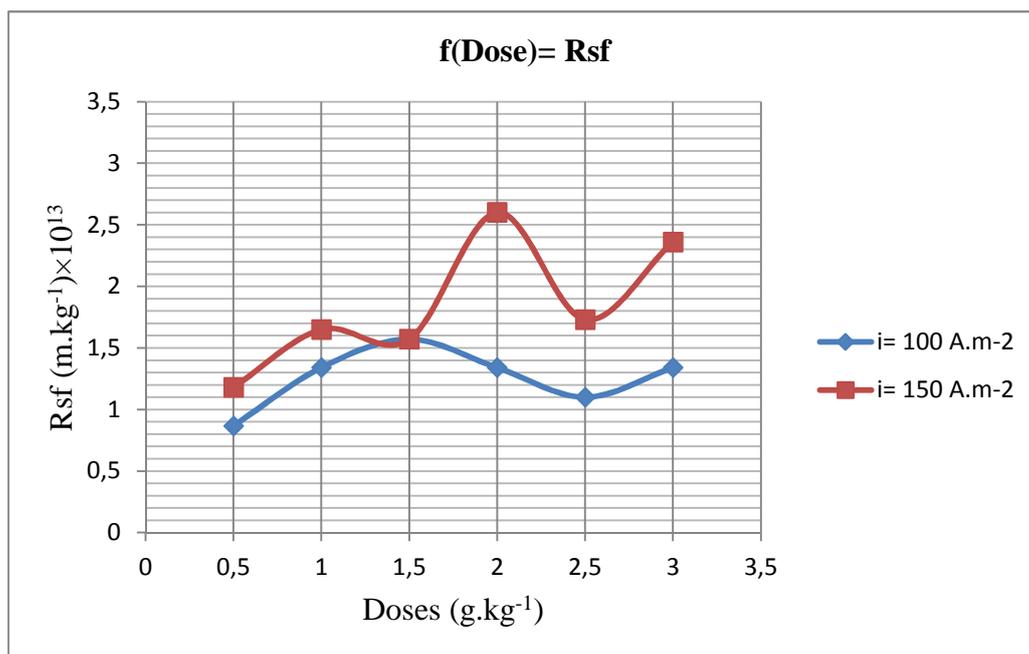


Figure III.22 : L'influence de la dose de biofloculant sur la résistance spécifique.

Discussion :

A partir de la figure III.22, nous remarquons que la résistance spécifique est meilleure avec la dose $0,5 \text{ g.kg}^{-1}$, elle égale $8,49 \times 10^{12} \text{ m.kg}^{-1}$ et $1,15 \times 10^{13} \text{ m.kg}^{-1}$ respectivement pour les densités de courant 100 A.m^{-2} et 150 A.m^{-2} .

En comparant ces résultats par les résultats obtenues après un conditionnement sans biofloculant, on remarque qu'il y a une diminution de la résistance spécifique (tableau III.5)

Densité de courant $i \text{ (A.m}^{-2}\text{)}$	Rsf (m.kg ⁻¹)	
	Conditionnement sans biofloculant (T=15 min)	Conditionnement avec biofloculant (T=15 min)
100	$1,54 \times 10^{13}$	$8,49 \times 10^{12}$
150	$2,16 \times 10^{13}$	$1,15 \times 10^{13}$

Tableau III.5 : Comparaison entre les valeurs de la résistance spécifique trouvées sans et avec biofloculant avec les densités de courant 100 A.m^{-2} et 150 A.m^{-2} et un temps d'électrolyse de 15 min.

III.5.4. L'influence de la dose de biofloculant sur le volume de filtrat recueilli :

Les volumes de filtrat recueilli après filtration des boues conditionnées par combinaison d'un procédé d'électrocoagulation avec l'ajout des différentes doses de biofloculant (la poudre de cactus) en fonction de temps avec les densités 100 et 150 A.m⁻² et un temps d'électrolyse de 15 min, sont présentés dans la figure III.23 et la figure III.24.

) Pour $i = 100 \text{ A.m}^{-2}$:

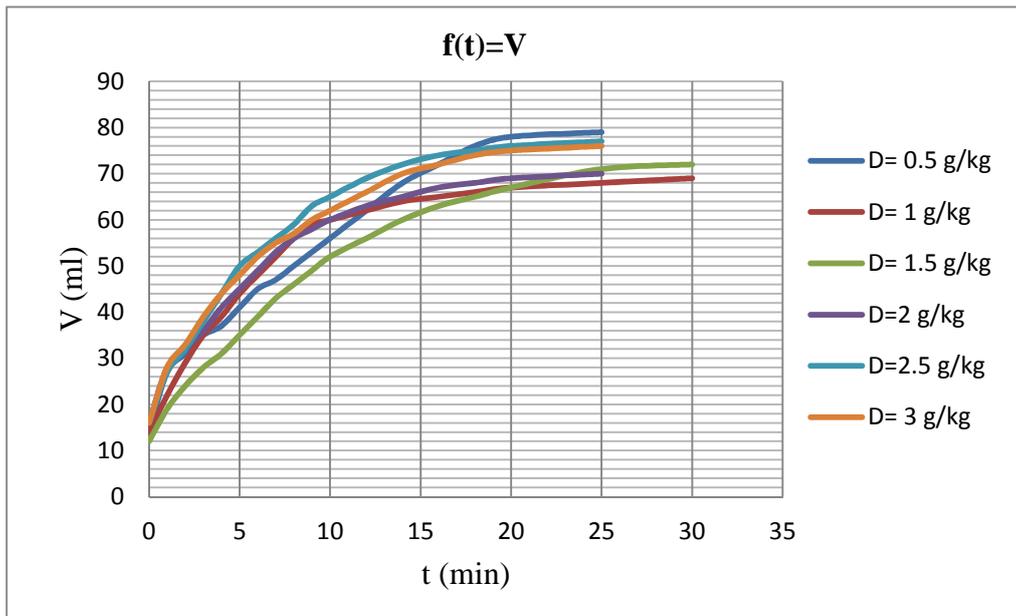


Figure III.23 : L'influence de la dose de biofloculant sur le volume de filtrat recueilli.

) Pour $i = 150 \text{ A.m}^{-2}$:

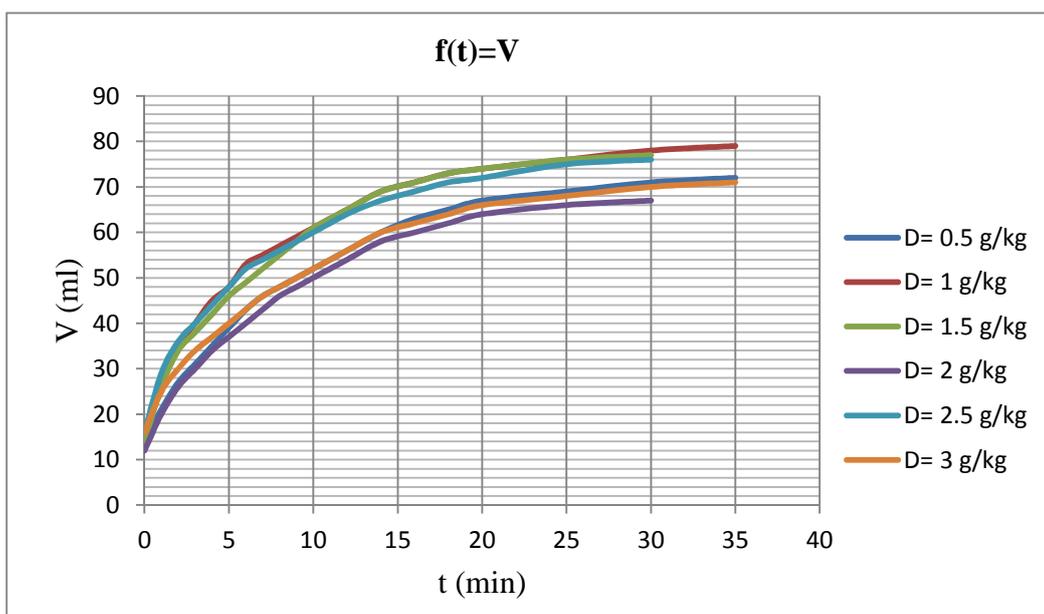


Figure III.24 : L'influence de la dose de biofloculant sur le volume de filtrat recueilli.

Discussion :

D'après les figures (III.23 et III.24) nous remarquons que pour les deux densités de courant 100 A.m^{-2} et 150 A.m^{-2} , le volume de filtrat recueilli augmente en fonction de temps :

) Pour $i = 100 \text{ A.m}^{-2}$:

Le maximum volume de filtrat recueilli égale 79 ml à $t = 25 \text{ min}$, avec la dose 0.5 g.kg^{-1} .

) Pour $i = 150 \text{ A.m}^{-2}$:

Le maximum volume de filtrat recueilli égale 77 ml à $t = 30 \text{ min}$, avec la dose 1 g.kg^{-1} .

❖ Observations durant les essais de l'influence de la dose de biofloculant :

Figure III.25 : Photo obtenue après électrocoagulation avec biofloculant. $i = 100 \text{ A.m}^{-2}$, $T = 15 \text{ min}$ et $D = 0.5 \text{ g/kg}$.

Remarque :

Après électrocoagulation on observe une couleur verdâtre au surface ou il ya l'agglomération des floes, cette couleur indique qu'il ya une activité de biofloculant.

III.6. L'influence de pH :

Selon la littérature, le pH de la solution à traiter peut avoir une influence sur la qualité du traitement physique celui-ci influence la stabilité des différentes espèces d'hydroxydes formées (Asselin, 2007).

D'après les essais précédents, nous avons choisie les valeurs optimales de densités de courant: 100 A.m^{-2} , de temps d'électrolyse : 15 min et la dose de biofloculant : 0.5 g.kg^{-1} .

III.6.1. L'influence de pH sur l'énergie consommée :

Les valeurs de L'énergie consommée en fonction de pH sont données dont la figure III.26.

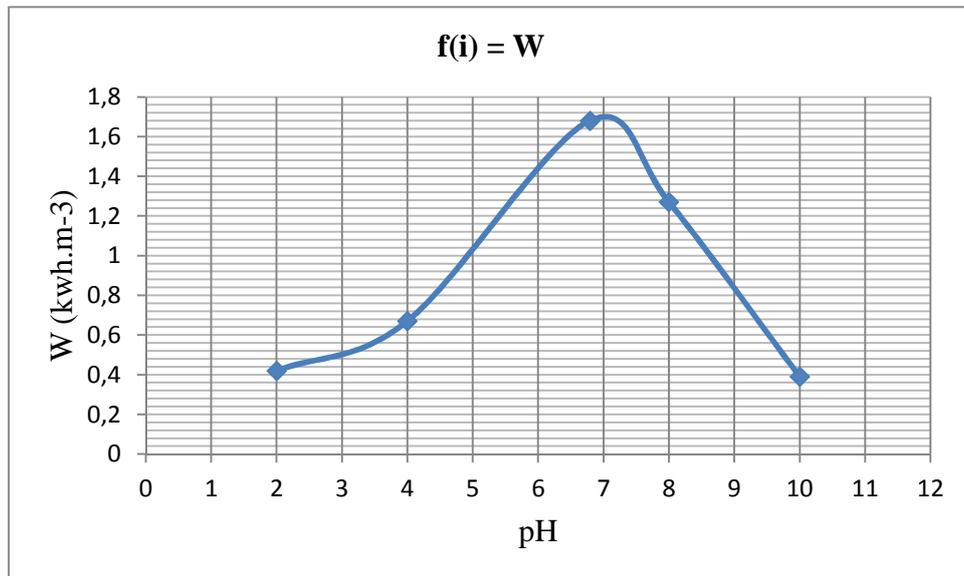


Figure III.26 : L'influence de pH sur l'énergie consommée (W).

Discussion :

La figure III.26, montre que l'énergie consommée augmente de 0.42 kWh.m^{-3} jusqu'à 1.68 kWh.m^{-3} avec des valeurs de pH respectivement de 2 jusqu'à 6.79 (pH de la boue), après elle diminue de 1.68 kWh.m^{-3} jusqu'à 0.39 kWh.m^{-3} avec des valeurs de pH respectivement de 6.79 jusqu'à 10.

III.6.2. L'influence de pH sur la conductivité de la boue :

Les valeurs de conductivité finale de la boue en fonction de pH sont présentées dans la figure III.27.

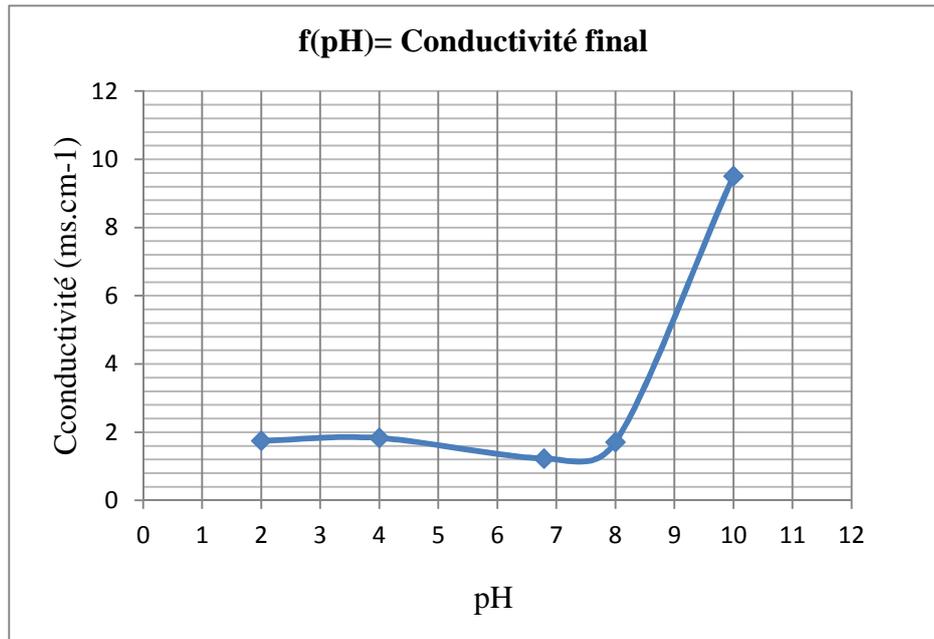


Figure III.27 : L'influence de pH sur la conductivité final de la boue

Discussion :

Selon le graphe les valeurs de la conductivité ont un peu diminuées dans milieu acide de pH de 2 jusqu'à 6.79 (pH de la boue), après elles ont augmentées dans le milieu basique de pH 8 jusqu'à 10.

III.6.3. L'influence de pH sur siccité du gâteau :

Les siccités obtenues après filtration de la boue conditionnée (électrocoagulation + la poudre de cactus) avec différent valeurs de pH, sont présentées dans La figure III.28.

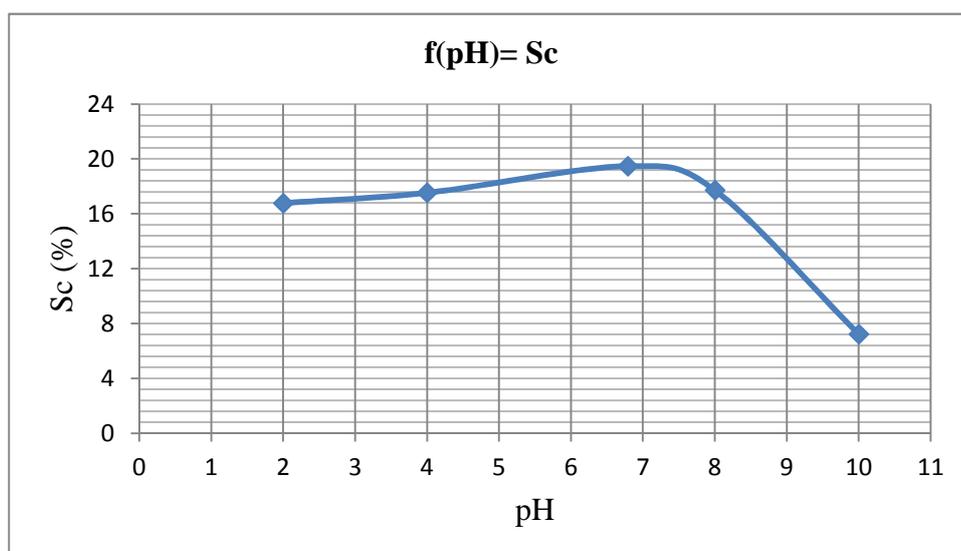


Figure III.28 : L'influence de pH sur la siccité du gâteau (Sc).

Discussion :

A partir de la figure III.28, on remarque que la siccité est faible dans le milieu acide pour les pH 2 et 4 elle égale respectivement 16.77 % et 17.53 %, et pour un pH= 6.79 (pH de la boue) la siccité a un augmenter jusqu'à 19.47 %, après dans le milieu basique pour un pH= 10 la siccité a diminué vers une mauvaise valeur égale 7.21 %.

Dans le milieu acide il ya la présence des ions d'hydrogène H^+ qui sont les responsables de l'acidité, ces ions vont associés avec les électrons produites par la dissolution accélérée de l'électrode de fer et génèrent le gaz d'hydrogène H_2 avec des quantités importante, ce gaz provoque la flottation des floccs. Les ions d'hydrogène H^+ déposent aussi sur la surface des particules colloïdales qui sont chargées négativement pour les neutralisées, mais la quantité importante d'ion cationiques (les ions de fer et d'hydrogène) perturbent le processus de neutralisation, ce qui explique les faibles siccités trouvées 16.77 % et 17.53 %.

Dans le milieu basique il ya la prédominance des ions d'hydroxyde OH^- qui génère des complexes anioniques $Fe(OH)_4^-$ qui sont chargées négativement de même que les particules colloïdales, ce qui implique une répulsion entre les deux, alors ya pas d'agglomération des floccs, et ce qui explique la mauvaise siccité trouvée au pH= 10, $Sc= 7.21$ %.

Dans le milieu neutre il ya autant d'ions hydroxyde OH^- que d'ions hydrogène H^+ , donc il ya la coagulation et la floculation des boues, Alors la siccité est bonne dans ce milieu par rapport aux autres milieux (acide ou basique), $Sc= 19.47$ %.

III.6.4. L'influence de pH sur la résistance spécifique :

Les résistances spécifiques trouvées après filtration de la boue conditionnée (électrocoagulation + la poudre de cactus) avec différent valeurs de pH, sont données dans la Figure III.29.

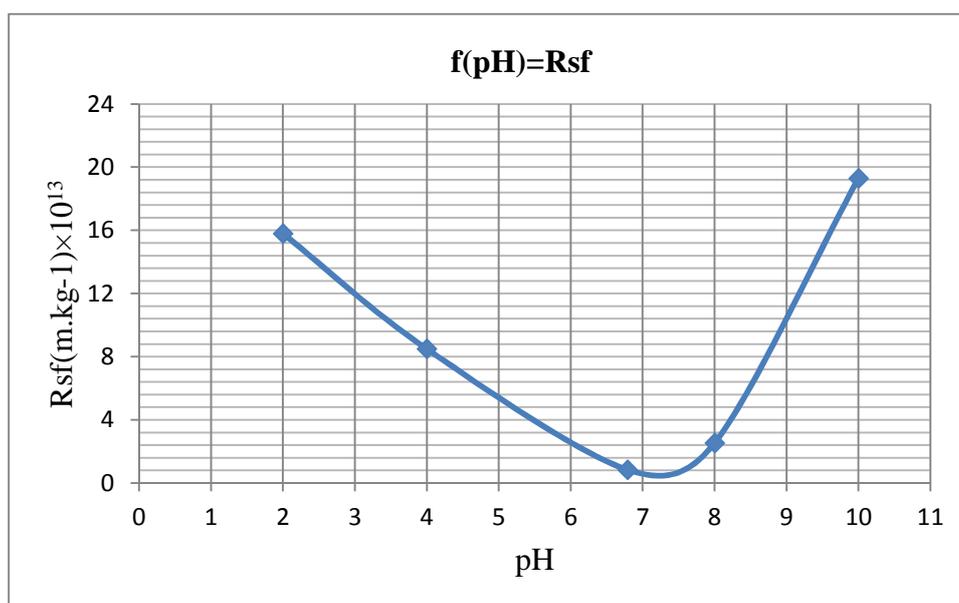


Figure III.29 : L'influence de pH sur la résistance spécifique.

Discussion :

On remarque d'après la Figure III.29 que la résistance spécifique est élevée pour une boue conditionnée avec des pH 2 et 4 elle égale respectivement 1.58×10^{14} m.kg⁻¹ et 8.49×10^{13} m.kg⁻¹, après elle diminue jusqu'à une meilleure valeur de 8.49×10^{12} m.kg⁻¹ pour un pH=6.79, ensuite la résistance spécifique augmente pour un pH= 8 avec une valeur de 2.54×10^{13} m.kg⁻¹ et elle continue à augmenter vers une mauvaise valeur qui égale 1.93×10^{14} m.kg⁻¹.

Dans les milieux acide et basique la boue conditionnée devient imperméable, alors la résistance devient élevée dans le cas de filtration, par contre dans un milieu presque neutre (pH de la boue= 6.79) la boue après conditionnement devient perméable ce qui explique la diminution de la résistance spécifique.

III.6.5. L'influence de pH sur le volume de filtrat recueilli :

Les volumes de filtrat recueilli après filtration des boues conditionnées par électrocoagulation + la poudre de cactus avec différents pH en fonction de temps, sont présentés dans la Figure III.30.

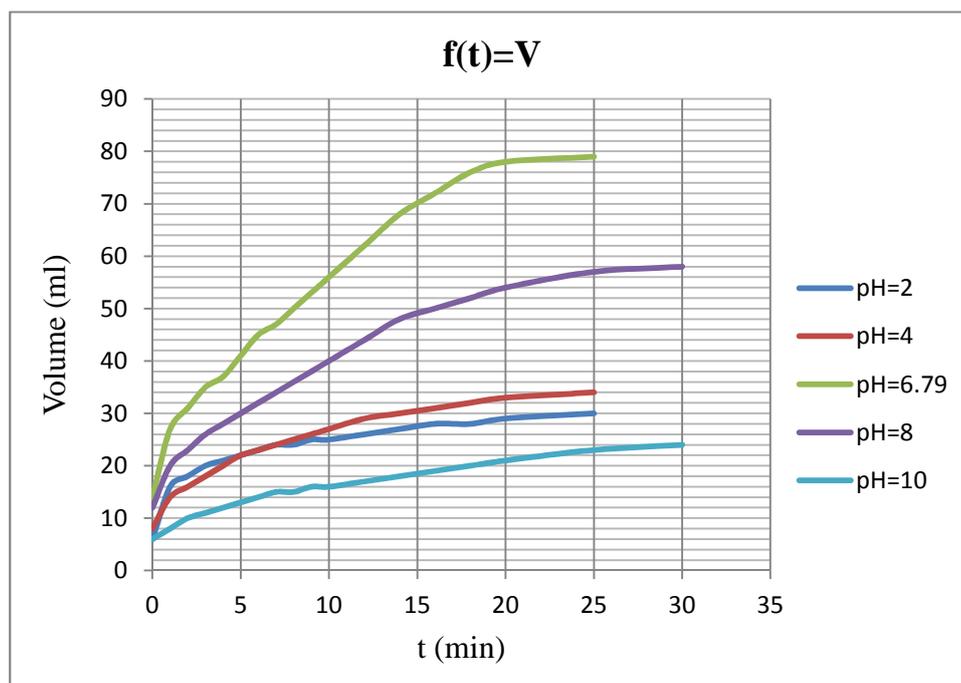


Figure III.30 : L'influence de pH sur le volume de filtrat recueilli.

Discussion :

A partir du graphe, on remarque que le maximum volume de filtrat recueilli est égal 79 ml à 25 min pour un pH de 6.79 qui est le pH de la boue brute, en suite il ya le volume 58 ml à 30 min pour un pH= 8, après on remarque les mauvaises volumes recueillis 30 ml, 34 ml et 24 ml après des durées de temps de 25 min à 30 min respectivement avec des pH=2, pH=4 et pH=10.

Donc nous concluons que pour les milieux acide et basique, la filtration est difficile car il n'y a pas de vide entre les particules pour la circulation de l'eau, et cela expliquer par la mauvaise coagulation-floculation de la boue dans ces deux milieux, surtout dans le milieu basique où le pH= 10 la boue devient plus visqueuse et imperméable.

Pour le pH de la boue brute qui est presque neutre égale 6.79, la filtration est bonne par rapport au d'autre pH testés, parce qu'il ya la coagulation-floculation alors il ya la séparation solide-liquide. Donc le pH de la boue brute est un pH favorable pour le conditionnement de la boue.

❖ Observations durant les essais de l'influence de pH :

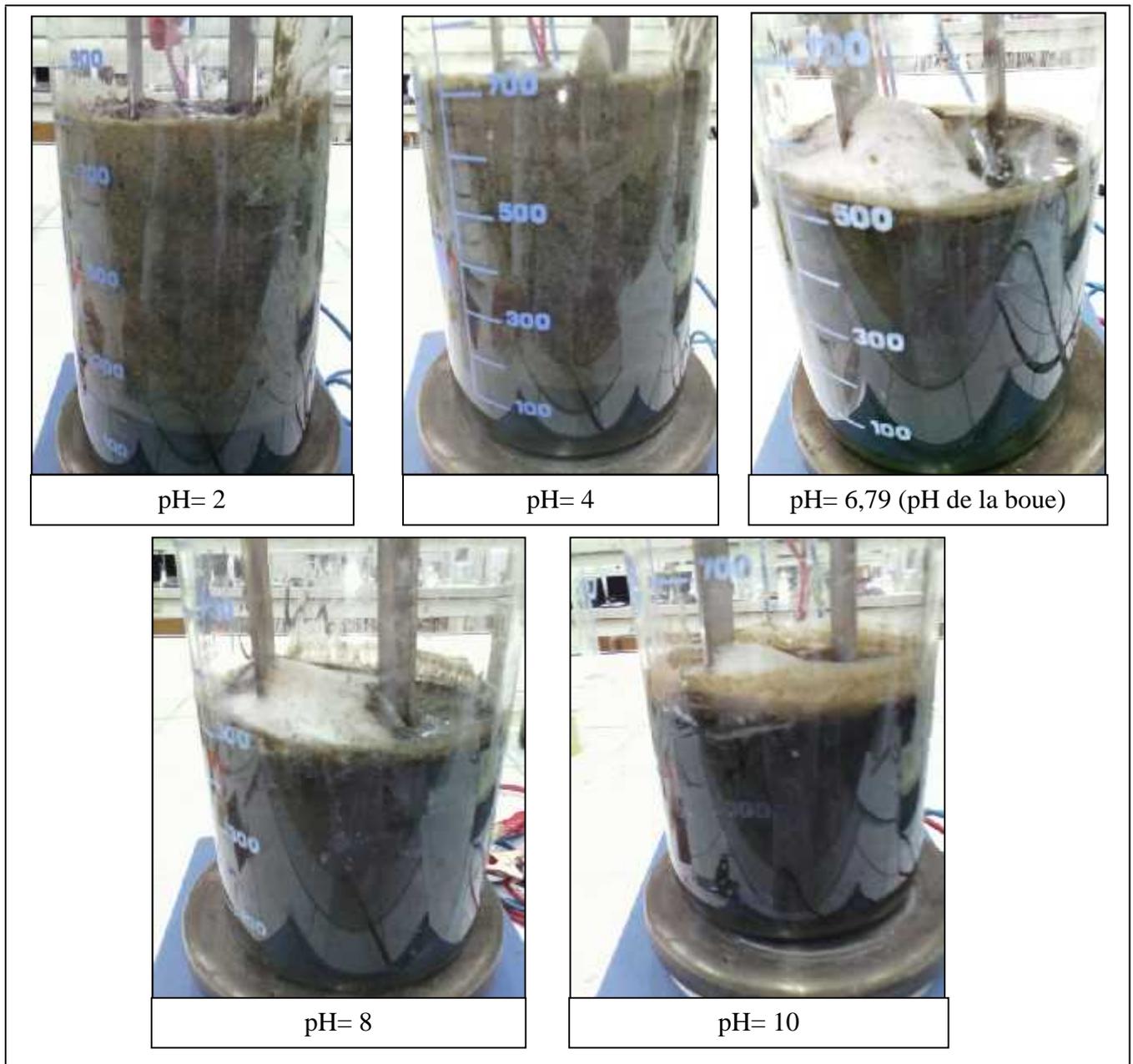


Figure III.31 : Photos des boues obtenues après conditionnement (électrocoagulation + la poudre de cactus) avec différents pH et avec $i= 100 \text{ A.m}^{-2}$, $T= 15 \text{ min}$ et $D= 0.5 \text{ g/kg}$

Remarque :

Pour les pH= 2 et pH= 4, nous remarquons un gonflement de volume de la boue et elle est devenue comme une mousse. Pour le pH= 8 la boue devenue un peu visqueuse et la viscosité augmente pour un pH= 10. Alors la boue devient imperméable ce qui explique la mauvaise filtration de la boue conditionnée.

III.7. Conclusion :

Les travaux expérimentaux décrits dans ce chapitre nous ont permis d'obtenir les résultats suivants :

Les résultats obtenus après l'étude de l'influence de la densité de courant sur le procédé d'électrocoagulation, montrent que les meilleures valeurs de siccité et de résistance spécifique à la filtration $S=26.45\%$ et $r = 9.73 \times 10^{13}$ sont trouvées par l'application de la densité 100 A.m^{-2} avec un temps d'électrolyse de 15 min.

Dans l'étude de l'influence de temps d'électrolyse sur le procédé d'électrocoagulation, nous avons augmenté la durée d'électrolyse pour améliorer le conditionnement, mais d'après les résultats, les siccités et les résistances spécifiques n'ont pas amélioré et nous avons conclu que le meilleur temps d'électrolyse est 15 min.

Les résultats des essais de l'influence de l'ajout de différentes doses de biofloculant qui est la poudre de cactus en combinaison avec l'électrocoagulation, montrent des bons résultats de résistance spécifique $8.49 \times 10^{12} \text{ m.kg}^{-1}$ et $1.15 \times 10^{13} \text{ m.kg}^{-1}$ respectivement pour les densités de courant 100 A.m^{-2} et 150 A.m^{-2} avec l'ajout d'une dose de 0.5 g.kg^{-1} de biofloculant (la poudre de cactus).

Le changement de pH n'a pas amélioré les résultats. Dans les deux milieux acide et basique, nous avons remarqué des valeurs élevées de résistance spécifique, respectivement avec les pH 2 et 4 nous avons trouvée $1.58 \times 10^{14} \text{ m.kg}^{-1}$ et $8.49 \times 10^{13} \text{ m.kg}^{-1}$, et avec les pH 8 et 10 nous avons trouvée $2.54 \times 10^{13} \text{ m.kg}^{-1}$ et $1.93 \times 10^{14} \text{ m.kg}^{-1}$. Et dans le milieu presque neutre pH=6.79 (le pH de la boue brute) nous avons trouvées la meilleure valeur de résistance spécifique qui a été diminuée jusqu'à $8.49 \times 10^{12} \text{ m.kg}^{-1}$.

Finalement, d'après les travaux expérimentaux, les meilleurs résultats ont été obtenus avec une électrocoagulation de 100 A.m^{-2} , un temps d'électrolyse égale 15 min, une dose de 0.5 g.kg^{-1} de la poudre de cactus naturel et un pH de la boue brute, la résistance spécifique a été de $8.49 \times 10^{12} \text{ m.kg}^{-1}$. Cette valeur permet d'obtenir une bonne déshydratation.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Les stations d'épuration génèrent d'énormes quantités de boues. Ces boues doivent être traitées pour réduire leur volume afin de faciliter leur élimination.

Pour une bonne élimination de ces boues, un bon conditionnement donne une bonne déshydratation. Plusieurs recherches ont été faites pour améliorer le conditionnement et pour trouver des procédés alternatifs afin d'éviter les produits chimiques utilisés avec de grandes quantités dans le conditionnement classique.

L'objectif de notre travail était d'améliorer le conditionnement électrochimique et la déshydratation des boues résiduelles d'une station d'épuration des eaux usées (STEP de Beni-Messous wilaya d'Alger) avec l'ajout de la poudre de cactus comme un biofloculant en combinaison avec l'électrocoagulation.

Cette étude nous a permis de montrer l'efficacité du procédé d'électrocoagulation dans le domaine de conditionnement des boues, la siccité a été augmentée de 14.34 % jusqu'à 26.45 % et la résistance spécifique a été diminuée de $9.72 \times 10^{13} \text{ m.kg}^{-1}$ jusqu'à $1.54 \times 10^{13} \text{ m.kg}^{-1}$ par l'application d'une densité de courant de 100 A.m^{-2} avec un temps d'électrolyse de 15 min.

L'étude de la combinaison de l'électrocoagulation avec le biofloculant qui est la poudre de cactus nous a montré de bons résultats de résistance spécifique, qui a été diminuée jusqu'à 8.49×10^{12} avec la dose 0.5 g.kg^{-1} pour une densité de courant 100 A.m^{-2} et un temps d'électrolyse de 15 min.

Les essais de l'influence de pH sur le procédé combiné électrocoagulation + biofloculant (la poudre de cactus) ne nous ont montré aucune amélioration de la résistance spécifique dans les deux milieux acide et basique. La meilleure valeur de résistance spécifique trouvée égale $8.49 \times 10^{12} \text{ m.kg}^{-1}$ avec un $\text{pH} = 6.79$ qui est le pH de la boue brute.

Ce travail nous a montré que les meilleurs résultats ont été obtenus avec une électrocoagulation de 100 A.m^{-2} , un temps d'électrolyse égale 15 min, une dose de 0.5 g.kg^{-1} de la poudre de cactus naturel et un pH de la boue brute 6.79, la résistance spécifique a été de $8.49 \times 10^{12} \text{ m.kg}^{-1}$. Cette valeur permet d'obtenir une bonne déshydratation.

D'après ce travail nous avons conclu que l'utilisation de procédé combiné (l'électrocoagulation + la poudre de cactus) permet d'améliorer la résistance spécifique à la filtration, et pour vérifier et assurer les résultats de ce travail, il faut faire d'autres recherches et d'autre étude.

Les cladodes de cactus sont donc une alternative possible aux produits chimiques. Plusieurs recherches ont montré l'efficacité du cactus en combinaison avec l'électrocoagulation. Il faut approfondir dans ce domaine et améliorer ce procédé naturel qui est disponible et ne représente aucun risque et aucune toxicité.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

Abid A., Zouhri A. et Ider A. (2009). Utilisation d'un nouveau bio-floculant extrait de cactus marocain dans le traitement des rejets chargés de chrome (VI) par le procédé de coagulation floculation. *Afrique science*, 05(3), p 25 – 35.

Abid A., Zouhri A., Ider A. et Kholtei S. (2009). Valorisation d'un nouveau bio floculant (extrait de cactus) dans le traitement physico-chimique des rejets liquides chargés en cuivre, en zinc et en matière en suspension. *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 12 N°2, p 321 – 330.

Abuzaid J.S., bukhari A.A. et Al-Hamouz Z.M. (2000). Ground water coagulation using soluble stainless steel electrodes. *Adv. Environ. Res.*, 6, p 325-333.

Alinsafi A., Khemis M., Pons M. N., Leclerc J. P., Benhammou A. et Nejmeddine A. (2005). Electro-coagulation of reactive textile dyes and textile wastewater. *Chem. Eng. Proc.*, 44, p 461-470.

Amorce (2012). Association au carrefour des collectivités territoriales et des professionnels, Enquête, Gestion des boues de stations d'épuration, Co traitement avec les déchets ménagers, Série Technique DT 52. 9p.

Andrade-Montemayora M., Cordova-Torresb A.V., García-Gascac T. et Kawasb J.R. (2011). Alternative foods for small ruminants in semiarid zones, the case of Mesquite (*Prosopis laevigata* spp.) and Nopal (*Opuntia* spp.), *Small Ruminant Research*, 98, p 83–92.

Arba M. (2009). Le cactus, *Opuntia*, une espèce fruitière et fourragère pour une agriculture durable au Maroc. Symposium International, Agriculture durable en région Méditerranéenne (AGDUMED), Rabat, Maroc, p 14-16.

Asselin M. (2007). Utilisation de l'électrocoagulation dans le traitement des eaux usées industrielles chargées en matière organique, mémoire pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc), Université du Québec, 82p, 44p, 92p

Ayadi M. A., Abdelmaksoud W., Ennouri M. et Attia H. (2009). Cladodes from *Opuntia ficus indica* as a source of dietary fiber: Effect on dough characteristics and cake making, . *Industrial Crops and Products*, 30 (1), p 40–47.

Ayne O. Calvo–Arriaga, Arturo Hernández–Montes, Cecilia B. Peña–Valdivia, Joel Corrales–García¹ et Eleazar Aguirre–Mandujano (2010). Preference mapping and rheological properties of four prickly pear (*Opuntia* spp.) Cultivars *J. PACD*, 12, p 127-142.

Barbera et coll. (1992). In: **Mulas, M. & Mulas, G. (2004).** Potentialités d'utilisation stratégique des plantes des genres *Atriplex* et *Opuntia* dans la lutte contre la désertification. Université des études de Sassari. Groupe de recherche sur la désertification. Short and Medium -Term Priority Environmental Action Program (SMAP), 112p.

- Barbera G. (1995).** History, economic and agroecological importance of cactus. In : Barbera, G., Inglese, P., & Pimienta-Barrios, P. (Eds.), *Agroecology, cultivation and uses of cactus pear*. Eds FAO plant production and protection, 132p.
- Bayramoglu M., Eyvaz M. et Kobya M. (2007).** Treatment of the textile wastewater electrocoagulation: economical evaluation, *Chem. Eng. J.*, 128, p 155–161.
- Bechac J. P., Boutn P., Mercier B., Nuer P. (1984).** *Traitement des eaux usées*. Edition Eyrolles. Paris. 229p.
- Belbahloul M., Zouhri A. et Anouar A. (2014).** Cactus *Opuntia Ficus Indica*: une solution contre la pollution métallique et les Matières En Suspension, *J. Mater. Environ. Sci.*, 5 (S2), p 2381-2384.
- Bennajah M. (2007).** *Traitement des rejets industriels liquide par électrocoagulation/électroflotation en réacteur airlift*. Thèse pour obtenir le titre de docteur de l'institut national polytechnique de Toulouse. École doctorale, Spécialité : Génie des procédés et de l'environnement. Toulouse, France. 10p
- Bensalem H., Nefzaoui A. et Bensalem L. (2002).** Supplementation of *Acacia cyanophylla* Lindl foliage-based diets with barley or shrubs from arid areas (*Opuntia ficus indica* f. *inermis*) and *Atriplex nummularia* L.) on growth and digestibility in lambs. *Animal Feed Sciences and Technology*, 96, p 15-30.
- Betancourt-Dominguez M. A. , Hernandez-Péretz T., Garcia-Saucedo P., Cruz-Hernandez A. et Parades Lopez O. (2006).** Physico-Chemical Changes in Cladodes (Nopalitos) From Cultivated And Wild Cacti (*Opuntia* spp.) *Plant Foods for Human Nutrition*, 61, p 115-119.
- Boumediene M. (2013).** Bilan de suivi des performances de fonctionnement d'une station d'épuration a boues activées : Cas de la step ain el houtz. Mémoire de fin d'étude. Université Abou Bekr Belkaid. Algérie. 11p.
- Braka N., Ouzaouit K., Abdenouri M. et Makhfouk M. E. (2013).** Dried prickly pear cactus (*Opuntia ficus indica*) cladodes as a low-cost and eco-friendly biosorbent for dyes removal from aqueous solutions. *Journal of Taiwan institute of chemical Engineers*, 44, p 52-60.
- Chen G. (2004).** Electrocoagulation technologie wastewater treatment. *Sep. purif. Technol.*, p 38-41
- Chan-Yang Yin (2010).** Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. Elsevier, *Process Biochemistry*, Volume 45, Issue 9, p 1437–1444
- Cantwell M. (1991).** Quality and postharvest physiology of napolitos and tunas. *Proc. Second annual Texas prickly pear conferences* Mc Allen. Texas, p 50-66.

Cardenas A., Goycoolea F. (1997). Rheology solution of mucilage (*Opuntia ficus indica*). Memories VII and V International Congress on Knowledge and Use of Nopal. Monterrey, Mexico, pp. 171-172.

Cardenas Medellín M. L., Serna Saldívar S .O., et Velazco de la Garza J. (1998). Effect of ingestion of raw and cooked prickly pear (*Opuntia ficus indica*) in the growth and profile of total cholesterol, lipoprotein and glucose in blood of rats, Archives Latin American Nutrition, 48, p 316-323.

Cankin E.V. et Belevstev N.A. (1985). Electrochemical treatment of industrial wastewater, Effl. Water treat. Jour. 25, p 243-247.

Chen X.,Chen G.,Yue (2000). Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation, P.L. Journale: Separation and purification technology, Edition Elsevier. vol 19: p 65-76.

Corrales-Joel Garcia Saenz et Carmen (2006). Agroindustrial utilization of cactus in Carmen Saenz .Bulletin Services Agricoles Des FAO N°162, p.51 – 69.

Dagot C. et Laurent J. (2014). Module d’enseignement ASTEP, L’Université Virtuelle Environnement et Développement durable (UVED), Version 1.0, 101p et 167p.

Daneshvar N., Ashassi-Sokhabi H. et Tizpar A. (2003). Decolorization of orange by electrocoagulation method. Sep. Purif. Technol., 31, p 153-162.

Dean W. R. J. et Milton S. J. (2000). Directed dispersal of *Opuntia* species in the Karoo, South Africa: are crows the responsible agents. Journal of Arid Environments, 45, p 305-314.

Debillemont P. (1996). Eaux résiduaires : Traitements biologiques et physicochimiques, Récents progrès en génie des procédés, 10, p 129-136.

Degrémont (1989). Mémento technique de l’eau. 9^{ème} édition, Tome I. Technique et documentation. Lavoisier. Paris. 72, 370, 124, 197, 135p.

Degrémont (1989). Mémento technique de l’eau. 9^{ème} édition, Tome II. Technique et documentation. Lavoisier. Paris. 920, 932, 1309, 1309, 944, 959, 966p.

Degrémont (2005). Mémento technique de l’eau. 2^{ème} édition, Tome I. Technique et documentation. Lavoisier. Paris. 932, 1255p.

Derbal M. (2016). Préparation et caractérisation d’un bifloculant à partir de la poudre de *Opuntia ficus indica* (application dans le conditionnement des boues issues de la Step de beni-messous. Mémoire de fin d’étude. Blida, Algérie, p 47-50

Diaz A. (1999). A preliminary evaluation of turbidity removal by natural coagulants indigenous to Venezuela. Birmingham University. Royaume-Uni.

Erre P.,Chessa I., Nieddu G. et Jones P.G. (2009). Diversity and spatial distribution of *Opuntia* spp. in the Mediterranean Basin. Journal of Arid Environments, 73, p 1058-1066.

- Felker P., Rodriguez S., Casoliba R.M., Filippini R., Medina D. et Zapata R. (2005).** Comparison of *Opuntia ficus indica* varieties of Mexican and Argentine origin for fruit yield and quality in Argentina. *Journal of Arid Environments*, 60, p 405-422.
- Feurang J. M., Konarski P., Zou D., Stintzing F. C., Zou C. (2006).** Nutritional and medical use of cactus pear (*Opuntia* spp.) cladodes and fruits. *Frontiers in bioscience*. 11, p 2574-2589.
- Gaid A. (1984).** Epuration biologique des eaux usées urbaines, Tome I. Edition Office des publications universitaires. Alger. 86,87p.
- Gaid A. (1984).** Epuration biologique des eaux usées urbaines, Tome II. Edition Office des publications universitaires. Alger. 130, 131, 145, 181p.
- Galati E. M., Monforte M. T., Tripodo, M. M., d'Aquino A. et Mondello M. R. (2001).** Antiulcer activity of *Opuntia ficus indica* (L.) Mill. (Cactaceae): ultrastructural study, *J. of Ethnopharmacology*, 76, 1, P 1-9
- Galati, E. M., Tripodo M. M., Trovato A., d'Aquino, A., Monforte M. T. (2002).** Biological effect *Opuntia ficus indica* (L.) Mill. waste matter. note I: diuretic activity, *Journal of Ethnopharmacology*, 79, p 17–21
- Galati E.M., Mondello M. R., Monforte M. T., Galluzzo M., Miceli N. et Tripodo MM. (2003).** Effect of *Opuntia ficus indica* (L.) Mill. cladodes in the wound healing process. *J PACD* 5: 1–16.
- Galati E. M., Tripodo M. M., Trovato A., d'Aquino A., Monforte M. T. (2003).** Biological activity of *Opuntia ficus indica* (L.) MILL. cladodes, note II: effect on experimental hypercholesterolemia, *Pharmaceutical Biology*, 41 (3), p 175-179.
- Galati E. M., Monforte M. T., Miceli1 N., Mondello M. R., Taviano M. F., Galluzzo M. et Tripodo M. M. (2007).** *Opuntia ficus indica* (L.) Mill. Mucilages show Cytoprotective Effect on Gastric Mucosa in Rat *Phytother. Res.*, 21, p 344–346.
- Hadj-Kouider S. (2011).** Caractérisation et traitement des boues d'épuration de la région d'Alger. Thèse de magistère, université Saad Dahlab Blida, Département de chimie industrielle, Algérie.
- Hadj Sadok T., Aid F., Bellal M., Maria S. et Abdul H. (2008),** Composition chimique des jeunes cladodes d'*Opuntia ficus indica* et possibilité de valorisation alimentaire. *Agricultura, agricultural practice and science journal*, Vol 65, No 1-2
- Holt P. K., Barton G. W., Wark M. et Mitchell C. A. (1999).** Electrocoagulation as a wastewater treatment. The third annual Australian environmental engineering research Event, p 23-26.
- Holt P. K. (2002).** Electrocoagulation: unraveling and synthesizing the mechanisms behind a water treatment process. Thésés in chemical Engineering. University of Sydney, Sydney. Australia

Holt P. K., Barton G. W., Wark M. et Mitchell C. A. (2002). A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation, colloids and surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects, 211, p 233-248.

Ibanez J.G., Singh M.H. et Szafrá Z. (1998). Laboratory experiments on electrochemical remediation of the environment. Part 4: color removal of simulated wastewater by electrocoagulation- electroflotation. J. Chem. Educ., 75 (8), p 1040-1041.

Jindong Z., Fangue Z., Youhong L. et Hong Y. (2006). A preliminary study on cactus as coagulant in water treatment, vol 41.

Kabas O., Ormerzi A. et Akinci I. (2006). Physical properties of cactus pear (*Opuntia ficus indica* L.) grown wild in Turkey. Journal of Food Engineering, 73, p 198-202.

Kannan N., Karthikeyan G. et Tamilselvan N. (2006). Comparison of treatment potential of electrocoagulation of distillery effluent with and without activated Areca catechu nut carbon, J. Hazard. Mater., 137, p 1803-1809.

Kartez R. (1996). Nature. Le livre de Paris hachette imprimé en Italie par G.GANA.

Kazi T. et Virupakshi A. (2013). Treatment of tannery wastewater using natural coagulants. Int j Innov Res. Sci. Eng. Technol., 2, p 4061-8.

Kim T. H., Park C., Shin E.-B., Kim S. (2002). Decolorization of disperse and reactive dyes by continuous electrocoagulation process, Desalination, 150, p 165–175.

Kobyá M., Can O.T. et Bayramoglu M. (2003). Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminium electrodes. J. Hazard. Mater., B100, 163-178.

Kobyá M., Hiz H., Senturk E., Aydiner C. et Deminbas E. (2006). Treatment of potato chips manufacturing wastewater by electrocoagulation . Desalination. 190, p 201-211.

Larue O., Vorobiev E. (2003). Electrocoagulation of wastewaters. Inter. j. min. proc., 71, 1.

Larue O., Vorobiev E., Vu C. et Durand B. (2003). Electrocoagulation and coagulation by iron of latex particles in aqueous suspensions. Sep. Purif. Technol., 31, p 177-192.

Lee J. C., Kim H. R., Jang Y. S. (2002). Antioxidant properties of an ethanol extract of the stem of *Opuntia ficus indica* var.saboten. J Agric Food Chem 50: 6490–6496.

Le Houerou H. N. (1996). The role of cacti (*Opuntia* spp.) in erosion control, land reclamation, rehabilitation and agricultural development in the Mediterranean Basin. Journal of Arid Environments, 33, p 135-159.

Lotito V., Mininni G., Spinosa L. (1990). Models of sewage sludge conditioning - Water Science & Technology. Vol 22(12): p 163-172.

Mollah M. Y. A., Schennach R., Paraga J. R. et Cocke D. L. (2001). Electrocoagulation (EC) - Science and applications, Journal of Hazardous Materials, B 84, p 29-41.

Mollah M. Y. A., Morkovsky P., Gomes J. A. G., Kesmez M., Parga J. R., Cocke D. L. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation, *J. Hazard. Mater.*, 114, p 199–210.

Moreno-cassillas H. A., Cocke D. L., Gomes J. A. G., Morkovsky P., Praga J. R. et Peterson E. (2007). Electrocoagulation mechanism for COD removal, *Separation and Purification Technology*, 56, p 204-211.

Mulas M. (1993). Medicinal properties and yield possibilities of the prickly pear (*Opuntia* spp.) in the Mediterranean Environment. *Acta Horticulturae*, 331, p 79–84.

Mulas M. et Mulas G. (2004). Potentialités d'utilisation stratégique des plantes des genres *Atriplex* et *Opuntia* dans la lutte contre la désertification. Short and Medium-Term Priority Environmental Action Programme (SMAP). Université des études de Sassari. Italie. 112 p.

Nazareno M. A. et González E. (2008). Antioxydant properties of cactus products. *Cactusnet*, Issue 11, p 18-28.

Ncibi S., Ben Othman M., kacha A., Naceur Krifi M., et Zourgui L., (2008). *Opuntia ficus indica* extract protects against chlorpyrifos-induced damage on mice liver. *Food and chemical toxicology*, 46 (2), p 797–802.

Nefzaoui A. (1996). Nutritive value of spinless cactus (*Opuntia ficus indica*) and *Atriplex* (*Atriplex nummarie*) based diets for sheep. Proceedings of the workshop on native and exotic fodder shrubs in arids and semi-arids zones, vol. 2.

Nefzaoui A. et Bensalem H. (1998). In: **Mulas M. et Mulas G. (2004).** Potentialités d'utilisation stratégique des plantes des genres *Atriplex* et *Opuntia* dans la lutte contre la désertification. Short and Medium-Term Priority Environmental Action Programme (SMAP). Université des études de SASSAR. 112 p.

Nefzaoui A. et Bensalem H. (2002). Cacti: efficient tool for rangeland rehabilitation, drought mitigation and to combat desertification. Proceedings of the fourth international congress on Cactus pear and Cochineal. Hamamet, Tunisia, p 22-28.

Nefzaoui A., Ketata H. et Mohammed El Mourid M. (2012). Agricultural Technological and Institutional Innovations for Enhanced Adaptation to Environmental Change in North Africa, (ICARDA) North Africa Program, Tunis, Tunisia. www.intechopen.com.

Nerd A. et Mizrahi Y. (1994). Effect of nitrogen fertilization and organ removal on rebudding in *Opuntia ficus indica* (L.). *Scientia Horticulturae*, 59, p 115-122.

Nobel P.S, (1988), in Barbera G., Inglese P. et Pimienta-Barrios P., (Eds.), Agro ecology, cultivation and uses of cactus pear (pp. 36–45). *FAO Plant Production and Protection*, Paper: 132.

Nobel S. P., Cavalier J. et Andrade J. (1992). Mucilage in cacti its apoplasmic capacitance associated solutes, and influence on tissue water relation, *J. of Experimental Botany*, 43 (250), pp. 641–642.

Orwa, C.; Mutua, A.; Kindt, R.; Jamnadass, R.; Anthony, S. (2009). Agroforestry Database: a tree reference and selection guide version 4.0. World Agroforestry Centre, Kenya.

Persin F. et Rumeau M. (1989). Le traitement électrochimique des eaux et effluents. Tribune de l'Eau, vol 42, p 45-56.

Picard T. Mazet M. (2000). Contribution à l'étude des réactions aux électrodes en vue de l'application à l'électrocoagulation, thèse de doctorat, Université de Limoges, Limoges, FRANCE.

Rodriguez-Felix A. et Cantwell M. (1988). Developmental changes in composition and quality of prickly pear cactus cladodes (nopalitos). Plant foods for human nutrition, 38 (1), p 83-93.

Rovel J.M. (1947). Epuration électrique des eaux résiduaires des industries agroalimentaires, industries alimentaires et agricoles, 91, p 1243-1248.

Rubach S. et Saur i.F. (1997). Onshore testing of produced waster by electrocoagulation. Filt. Sep., Octobre, p: 877-882.

Rumeau M. (1989). Méthodes électrolytiques de traitement des effluent- première partie. Electro-coagulation, flottation, détoxification, chloration. L'eau et industrie, p 47-51.

Saenz C., Vasquez M., Trumper S. et Fluxá C. (1992). Extraction and chemical composition of mucilage prickly pear (*Opuntia ficus indica*). Actes: II International Congress of tuna and cochineal. Santiago, Chile, pp. 93-96.

Saenz C. (1998). Cladodes: A source of dietary fiber. Journal of the Professional Association for Cactus Development, 2: p 117–123.

Saenz C. (2002). Cactus pear fruit and cladodes: a source of functional components for foods. Acta Hort, 581, p 253-263.

Saenz-Hernandez C., Corrales Garcia J. Aquino-Perez in Park S. Nobel. (2002). Cacti: biology and uses ed., University of California Press Berkeley, California, p 229-232.

Saenz C., Sepulveda E. et Matsuhira B. (2004). *Opuntia* spp mucilage's: a functional component with industrial perspectives Journal of Arid Environments, 57, p 275–290.

Saenz C. (2006). Agroindustrial utilization of cactus in Carmen Saenz .Bulletin Services Agricoles Des FAO N°162, p 107-111.

Sakr F., Sennaoui A., Elouardi M., Tamimi M. et Assabbane A. (2014). Étude de l'adsorption du Bleu de Méthylène sur un biomatériau à base de Cactus (Adsorption study of Methylene Blue on biomaterial using cactus), J. Mater. Environ. Sci.,6 (2), p 397-406.

Saleem M., Ja Kim, H., Kyun Han C., Jin C. et Sup Lee Y. (2006). Secondary metabolites from *Opuntia ficus indica* var. saboten. Phytochemistry, 67, p 1390-1394.

Sengil I. A. et Ozacar M. (2006). Treatment of dairy wastewaters by electrocoagulation using mild steel electrodes. J. Haz. Mater. 137, p 1197-1205.

Sepúlveda, E. C., Sáenz, C. Y., Vallejos M. I. (2003) Comportement rhéologique du nectar fabriqué à partir d'hydrocolloïde: de nopales : effet du traitement thermique. pp 269-272. In: Actes. Congrès IX et VII Conférence Internationale sur les connaissances et l'utilisation du Nopal. Zacatecas. Mexique.

Sharma R., Kaur A., Kaur M. (2012). Pharmacological actions of *Opuntia ficus-indica*: A review journal of applied pharmaceutical Science, 02 (07), p 15-18.

Snyman, H.A. (2006). A greenhouse study of root dynamics of cactus pears, *Opuntia ficus indica* and *O. robusta* . Journal of Arid Environments, 65, p 529-542.

Stintzing F. C. et Carle R. (2005). Cactus stems (*Opuntia* spp.): A review on their chemistry, technology, and uses - Review Mol. Nutr. Food Res., 49, p 175 – 194.

Sudzuki F., Muñoz C. et Berger H. (1993). La culture du figuier de barbarie (Poire de cactus) in Carmen Saenz. Bulletin Des Services Agricoles de la FAO N°162, p 7-24.

Sudzuki Hills (1995). Anatomy and morphology in Barbera G et al . J (eds), Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear, FAO. Plant product and protect Division Paper 132, Rome (Italy), p 28-35.

Telli S. M. (2013). Etude sur la valorisation par séchage solaire Des boues d'épuration des Eaux urbaines – cas de la station d'Office Nationale d'Assainissement (ONA)-. Mémoire de fin d'étude. Tlemcen. Algérie. 37p

Tir M. (2009). Utilisation des techniques électrochimiques dans le traitement des émulsions hydrocarbure / eau. Thèse de doctorat en génie des procédés, Université M'hamed Bougara, Boumerdés. Algérie. 36, 38, 52, 58, 59, 60p.

Trachtenberg S. et Mayer A. M. (1981). Composition and properties of *Opuntia ficus indica* mucilage. Phytochemistry, 20, pp. 2665–2668

Trachtenberg S. et Mayer A M. (1982). Mucilage cells, calcium oxalate crystals and soluble calcium in *Opuntia ficus indica*. Annals of Botany, 50, pp 549–557.

Trongo M. D. (1999). Mise au point du fonctionnement d'un réacteur pilote à anode en lit fluidisé pour les traitements des effluents industriels par oxydation électrochimique, Thèse présentée à la Faculté des études supérieures et de la recherche pour l'obtention du grade de Maîtrise en études de l'environnement, université de Moncton, Canada. 14p.

Valiron F. (1994). Mémento du gestionnaire de l'alimentation en eau et de l'assainissement, assainissement urbain. Tome II. Cemagraf. Paris. 155p.

Varnero T. et García de Cortázar V., In Saézn -Hernandez C. (2006). Agroindustrial utilization of cactus in Carmen Saenz .Bulletin Services Agricoles Des FAO N°162, Roma, p 113-117.

Vik E.A., Carlson D.A., Eikum A.S. et E.T. Glessing (1984). Electrocoagulation of potable water. Water Res.,18, p : 1355-1360.

Xinhua X. et Xiangfeng Z. (2004). Treatment of refractory oily wastewater by electrocoagulation process. *Chemosphere*, 56, p 889-894.

Xueming C., Guohua C., et Po Lock Y. (2000). Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. *Sep. Purif. Technol.*, 19, p 65-76.

Yang C. L., Dluhy R. (2002). Electrochemical generation of aluminium sorbent for fluoride adsorption, *J. Hazard. Mater.*, 94, p 239.

Yousuf M., Mollah A., Schennach R., Parga J.R et Cocke L. (2001). Electrocoagulation (EC), science and applications, *J. Hazard. Mater.*, 84, p 29-41.

Zongo I. (2009). Etude expérimentale et théorique du procédé d'électrocoagulation : application au traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie. Thèse pour obtenir le titre de docteur de l'institut national polytechnique de Lorraine, Ecole supérieure des industries chimiques. Nancy, France. 19, 22p

Sites web :

[a]: Centre d'hygiène et de salubrité publique 2009. Définitions et principe de fonctionnement d'une station d'épuration. <http://www.hygiene-publique.gov.pf/spip.php?article61>.

[b]: Centre d'hygiène et salubrité publique 2009. Principe général de fonctionnement d'une station d'épuration à procédé biologique. <http://www.hygiene-publique.gov.pf/spip.php?article61>.

[c]: Strasbourg.eu, eurométropole 2011. environnement et qualité de vie, Eau et assainissement, L'assainissement des eaux usées, Comment fonctionne une station d'épuration ?. <http://www.strasbourg.eu/environnement-qualite-de-vie/eau-assainissement/eaux-usees/comment-fonctionne-une-station-d-epuration>.

[d]: Wikiterritorial 29/11/2012. Eaux usées : Station d'épuration des eaux usées urbaines, les procédés biologiques de traitement, environnement et espaces verts, Par AUBRIL-CARHON Laure, Ingénieur environnement. <http://www.wikiterritorial.cnfpt.fr/xwiki/wiki/econnaissances/view/NotionsCles/LeseauxuseesStationdepuratationdeseauxuseesurbaineslesprocedesbiologiquesdetraitement>.

[e]: Le centre d'information sur l'eau 26/09/2013. Les eaux usées, Le traitement des eaux usées. <http://www.cieau.com/les-eaux-usees/le-traitements-des-eaux-usees>.

[f]: Davie wastewater traitement plant
<http://www6.miami.edu/studorgs/umfwea/davie/DavieWWTP.htm>

[g]: Degremont 2009. Savoir faire, Traitement des eaux municipales, Traitement des boues, Épaississement et déshydratation. <http://www.degremont.fr/fr/savoir-faire/eaux-municipales/traitement-des-boues/epaississement-et-deshydratation/procedes/>.

[h] : **Direct industry 2016.** Le salon online de l'industrie, Filtre et Séparateur, Filtre pour conditions sévères, FLSmith Dorr-Oliver Eimco. http://www.directindustry.fr/prod/flsmidth-dorr-oliver-eimco-gmbh/product-62016-554813.html#product-item_1488901.

[i] : **K-pack systems 2015.** Private limited, products filter press <http://www.kpack.in/items/12/1/Filter%20Press#>.

[j] : **Alibaba.com 2016.** Matériel de filtration industrielle, Déshydratation des boues filtre à bande de machine à presse. <https://french.alibaba.com/product-detail/sludge-dewatering-machine-belt-filter-press-814361549.html>.

[k] : **Exapro Blog 08/07/2009,** Déshydratation: fonctionnement d'une décanteuse centrifugeuse. <http://www.acheter-vendre-machines.fr/2009/07/fonctionnement-decanteuse.html>.

[L] : **Wikipédia 2016.** Diagrammes de Pourbaix. https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_Pourbaix.

[M] : **Elicriso 2016.** Fico d'india (Opuntia). http://www.elicriso.it/it/come_coltivare/ficodindia/

Annexes

Annexe 1 : Matériels utilisés



Générateur de courant



Pompe à vide



l'appareil CRISON



Turbidimètre



Acide sulfurique H_2SO_4



Hydroxyde de sodium $NaOH$

Annexe 2 : Calcul de la Résistance spécifique à la filtration de la boue stabilisée

Type de la boue	Boue stabilisée aérobie
Concentration de la boue (g/l)	46.25
Concentration en (%)	4.31

- Filtration :

Pression (bar)	0.5
Surface de filtration (cm ²) (Diamètre = 9 cm)	63.58
Volume de boue à filtrer (ml)	100

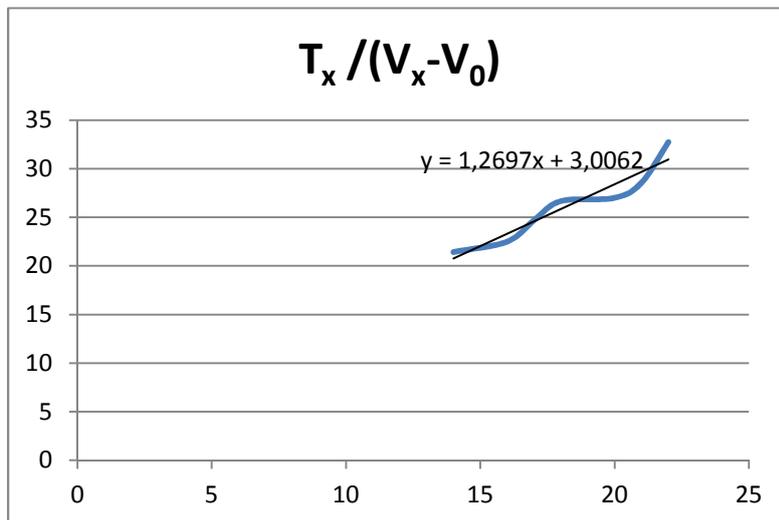
- Caractéristiques du gâteau :

Consistance	humide
Epaisseur (mm)	4

Détermination de la siccité du gâteau après filtration :

Masse du papier filtre (g)	0.60
Masse du gâteau humide + papier filtre (g)	28.84
Masse du gâteau sèche (à 105 °C) + papier filtre(g)	4.65
Siccité du gâteau (%)	14.34

- Calcul de la résistance spécifique de la boue stabilisée sans conditionnement :



Temps T _x (min) (T ₀ = 0)	Volume V _x (ml) (V ₀ = 10)	V= (V _x - V ₀) (ml)	T _x /(V _x - V ₀) (s.ml ⁻¹)
60	12	2	30
120	16	6	20
180	20	10	18
240	22	12	20
300	24	14	21.42
360	26	16	22.5
420	27	17	24.7
480	28	18	26.66
540	30	20	27
600	31	21	28.57
720	32	22	32.72
840	34	24	35
960	36	26	36.92
1080	38	28	38.57
1200	40	30	40
1500	44	34	44.11
1800	48	38	47.36
2100	50	40	52.5
2400	56	46	52.17
2700	58	48	56.25
3000	60	50	60

a : pente de la droite linéaire (s.m ⁻⁶)	1.26×10^{12}
P : pression de filtration (pa)	49×10^3
S : surface de filtration (m ²)	6.35×10^{-3}
η : viscosité dynamique du filtrat (pa.s)	11×10^{-4}
C : concentration de la boue (kg.m ⁻³)	46.54
$r_{0.5} = (2aPS^2)/(C)$	9.72×10^{13}

Annexe 3 : Préparation des doses de biofloculant (la poudre de cactus)

Au début on prépare une solution de 6g.l^{-1} de la poudre de cactus.

$0.6\text{g} \longrightarrow 100\text{ml}$

Après Pour 0.5 g. kg^{-1} :

$$D = \frac{1000 \times \text{Volume de biofloculant ajouté (ml)} \times \text{Concentration de la solution mère}(\text{g.l}^{-1})}{\text{Volume de l'échantillon(ml)} \times \text{sa teneur en MSg.l}^{-1}}$$

D= dose de biofloculant g.kg^{-1}

$$0.5\text{ g. kg}^{-1} = \frac{1 \times \text{v} \times \text{d} \text{ b} \quad \text{a} \quad \text{é} \times \text{é}}{5 \times 4.5}$$

$$\text{Volume de biofloculant ajouté} = \frac{0.5 \times 500 \times 46.54}{1000 \times 6}$$

Volume de biofloculant ajouté = 1.93 ml

On fait le même calcul pour les autres doses: 1g. kg^{-1} , 1.5g. kg^{-1} , 2g. kg^{-1} , 2.5g. kg^{-1} , 3g. kg^{-1}