

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université SAÁD DAHLAB –BLIDA 1
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Biologie et Physiologie Cellulaire



Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Hydrobiologie Marine et Continentale

Option : Eau, Environnement et Santé Publique

Thème

ETUDE COMPARATIVE DES EAUX TRAITEES PAR BOUES ACTIVEES (STEP BARAKI) ET ELECTROCOAGULATION DANS L'IRRIGATION

Présenté par :

ABDOUCHE Yasmine

Et

MOUNGLA Zineb

Devant le jury :

M^r GRANDI M.

M.A.A.

U.S.D.B.

Président

M^{me} BELMESKINE H.

M.C.B.

U.S.D.B.

Examinatrice

M^{me} BOUDJEMA N.

M.C.B.

U.S.D.B.

Promotrice

2016-2017



Dédicace

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut, tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect et la reconnaissance aussi, c'est tout simplement que je dédie ce mémoire à...

Mes parents

Abdelhakim et Hassina pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.

Mon très cher papa qui m'a encouragé, ma source de force pour tenir jusqu'au bout, l'homme qui m'a toujours soutenu et cru en moi. Sa chaleur paternelle, m'a souvent été d'un grand réconfort. Je ne saurais le remercier assez pour tout ce qu'il a fait pour moi.

Ma maman la personne qui m'importe le plus dans ce monde. Elle a toujours été mon modèle et ma source d'inspiration. Ces conseils, sa présence et sa tendresse m'ont été et me seront toujours indispensables. Je lui suis donc éternellement reconnaissante.

Mes très chères sœurs

Meriem ; Mounia et Fedoua qui ont toujours été à mes côtés pour me soutenir.

Mon oncle

Farid, mon conseiller, qui m'a assisté dans les moments difficiles et m'a pris doucement par la main pour traverser ensemble des épreuves pénibles. Je te suis très reconnaissante, et je ne te remercierai jamais assez pour ton amabilité, ta générosité, ton aide précieuse.

A toute la famille Abdouche et

Merbouni.

Abdouche Yasmine.





Dédicace

Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie que je dédie ce travail à...

Mes très chers parents

Mohamed et Rachida que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments, pour leur patience illimitée, leurs encouragements continus en témoin de mon profond amour et respect pour leurs grands sacrifices.

A ma mère...

Qui m'a donnée la vie la tendresse et le courage pour réussir. Tous ce que je peux t'offrir ne pourrais exprimer l'amour et la reconnaissance que je te porte je te remercie pour tes sacrifices et pour l'affection dont tu m'a toujours entourée.

A mon père...

« L'épaulé solide, l'œil attentif compréhensif et la personne la plus digne de mon estime et mon respect, que dieu te préserve et te procure santé et longue vie.

*A mes chères sœurs **Khadija** et **Sarah** et mes frères **Abd El Karim** et **Ayoub**, pour leur grand amour et leur soutien qu'ils trouvent ici l'expression de ma haute gratitude.*

A mes très chers amis pour leurs encouragements.

*A toute la famille **Moungla** et*

Bendouda.

MOUINGLA Zineb



Remerciements

Nous remercions Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a accordé pour la réalisation de ce travail.

Nous exprimons nos profondes gratitudee et nos sincères remerciements pour notre encadreur Madame BOUDJEMA N. maître de conférences classe B à l'USDB, pour sa confiance, son soutien et ses encouragements. Son sens d'appréciation scientifique, sa rigueur pour le travail bien fait, ses suggestions pertinentes ont permis à mener à bien ce mémoire. Merci pour tous ce que vous avez apporté aux écologistes, femmes de terrain que nous sommes devenues.

Nous remercions vivement Monsieur GRANDI M. maitre-assistant classe A à l'USDB, pour avoir accepté la présidence du jury. Qu'il nous soit permis de lui témoigner notre profond respect pour ses enseignements, sa sagesse et surtout son écoute et sa compréhension. Un homme qui n'a jamais lésiné de son temps pour orienter et conseiller tous ses étudiants sans exception.

Nous tenons à remercier Madame BELMESKINE H. maitre de conférences classe B à l'USDB, pour avoir accepté de juger ce travail. Symbole de l'enseignante dévouée, son amabilité et sa sagesse sans exéplaire. Qu'elle trouve ici l'expression de notre profond respect.

Nous ne pourrions également oublier de remercier tous ceux qu'ils nous ont facilité la tâche sur le terrain en l'occurrence :

Monsieur MAMERI N. professeur à l'ENP d'Alger pour nous avoir permis de travailler au (laboratoire d'URIE) au niveau du département de génie d'environnement, et pour nous avoir conseiller et orienter au cours de la réalisation de ce travail. Ainsi que tout le groupe de chercheurs qu'ils ne nous ont jamais privés d'informations.

Nos remerciements les plus vifs à Monsieur RIADH, Monsieur TOUMERT I. et Monsieur ERRAHMANI T. du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger pour leur aide précieuse et leur soutien sans égal.

Remerciements

Nos sincères remerciements vont à Madame GACEM, DG de l'Institut Technique des Cultures Maraichères et Industrielles de Staouali pour nous avoir accueillies au sein de l'institut. Nous remercions également Monsieur ATIF M. directeur de la station expérimentale de l'ITCMI pour son suivi et son orientation.

Nous adressons nos plus chaleureux remerciements à Madame MIMI technicien au niveau de l'ITCMI pour ses conseils, sa compétence, sa patience, son enthousiasme et son aide qui a été un vrai exemple de gentillesse et de tendresse.

Nos remerciements vont également à tout le personnel de l'ITCMI pour leur aide et orientations.

En fin nous tenons à remercier tous nos professeurs de Licence, Master I et Master II pour tous leurs efforts et pour tous les meilleurs moments que nous avons passé avec vous.

Vraiment nous vous remercions énormément, et que Dieu vous protège, bénisse, et nous prions Dieu de vous donner la santé et le bien-être.

.

Résumé

Devant la rareté de la ressource en eau conventionnelle, l'Algérie est appelée aujourd'hui à valoriser les eaux usées traitées qui représente une source non négligeable en irrigation.

L'objectif assigné à notre étude est axé sur l'efficacité de traitement des eaux usées par deux procédés : Electrocoagulation (EC) et boues activées de la station d'épuration de Baraki. L'étude comparative des deux traitements a montré que les taux d'abattelements de MES, DCO et DBO5 sont respectivement de l'ordre de 96,47 %, 94,7 %, 97,2 % par le procédé d'EC et de 94,57 %, 93,4 % et 97 % par boues activées. Les résultats obtenus des deux traitements présentent des rendements épuratoires satisfaisants. Cette étude a montré que le procédé d'EC a éliminé 97 % à 99 % des bactéries dénombrées (Coliformes Totaux (CT), coliforme thermo-tolérants, *Escherichia coli* et Streptocoques fécaux) contre 89 % à 96 % par boues activées. Cependant un abattement total des germes pathogènes du genre *Staphylococcus* est atteint avec les deux procédés de traitement. L'élimination des éléments traces métalliques (ETM) est entre 72,65 % et 99,7 % par EC et de 82 % à 97 % par boues activées. Une différence significative est déterminée par l'analyse de variance (ANOVA) sur l'efficacité des deux traitements avec un coefficient de corrélation de $R^2=0,99$ et $p<0,05$.

La réutilisation des eaux usées traitées (EUT) dans l'irrigation de culture de tomate *Lycopersicon esculentum* a montré un bon rendement de fruits pour les plants irrigués les eaux traitées par électrocoagulation et par boues activées avec un pourcentage de 80 % et 79% respectivement . Les résultats des paramètres microbiologiques des fruits révèlent une absence totale des CT, thermo tolérants, *E. coli*, *Salmonella* et *Staphylococcus*. Pour l'analyses toxicologique, l'irrigation avec les EUT n'a pas influencé sur la teneur en ETM, de ce fait les fruits de tomates sont de bonnes qualité microbiologique et toxicologique.

Mots clés : Electrocoagulation, Boues activées, Abattement, Tomate *Lycopersicon esculentum*, ETM, Bactéries.

Summary

Faced with the scarcity of conventional water resources, Algeria should today, value the treated wastewater, which represents a non-negligible source of irrigation.

The objective assigned to our study focusses on the efficiency of wastewater treatment by two processes: The electrocoagulation (EC) and the Activated Sludge of Baraki wastewater treatment plant.

The comparative study of the two treatments showed that the abatement rates of (suspended matter) TSS, COD and BOD5 are respectively around 96,47 %, 94,7 %, 97,2 % by the EC process and of 94,57 %, 93,4 % and 97% by the activated sludge .The obtained results of the two treatments present satisfactory purifying returns .

This study shows that the EC process has eliminated 97% to 99% of the enumerated bacteria (Total coliforms (TC), thermotolerant coliforms, *Escherichia Coli* and *fecal streptococcus*) against 89 % to 96 % by the activated sludge.

However, a total abatement of the pathogenic germs of the genus *Staphylococcus* is reached with the two treatment processes. The elimination of Metallic Elements Traces (MET) is between 75,65 % and 99,7 % by EC and 82 % to 97 % by activated sludge. A significant difference is determined by the analysis of variance (ANOVA) about the efficiency of the two treatments with a correlation coefficient of $R^2 = 0.99$ and $P < 0.05$.

The re-use of treated wastewater (TWW) in the irrigation of *Lycopersion esculentum* tomato crop showed a good fruit yield for the two treatments (the activated sludge and the EC process) with a percentage of 79 % to 80 % respectively.

The results of microbiological parameters reveal a total absence of TC, thermotolerants, *E.coli*, *salmonella* and *Staphylococcus*. As far as the toxicological analysis is concerned, the use of TWW in irrigation has not affected the content in MET; consequently, the tomato fruits are of a good microbiological and toxicological quality.

Key words: Electrocoagulation, Activated sludge, Abatement, *Lycopersicon esculentum* tomato, MET, Bacteria.

ملخص

أمام ندرة مصادر المياه المألوفة، تصبح الجزائر اليوم، مجبرة على تامين المياه المعالجة التي تمثل مصدر هام في مجال الري.

يتمحور هدف هذه الدراسة على فعالية معالجة المياه المستعملة بطريقتين: الطين النشط والتخثير الكهربائي في محطة تصفية المياه ببراقى. دراسة مقارنة بين طريقتي المعالجة أظهرت أن نسبة تخفيف كل من المادة المعلقة، طلب الأكسجين الكيميائي (ط.أ.ك) و طلب أكسجين بيوكيميائي (ط.أ.ب) تقدر بـ : 96,47 % 97,2 % 94,7 % , % بالنسبة لطريقة التخثير الكهربائي و % 93,4 % , % 94,57 % و % 97 % بالنسبة لطريقة الطين النشط . حسب النتائج المتحصل عليها يعتبر مردود التصفية بالنسبة للطريقتين مرضيا. هذه الدراسة أظهرت تأثيرا مرتفعا جدا بطريقة التخثير الكهربائي على مجموع البكتريا المدروسة بنسبة تتراوح بين 97 و 99 % مقابل 96,3 و 99,7 % بالنسبة للتصفية باستخدام الطين النشط، هذه النتيجة تعني تخفيف كلي للجراثيم المسببة للأمراض لكل من طريقتي التصفية. بالنسبة لآثار المعادن، تتراوح نسبة التخلص منها بين 72,65 % و % 99,7 % بالنسبة لطريقة التخثير الكهربائي و 82 إلى 97 % بالنسبة لطريقة الطين النشط. فرق كبير تم تحديده من خلال تحليل التباين (انوفا) على طريقتي المعالجة مع معامل ارتباط $R^2=0,99$ و $p < 0,05$.

تم استعمال المياه المعالجة (بطريقة الطين النشط و بطريقة التخثير الكهربائي) في ري محصول الطماطم وذلك لتناسبها مع المعايير الجزائرية. نسبة المردودية كانت جيدة بنسبة 79 % إلى 80 % على التوالي ، كما أن نتائج المعايير الميكروبيولوجية الخاصة بالثمار تبين غياب كلي لكل من السالمونيلا و ستافيلوكوكوس و الإشريكية القولونية والكوليفورم الكلي والجزئي. بالنسبة لتحاليل الخاصة بالسمية، لم يؤثر الري بالمياه المستعملة على آثار المعادن المحتواة مقارنة باستعمال المياه الصافية للري، مما يعني أن ثمار الطماطم ذات جودة جيدة سواء من ناحية الخصائص الميكروبيولوجية أو السمية.

الكلمات المفتاحية: التخثير الكهربائي، الطين النشط، تخفيف، الطماطم، آثار المعادن، البكتريا.

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| Introduction | 1 |
| <i>Chapitre I. Partie Bibliographique</i> | |
| I.1. Généralités sur les eaux usées | 3 |
| I.1.1. Définition d'une eau usée | 3 |
| I.1.2. Origines des eaux usées | 3 |
| I.1.2.1. Eaux domestiques | 3 |
| I.1.2.2. Eaux usées industrielles | 3 |
| I.1.2.3. Eaux agricoles..... | 3 |
| I.1.2.4. Eaux pluviales..... | 4 |
| I.1.3. Types de la pollution | 4 |
| I.1.3.1. Pollution physique | 4 |
| I.1.3.2. Pollution chimique..... | 4 |
| I.1.3.3. Pollution microbiologique | 5 |
| I.1.4. Traitement des eaux usées | 5 |
| I.1.4.1. Traitement des eaux usées dans une station d'épuration | 5 |
| I.1.4.2. Traitement des eaux usées par le procédé d'électrocoagulation..... | 9 |
| I.1.5. Réutilisation des eaux usées et épurées en irrigation | 11 |
| I.1.5.1. Dans le monde | 11 |
| I.1.5.2. En Algérie | 12 |
| I.1.6. Réglementations de la réutilisation des eaux usées traitées en irrigation | 13 |
| I.1.6.1. Normes européennes (OMS) | 13 |
| I.1.6.2. Normes Algériennes | 13 |

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| I.2. Généralités sur la culture de tomate..... | 13 |
| I.2.1. Origine de la tomate..... | 13 |
| I.2.2. Classification de la tomate..... | 13 |
| I.2.2.1. Classification botanique..... | 13 |
| I.2.2.2. Classification génétique..... | 14 |
| I.2.2.3. Classification variétal selon le mode de croissance..... | 14 |
| I.2.3. Exigences édapho-climatiques de la tomate | 15 |
| I.2.4. Valeurs nutritionnelles de la tomate | 16 |

Chapitre II. Matériels et Méthodes

| | |
|---|-----------|
| II. Matériels et méthodes..... | 17 |
| II.1. Protocole expérimental..... | 17 |
| II.1.1. Configuration du réacteur utilisé (électrocoagulation)..... | 17 |
| II.1.2. Site de prélèvement (STEP de Berraki)..... | 18 |
| II.1.3. Réalisation de la culture..... | 19 |
| II.1.4. Plan de l'expérience..... | 20 |
| II.1.5. Traitement des plantes..... | 21 |
| II.2. Prélèvement et Echantillonnage..... | 22 |
| II.2.1. Eau..... | 22 |
| II.2.2. Sol..... | 22 |
| II.2.3. Plante et fruit..... | 23 |
| II.3. Méthodes d'analyses..... | 23 |
| II.3.1. Analyses physiques et chimiques..... | 23 |

SOMMAIRE

| | |
|--|-----------|
| II.3.1.1. Potentiel hydrogène (pH) | 24 |
| II.3.1.2. Conductivité électrique (CE) | 25 |
| II.3.1.3. Matières en suspension (MES) (NFT 90-105) | 25 |
| II.3.1.4. Demande Chimique en Oxygène (DCO) (ISO 6060)..... | 26 |
| II.3.1.5. Demande biologique en oxygène (DBO ₅) (MA.315-DBO 1.1) | 27 |
| II.3.2. Analyse toxicologique (ETM) | 28 |
| II.3.2.1. Principe de fonctionnement d'un spectromètre ED-XRF | 28 |
| II.3.2.2. Principe de la lyophilisation | 28 |
| II.3.3. Analyses microbiologiques..... | 30 |
| II.3.3.1. Recherche et dénombrement des coliformes totaux, thermotolérants et <i>Escherichia coli</i> (NF T 90-411) | 31 |
| II.3.3.2. Recherche des <i>Staphylococcus</i> (NF en ISO 6888-3)..... | 32 |
| II.3.3.3. Recherche et dénombrement des Streptocoques fécaux (ISO 7899-1) | 34 |
| II.3.3.4. Recherche des <i>Vibrions</i> (ISO /TS 21872-1)..... | 34 |
| II.3.3.5. recherche des <i>salmonellas</i> (ISO/TS 6579-2)..... | 34 |
| II.3.3.6. Recherche et dénombrement des Levures et Moisissures (NF V08-059) 34 | |
| II.3.4. Etude statistique | 35 |

Chapitre III. Résultats et discussion

| | |
|---|-----------|
| III. Résultats et discussion..... | 36 |
| III.1. Traitement des eaux usées | 36 |
| III.1.1. Caractérisation des eaux brutes | 36 |
| III.1.2. Caractérisation des eaux traitées..... | 37 |
| III.1.2.1. Paramètres physico-chimiques et toxicologiques | 37 |
| III.1.2.2. Paramètres microbiologiques | 46 |

SOMMAIRE

| | |
|--|-----------|
| III.1.3.Rendement d'abattement des paramètres de pollution par EC et BA.. | 49 |
| III.1.4.Etude statistique..... | 51 |
| III.2 Culture et irrigation..... | 52 |
| III.2.1. Caractérisation du sol utilisé | 52 |
| III.2.2. Après plantation et irrigation | 53 |
| III.2.2.1. Paramètres physiques | 53 |
| III.2.2.2.Eléments traces métalliques (ETM) | 55 |
| III.2.2.3. Paramètres microbiologiques | 56 |
| III.2.3.Impact de l'irrigation sur la culture | 58 |
| III.2.3.1.Analyses microbiologiques | 58 |
| III.2.3.2.Dosage des ETM | 58 |
| III.2.3.3.Analyse des paramètres agronomiques des plants de tomates | 61 |
| Conclusion | 64 |

SOMMAIRE

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 01 : Avantages et inconvénients du procédé d'EC | 11 |
| Tableau 02 : Exemples de réutilisation des eaux usées dans le monde | 12 |
| Tableau 03 : Exigences climatiques et édaphiques pour la culture de tomate..... | 15 |
| Tableau 04 : Table de composition nutritionnelle de tomate..... | 16 |
| Tableau 05 : Granulométrie du substrat utilisé..... | 19 |
| Tableau 06 : Traitements phytosanitaires | 21 |
| Tableau 07 : Echantillonnage des eaux à analyser (ETba) eau traitée par boues activées, (ETec) eau traitée par électrocoagulation, (EP) eau de puits | 22 |
| Tableau 08 : échantillonnage du sol..... | 23 |
| Tableau 09 : Echantillonnage de la tomate | 23 |
| Tableau 10 : Paramètres physico-chimiques et toxicologiques (ETM) mesurés..... | 24 |
| Tableau 11 : Caractérisation des eaux brutes (EB)..... | 36 |
| Tableau 12 : Paramètres physicochimiques et toxicologiques (ETM) des eaux traitées par électrocoagulation et par boues activées | 38 |
| Tableau 13 : Paramètres microbiologiques recherchés dans les eaux brutes (EB), les eaux traitées par électrocoagulation (ETec) et par boues activées (ETba)..... | 46 |
| Tableau 14 : Rendement du traitement des eaux usées par le procédé d'électrocoagulation et celui de boues activées | 50 |
| Tableau 15 : Caractéristique physiques microbiologiques et toxicologiques du sol utilisé | 52 |
| Tableau 16 : Caractéristiques de la récolte du fruit <i>Lycopersicon esculentum</i> | 63 |

Liste des tableaux

Annexe I

Tableau 17 : liste des cultures pouvant être irriguées avec des eaux épurées
(**Journal Officiel de la République Algérienne n°41 du 15 juillet 2012**)

Tableau 18 : directive concernant la qualité microbiologique des eaux usées en
agriculture (**OMS 1989**)

Tableau 19 : Paramètres physico – chimique (**Journal Officiel de la République
Algérienne n°41 du 15 juillet 2012**)

Tableau 20 : paramètres microbiologiques (**Journal Officiel de la République
Algérienne n°41 du 15 juillet 2012**)

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 01 : Principe d'un bassin de décantation | 7 |
| Figure 02 : Principe du procédé de traitement par boues activées | 8 |
| Figure 03 : Principe de l'électrocoagulation | 10 |
| Figure 04 : Principaux lieux de réutilisation des eaux usées dans le monde | 11 |
| Figure 05 : Dispositif expérimental de traitement par l'électrocoagulation. (1) générateur de courant, (2) cellule électrolyte, (3) électrodes en Fe, (4) barreau magnétique, (5) agitateur magnétique | 18 |
| Figure 06 : Station d'épuration de Baraki (Alger) | 19 |
| Figure 07 : Dispositif expérimental d'une culture maraichère tomate : <i>Lycopersicon esculentum</i> au niveau de l'ITCMI. (T1 : traitement par EP ; T2 : traitement par EC ; T3 : traitement par BA)..... | 21 |
| Figure 08 : Préparation des échantillons de la tomate par la séparation des deux matrices, la peau (A) et la chaire (B) | 29 |
| Figure 09 : Préparation des pastilles (A) broyage des échantillons après séchage, (B) remplissage des pastilles pour l'analyse..... | 30 |
| Figure 10 : Préparation des dilutions pour les analyses microbiologiques | 31 |
| Figure 11 : Variations de pH après traitement par les deux procédés, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer (T=25°C, pH initial=7,78, distance entre les électrodes=5 cm, intensité =3 A) ; (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EB) : eau brute..... | 39 |
| Figure 12 : Variations de la conductivité électrique après traitement par les deux procédés, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer (T 25°C, CE initiale = 1542, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité =3 A) ; (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EB) : eau brutes | 40 |

Liste des figures

- Figure 13 :** Variations de Matières En Suspension après traitement par les deux procédés (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer (T 25°C, MES initiales = 783, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité = 3 A) ; (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EB) : eaux brutes41
- Figure 14 :** Etapes de la formation de mousse et de floccs au cours du traitement par le procédé d'électrocoagulation. (a) Flottation de mousse, (b) Décantation des floccs, (c) Filtration de l'eau traitée42
- Figure 15 :** Variations de la DCO après traitement par les deux procédés, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25°C, DCO initiale = 1059, distance entre les électrodes= 5 cm, intensité=3 A) ; (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EB) : eaux brutes.....43
- Figure 16 :** Variations de la DBO₅ après traitement par les deux procédés, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25°C, DBO₅ initiale = 780, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité=3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EB) : eaux brutes.....44
- Figure 17 :** Variations des ETM après traitement par les deux procédés, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation (T 25°C, distance entre les électrodes en fer= 5 cm, intensité=3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EB) : eaux brutes45
- Figure 18 :** Variations des CT après traitement par les deux procédés, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25°C, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité= 3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EB) : eaux brutes47
- Figure 19 :** Variations des Streptocoques fécaux après traitement par les deux procédés, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25°C, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité =3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EB) : eaux brutes49
- Figure 20 :** Analyse de composante principale des paramètres physico-chimique des deux traitements (électrocoagulation et boues activées) 51

Liste des figures

- Figure 21 :** (A) Ordination des variables abiotiques (pH, CE, MES, DCO, DBO5), (B) Efficacité du traitement (électrocoagulation et boues activées) sur la réduction des paramètres de pollution..... 51
- Figure 22 :** Cinétique du pH en fonction du temps (pendant 90jours) au cours de l'irrigation par les trois types d'eau, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25°C, pH initial=7,78, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité =3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EP) : eau de puits 54
- Figure 23 :** Cinétique de la CE en fonction du temps (pendant 90jours) au cours de l'irrigation par les trois types d'eau, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25°C, CE initiale= 1542, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité =3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EP) : eau de puits 54
- Figure 24 :** Variations des ETM dans le sol après traitement par les deux procédés, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25°C, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité =3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EP) : eau de puits ; (ST) : sol témoin..... 55
- Figure 25 :** Cinétique des ETM (A : Cr ; B : Zn ; C : Pb) en fonction du temps (pendant 90jours) au cours de l'irrigation par les trois types d'eau, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25°C, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité =3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EP) : eau de puits..... 56
- Figure 26 :** Cinétique des CT en fonction du temps (pendant 90jours) au cours de l'irrigation par les trois types d'eau, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25°C, HT :, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité =3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EP) : eau de puits 57
- Figure 27 :** Cinétique des *E.coli* en fonction du temps (pendant 90 jours) au cours de l'irrigation par les trois types d'eau, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25°C, HT distance entre les électrodes = 5 cm, intensité =3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EP) : eau de puits 58

Liste des figures

- Figure 28 :** Variations des ETM dans les racines au cours de l'irrigation par les trois types d'eau, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25°C, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité =3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EP) : eau de puits 59
- Figure 29 :** Variations des ETM dans les feuilles au cours de l'irrigation par les trois types d'eau, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25°C, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité =3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EP) : eau de puits 60
- Figure 30 :** Variations des ETM dans les fruits (A : chair ; B : peau) au cours de l'irrigation par les trois types d'eau, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25°C, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité =3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EP) : eau de puits 61
- Figure 31 :** Cinétique des paramètres de croissances des plants (A : hauteur ; B : diamètre) au cours de l'irrigation par les trois types d'eau, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25°C, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité =3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EP) : eau de puits 62
- Figure 32 :** Taille de la tomate des trois traitements. (A) fruit irrigué par les eaux usées traitées par les boues activées de la station de Baraki, (B) eau traitée par électrocoagulation, (C) eau de puits 63

Liste des abréviations

ACP : Analyse des Composantes Principales.

ANOVA : Analysis Of Variance.

BA : Boues Activées.

CE : Conductivité Electrique.

CF : Coliformes Fécaux.

CFU : Colony forming units.

COMP : Comparateur.

CRNA : Centre de Recherche Nucléaire d'Algérie.

CSHPF : Conseil supérieur d'hygiène publique de France.

CT : Coliformes Totaux.

DBO : Demande Biologique en Oxygène.

DCO : Demande Chimique en Oxygène.

DPD : Diéthyl-p-Phénylène-Diamine.

EB : Eau Brute.

EC : électrocoagulation.

ED-XRF : Energy Dispersive X-Ray Fluorescence.

EP : Eau de Puits.

EPA : Eau Peptonée Alcaline.

ETba : Eau Traitée par Boues Activées.

ETec : Eau Traitée par Electrocoagulation.

ETM : Eléments Traces Métalliques

EUT : Eau Usée Traitée.

Liste des abréviations

FAO : Food and Agriculture Organization of the United Nations, (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture).

ISO : International Organization for Standardization.

ITAF : Institut Technique de l'Arboriculture Fruitière et de la Vigne.

ITCMI : Institut Technique des Cultures Maraichères et Industrielles.

JORA : Journal Officiel de la République Algérienne.

MES : Matières En Suspension.

MRE : Ministère des Ressources en Eau.

NA : Norme Algérienne.

NF : Norme Française.

NPK : Azote, Phosphore, Potassium.

NPP : Nombre le Plus Probable.

OMS : Organisation Mondiale de la Santé.

ONA : Office National de l'Assainissement.

pH : Potentiel Hydrogène.

SEAAL : Société des Eaux et de l'Assainissement d'Alger.

SF : Solution Fille.

SM : Solution Mère.

STEP : Station d'Épuration.

UFC : Unité Formant Colonie.

XRF : X-Ray Fluorescence.

Introduction

<<Les études de la jeunesse font la

Jouissance de la vieillesse >>

*ean Stobée ; Extraits, sentences et préceptes (I^{er} s.
ap. J.-C.).*

En Algérie, la réutilisation des eaux usées épurées est pratiquée essentiellement par les agriculteurs, soit directement (13 %) à partir des stations d'épuration ou indirectement (87 %) à partir des oueds alimentant les barrages (**Lehtihet, 2005**). Selon **Hartani (2004)**, 8 % des terres irriguées reçoivent des eaux usées non traitées. L'irrigation des cultures maraîchères à l'eau usée brute est interdite en Algérie en raison de son impact sur la santé publique (**JORA, 2005 ; ONA, 2006**).

Pour la réutilisation des eaux usées destinées à l'irrigation plusieurs procédés d'épuration sont mis en œuvre, notamment les procédés physico-chimiques tels que la coagulation-floculation (**Meyssami et al., 2005 ; Ricordel et al., 2010**), oxydation chimique utilisant l'ozone (**Benitez et al., 1997 ; Amat et al., 2003**) et les procédés d'oxydation avancés (**Gernjak et al., 2004 ; Kestioglu et al., 2005**), qui demandent une technologie sophistiquée du personnel qualifié et un coût très élevé (**Hanafi et al., 2009**). Les stations d'épurations envisagent un traitement biologique qui est précédé par un procédé physico-chimiques (coagulation chimique) à cause de non biodégradabilité de certains polluants et de la toxicité en vers les bactéries. Cependant certains inconvénients sont induits par la présence de sels métalliques et une quantité importante de boue produite. Une autre alternative intéressante à ces procédés est l'électrocoagulation (EC).

L'électrocoagulation est un procédé électrochimique qui utilise la dissolution des anodes lors de l'imposition du champ électrique entre les électrodes. C'est une technique rentable par rapport aux méthodes chimiques de traitements des eaux (**Holt et al., 2002 ; Bayramoglu et al., 2007 ; Malakootian et al., 2011 ; Zodi, 2012**). L'électrocoagulation est une autre approche utilisant un courant électrique afin d'enlever plusieurs métaux en solution (Al, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Ra, Zn, etc.) (**Mansour et al., 2012**), ainsi que les agents pathogènes (**Ghernouat et al., 2002 ; Boudjema et al., 2014**).

C'est dans cette optique que notre étude a été orientée afin de déterminer d'une part l'efficacité du traitement des eaux usées par les deux procédés (électrocoagulation et boues activées) et l'impact de la réutilisation des eaux traitées sur le milieu récepteur (sol et plante) d'une autre part. Un suivi des paramètres physico-chimiques, toxicologiques (ETM) ainsi que microbiologiques pour les différents types d'eau étudiée (eau brute, eau traitée) a été effectué. Le dosage des éléments traces métalliques (ETM) et l'évaluation de la qualité hygiénique du produit fini (fruit) ont aussi complété l'étude. Notre travail pourrait contribuer dans la recherche

d'une solution efficace de la gestion et la valorisation des eaux usées en irrigation et préserver les ressources en eaux.

Ce travail est présenté en trois parties :

- La première partie constitue une analyse bibliographique portant sur les différents aspects abordés dans ce mémoire, à savoir, des généralités sur les eaux usées, le procédé de traitement d'électrocoagulation, boues activées, ainsi que la réutilisation des eaux usées traitées dans le domaine d'agriculture.
- La deuxième partie est consacrée au contexte expérimental qui englobe du matériel et les méthodes utilisées.
- La troisième partie apporte les résultats et discussion relatives aux paramètres étudiés et enfin une conclusion et perspectives de ce travail.

Chapitre I.
Partie Bibliographique

<< *Les études, c'est le
chemin le plus facile pour réussir.* >>

Edine-le-sage

*Ingénieur Conseil, Guitare, Lecture, Ecriture,
France, Paris, 1963.*

I.1. Généralités sur les eaux usées

I.1.1. Définition d'une eau usée

Les eaux usées sont toutes les eaux des activités domestiques, agricoles et industrielles chargées en substances toxiques qui parviennent dans les canalisations d'assainissement. Les eaux usées englobent également les eaux de pluies et leur charge polluante, elles engendrent au milieu récepteur toutes sortes de pollution et de nuisance (**Dugniolle, 1980 ; Glanic et Benneton, 1989**). La pollution de l'eau s'entend comme, une modification défavorable ou nocive des propriétés physico-chimique et biologique, produite directement ou indirectement par les activités humaines, les rendant impropres à l'utilisation normale établit (**Grosclaude, 1999**).

I.1.2. Origines des eaux usées

I.1.2.1. Eaux domestiques

Ces eaux sont généralement constituées de matières organiques dégradables et de matières minérales, ces substances sont sous forme dissoute ou en suspension. Elles se composent essentiellement par des eaux ménagères d'évacuation des cuisines, salles de bains (**Rejsek, 2002**).

I.1.2.2. Eaux usées industrielles

Tous les rejets résultant d'une utilisation de l'eau autre que domestique sont qualifiés de rejets industriels. Cette définition concerne les rejets des usines, mais aussi les rejets d'activités artisanales ou commerciales. Ces eaux ont une grande variété et peuvent être toxiques pour la vie aquatique, ou pour l'homme (**Edline, 1979**).

I.1.2.3. Eaux agricoles

L'agriculture est une source de pollution des eaux non négligeable car elle apporte les engrais et les pesticides. Elle est la cause essentielle des pollutions diffuses. Les eaux agricoles issues de terres cultivées chargées d'engrais nitrates et phosphates, sous une forme ionique ou en quantité telle qu'ils ne seraient pas finalement retenus par le sol et assimilés par les plantes. Le ruissellement conduit à un enrichissement en matières azotées ou phosphatées des nappes les plus superficielles et des eaux des cours d'eau et des retenues (**Grosclaude, 1999**).

I.1.2.4. Eaux pluviales

Les eaux de pluies ruissellent dans les rues où sont accumulés les polluants atmosphériques, poussières, détritiques, suies de combustion et hydrocarbures rejetés par les véhicules. Les eaux de pluies, collectées normalement à la fois avec les eaux usées puis déversées dans la canalisation d'assainissement et acheminées vers une station d'épuration, mais sont souvent drainées directement dans les rivières entraînant ainsi une pollution intense du milieu aquatique (Desjardins, 1997).

I.1.3. Types de pollution

I.1.3.1. Pollution physique

❖ Pollution mécanique

Elle résulte des décharges de déchets et de particules solides apportés par les eaux résiduaires industrielles, ainsi que les eaux de ruissellement. Ces polluants sont soit les éléments grossiers soit du sable (Galaf, 2003).

❖ Pollution thermique

Les eaux rejetées par les usines utilisant un circuit de refroidissement de certaines installations (centrales thermiques, nucléaires, raffineries, aciéries, etc.). L'élévation de température qu'elle induit diminue la teneur en oxygène dissous, elle accélère la biodégradation et la prolifération des germes (Galaf, 2003).

❖ Pollution radioactive

C'est celle qui est occasionnée par une éventuelle radioactivité artificielle des rejets qui trouvent leur source dans l'utilisation de l'énergie nucléaire sous toutes ces formes (installations et centrales d'exploitation de mine d'uranium, traitement des déchets radioactifs) (Mekhalif, 2009).

I.1.3.2. Pollution chimique

Elle résulte des rejets chimiques, essentiellement d'origine industrielle, domestique et agricole. La pollution chimique des eaux est regroupée dans deux catégories.

❖ Pollution organique

C'est les effluents chargés de matières organiques fermentescibles (biodégradables), fournis par les industries alimentaires et agroalimentaires (laiteries, abattoirs, sucreries, etc.), et

par les effluents domestique (déjections humaines, graisses, etc.). La première conséquence de cette pollution est la consommation d'oxygène dissous de ces eaux. Les polluants organiques ce sont principalement les détergents, les pesticides et les hydrocarbures (**Baumont et al., 2004**).

❖ Pollution minérale

La pollution minérale des eaux peut provoquer le dérèglement de la croissance végétale ou trouble physiologique chez les animaux. Les polluants minéraux sont principalement les métaux lourds et les éléments minéraux nutritifs (**Mayet, 1994**).

➤ Les métaux lourds : Sont essentiellement le mercure (Hg), le cadmium (Cd), le plomb, l'argent (Ag), le cuivre (Cu), le chrome (Cr), le nickel (Ni) et le zinc (Zn). Ces éléments, bien qu'ils puissent avoir une origine naturelle (roches du sous-sol, minerais), proviennent essentiellement de la contamination des eaux par des rejets d'activités industrielles diverses. Ils ont la particularité de s'accumuler dans les organismes vivants ainsi que dans la chaîne trophique (**Keck et al., 2000**).

➤ Les éléments minéraux nutritifs : Les éléments minéraux tels que les nitrates et phosphates provenant essentiellement de l'agriculture et des effluents domestiques (**Mayet, 1994**). Ils sont à l'origine du phénomène d'eutrophisation c'est-à-dire la prolifération excessive d'algues et de plancton dans les milieux aquatiques.

I.1.3.3. Pollution microbiologique

Les eaux usées contiennent tous les micro-organismes excrétés avec les matières fécales. Cette flore entérique normale est accompagnée d'organismes pathogènes. L'ensemble de ces organismes peut être classé en quatre grands groupes, par ordre croissant de taille : les virus, les bactéries, les protozoaires et les helminthes (**Baumont et al., 2004**).

I.1.4. Traitement des eaux usées

I.1.4.1. Traitement des eaux usées dans une station d'épuration

I.1.4.1.1. Prétraitements

Les eaux qui arrivent à la station d'épuration vont subir en premier lieu des traitements de dégrossissage nommés prétraitements. Ceux-ci vont permettre d'extraire la plus grande quantité des éléments dont la taille (détritus grossiers), le pouvoir abrasif (sables, argiles) et la masse spécifique (graisses flottantes) risquent de perturber le fonctionnement des étapes ultérieures.

Ces prétraitements constituent une première étape très importante pour assurer un traitement efficace des eaux usées (Céline, 2003). Trois types principaux peuvent être distingués le prétraitement peut comprendre les opérations :

❖ **Le dégrillage**

Les eaux usées passent au travers d'une grille dont les barreaux, plus ou moins espacés, retiennent les matières les plus volumineuses (bouteilles, bois, etc.) et flottantes charriées par l'eau brute, qui pourraient nuire à l'efficacité des traitements ultérieurs ou en compliquer leur exécution.

❖ **Le tamisage**

Le tamisage assure un dégrillage poussé par filtration des eaux brutes sur toile, treillis ou tôle perforée, à mailles plus ou moins fines afin d'éliminer les matières solides (impuretés) présentes dans l'eau.

❖ **Le dessablage**

Le dessablage permet d'éliminer les graviers, sables ou particules minérales plus ou moins fines, grâce à des pièges à sédiments, afin d'éviter le dépôt de ces particules dans les installations et de protéger les unités de traitement contre l'abrasion.

❖ **Le dégraissage-déshuilage**

Il consiste à récupérer grâce à des racleurs, les graisses domestiques ou industrielles qui se trouvent à la surface des eaux usées naturellement ou par flottation (injection de fines bulles d'air). Après ces prétraitements, les eaux usées vont suivre la filière (eau) dans le processus d'épuration.

I.1.4.1.2. Les traitements primaires

Le traitement s'effectue par voie physico-chimique pour but d'extraire le maximum de matières en suspension et de matières organiques facilement décantables. Trois voies de traitement sont possibles :

-la décantation (processus physique) : le principe de séparation solide-liquide est la pesanteur, les matières en suspension ou colloïdales tendent à se séparer du liquide par sédimentation (figure1).

-la flottation (processus physique) : par opposition à la décantation, la flottation est un procédé de séparation solide-liquide ou liquide-liquide qui s'applique à des particules dont la masse volumique réelle ou apparente (flottation assistée) est inférieure à celle du liquide qui les contient ;

-la décantation associée à l'utilisation d'un coagulant- floculant (voie physico-chimique) : le principe est ici de favoriser l'agrégation des molécules en suspension grâce aux techniques de coagulation et de floculation de façon à augmenter la sédimentation grâce à l'obtention de floccs plus gros, ce qu'on appelle des boues primaires.

Durant la phase de traitement primaire, une quantité importante de la pollution totale est éliminée (abattement des Matières En Suspension pouvant atteindre 90 % et de la Demande Biochimique en Oxygène de l'ordre de 35 %) (Cardot, 1999). La DCO et la concentration en azote peuvent également être réduits durant cette phase de traitement.

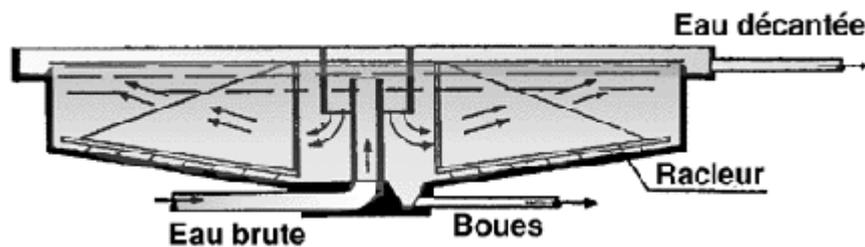


Fig.1. Principe d'un bassin de décantation (Jardé, 2002)

I.1.4.1.3. Les traitements secondaires

Les traitements secondaires ont pour objectif principal l'élimination des matières organiques solubles et des matières en suspension des eaux usées traitées primaires (FAO, 2002). Les procédés d'épuration secondaires (ou biologique) comprennent des procédés biologiques, naturels ou artificiels, faisant intervenir des micro-organismes aérobies pour décomposer les matières organiques dissoutes ou finement dispersées (Desjardins, 1997).

Les traitements secondaires visent à dégrader la matière organique biodégradable contenue dans l'eau à traiter. Des micro-organismes mis en contact avec l'eau polluée assimilent la matière organique qui, leur sert de substrat de croissance. L'ensemble de la pollution avec les micro-organismes vivants forme la liqueur mixte ou boue biologique (boues activées) contenue dans des bassins à traitement biologique. En règle générale, l'élimination complète de la pollution organique de ces bassins se déroule en condition aérées par des souches aérobies strictes ou facultatives. Plusieurs procédés existent à ce stade du traitement biologique. Ce sont les procédés à culture en suspension ou procédés à boues activées, les procédés à culture fixée, les procédés à décantation interne (lagunage), etc. (Céline, 2003).

I.1.4.1.4. Le fonctionnement du procédé à boues activées

Le procédé de traitement à boues activées présente l'ensemble des conditions favorables à une activité maximale des bactéries est mis en œuvre : un apport en oxygène suffisant, un apport en nutriment si l'effluent ne contient pas tous les composés nécessaires au développement des bactéries, une agitation permanente afin de favoriser le contact entre bactéries et pollution, une concentration élevée en bactérie pour augmenter l'efficacité du traitement. La chaîne de traitement est composée d'un bioréacteur, d'un clarificateur et d'une boucle de recyclage des boues (figure2) (Jardé, 2002).

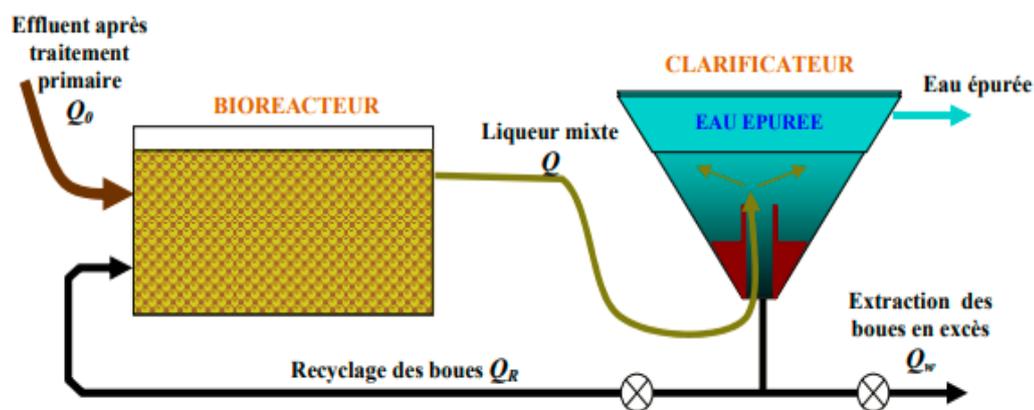


Fig.2. Principe du procédé de traitement par boues activées (Cindy, 2007)

I.1.4.1.5. Traitement tertiaire

Le traitement tertiaire, qui n'est pas systématique, est une opération d'affinage de l'effluent avant réintroduction de l'eau épurée dans le milieu naturel. Le traitement le plus utilisé afin de réduire les matières en suspension et la pollution organique biodégradable, est la filtration tertiaire qui, selon la nature du matériau utilisé, permet de réaliser une épuration essentiellement physique ou biologique.

De nombreuses études sont menées afin de proposer des traitements tertiaires permettant d'éliminer les composés restant après le traitement secondaire. ces composés peuvent être des métaux, des composés organiques non-biodégradables, des micro-organismes pathogènes ou encore des odeurs apparues durant le traitement secondaire (Kwon et al., 2004 ; Temmink et Grolle, 2005). Ils sont généralement éliminés par ozonation, coagulation/floculation, filtration par membrane, adsorption (carbone activé ou échange d'ions) ou encore désinfection par chloration, ultraviolets ou bioxyde de chlore (ClO_2). Leur rendement est en général très satisfaisant puisque ces procédés permettent d'abattre de 75

à 95 % de la DCO restante après le traitement secondaire, jusqu'à 97 % des composés aromatiques et 98 % de la couleur.

I.1.4.2. Traitement des eaux usées par le procédé d'électrocoagulation

I.1.4.2.1. Origine et évolution du procédé d'électrocoagulation

Les premiers travaux sur l'électrocoagulation ont été rapportés en 1880 par Webster (**Stuart, 1946**) qui utilisait des électrodes en fer. A la lumière de ces travaux, une station d'épuration fut construite à Londres la même année et fonctionna pendant dix ans. Une autre fût construite à Salford afin de traiter l'eau d'un canal. En 1909, Harries reprit, ensuite, le procédé mais utilisa des électrodes de fer et d'aluminium et des sels de cuivre pour aider au transport et à la désinfection lors de l'électrolyse. Plusieurs chercheurs ont alors appliqué l'électrocoagulation à différents types d'effluents selon leurs caractéristiques. En 1956, Holden étudia la possibilité de traiter des eaux de surface pour la production d'eau potable en utilisant des électrodes de fer (**Lhadie et al., 1997 ; Picard et al., 2000**).

I.1.4.2.2. Principe du procédé d'électrocoagulation

Le procédé d'électrocoagulation est basé sur le principe des anodes solubles. Lorsque un courant continu est imposé (ou potentiel) entre les deux électrodes (fer ou aluminium) immergées dans un électrolyte, un champ électrique se produit (**Cazoir, 2011**). Cela permet de créer un gradient de vitesse affectant toutes particules chargées notamment les colloïdes et les ions (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+}), facilite leur rencontre (**Arslan-Alaton et al., 2008**) et susceptibles de provoquer une coagulation-floculation des polluants que l'on souhaite éliminer (**Bennajah, 2007 ; Asselin, 2007 ; Arslan-Alaton et al., 2008 ; Zongo, 2009 ; Ricordel et al., 2010**). Cette technique permet donc de diminuer le coût d'utilisation des produits chimiques et diminue par le fait même la production finale de boue dont il faut disposer (**Asselin, 2007**).

Le procédé crée un mouvement d'ions et de particules chargées. Cette action permet de rassembler les matières en suspension sous forme de floes qu'on élimine après par un procédé physique (filtration, décantation, flottation) (**Debillemont, 1996 ; Mohammed et al., 2008**). En utilisant les anodes de fer et d'aluminium, on arrive à faire passer en solution des quantités contrôlables d'ions métalliques indispensables à la création des floes de taille suffisante (**Zongo, 2009 ; Abdel-Ghani et al., 2009**).

Mollah et al. (2001) résumant le processus de séparation de la masse aqueuse par flottation ou décantation comme suit :

- La formation des coagulants par l'oxydation électrolytique des métaux sacrificiels.
- La déstabilisation des contaminants, des polluants, des matières en suspensions et la cassure des émulsions.
- L'agrégation des phases déstabilisées pour former les floccs, qui est résumée par les sous étapes suivantes :
 - Présence forte de la double couche diffuse autour des espèces chargées grâce aux interactions des ions métalliques provenant de la dissolution de l'anode sacrificielle.
 - Neutralisation des espèces ioniques présentes dans l'eau par ces cations.
- Formation des floccs comme les résultats de l'agglomération des particules et des colloïdes autour des espèces coagulées (figure 3).

En général la récupération des boues s'effectue en aval du réacteur électrochimique par un système de décantation (Gao *et al.*, 2005 ; Linares-Hernandez *et al.*, 2009 ; Hansen *et al.*, 2007).

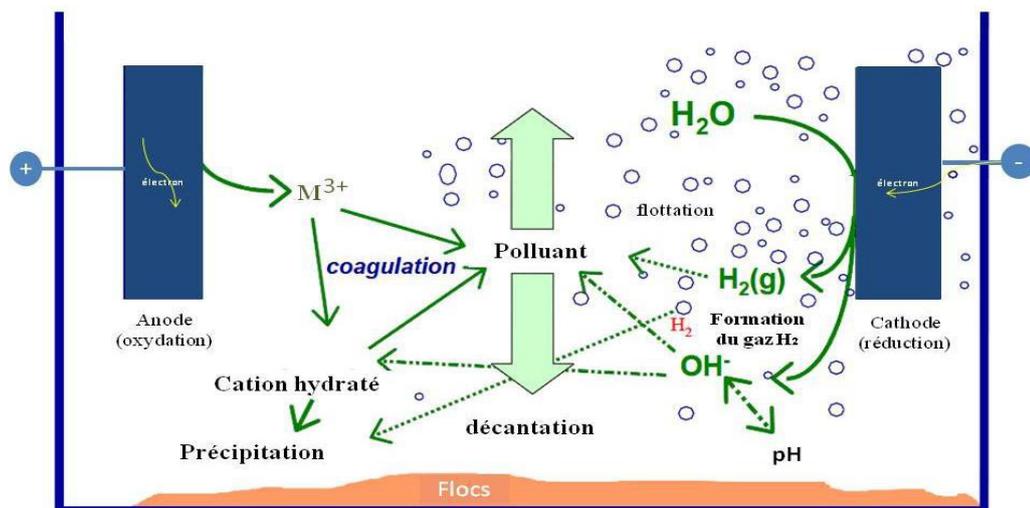


Fig.3. Principe de l'électrocoagulation (Zodi, 2012)

I.1.4.2.3. Avantages et inconvénients du procédé d'EC

Comme tous procédés de traitement, l'électrocoagulation a des avantages et des inconvénients qui sont regroupés dans le tableau 1.

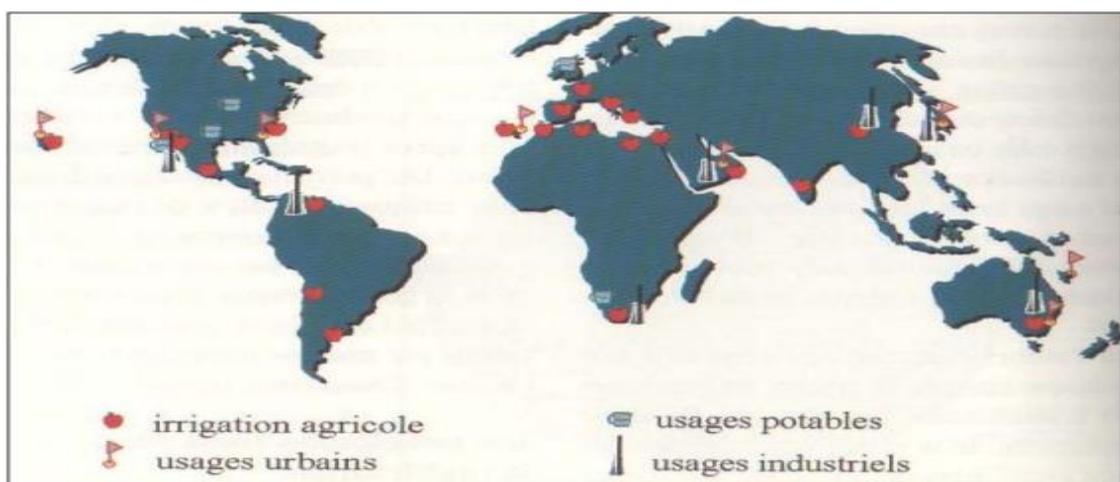
Tableau 1 : Avantages et inconvénients du procédé d'EC

| Avantages | Inconvénients |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Réduction des métaux résiduels • Réduction de MES et de la DCO • Absence d'ajout de coagulants (Bennajah 2007) • Pouvoir bactéricides très élevé (Persin et Rumeau 1989) • Réduction de boue produite (Larue et Vorobiev 2003) • Temps de traitement réduit (Cenkin et Belevtsev 1985) | <ul style="list-style-type: none"> • L'effluent doit avoir une CE suffisante (Yousuf et coll., 2001 ; Mollah et coll., 2004 ; Kim et coll., 2002 ; Yang et Dluhy, 2002) • L'effluent doit être exempt de grosses particules (prétraitement nécessaire) • Nettoyage des électrodes obligatoire (Bennajah 2007) |

I.1.5. Réutilisation des eaux usées et épurées en irrigation

I.1.5.1. Dans le monde

L'utilisation des eaux usées en agriculture est une pratique très ancienne et assez répandue dans le monde entier (Arnold et Stevan, 1977 ; OMS, 1989 ; Asano et Lavine, 1996 ; Chang et al., 2002). Elle est apparue avec l'installation d'égouts dans les agglomérations urbaines et s'est développée au cours des dernières décennies, en particulier dans les régions arides et semi arides (figure 4).

**Fig.4.** Principaux lieux de réutilisation des eaux usées dans le monde (Ecosse, 2001)

Ce développement s'explique principalement par le manque d'eau fraîche et par le besoin d'accroître la production agricole (Faruqui, 2003 ; Christopher *et al.*, 2004). Plus de 20 millions d'hectares dans 50 pays sont actuellement irrigués avec des eaux usées épurées ou brutes (Faruqui, 2003 ; Christopher *et al.*, 2004) (tableau 2).

Tableau 2 : Exemples de réutilisation des eaux usées dans le monde.

| Pays | Pourcentage % et domaine d'application |
|-----------------|---|
| Inde | Environ 25 % des eaux usées traitées et brutes sont utilisées en irrigation agricole (Gijzen, 2000). |
| Pakistan | 80 % de la communauté urbaine utilisent les eaux usées brutes dans la production agricole et 26 % de la production de légumes est assurée par la réutilisation des eaux usées souvent à l'état brut (Christopher <i>et al.</i> , 2004). |
| Chili | 70 à 80 % des eaux usées brutes sont utilisées en agriculture (OMS, 1989). Au Pérou, par exemple à Lima, plus de 5000 hectares sont irrigués avec des eaux usées brutes (Straus <i>et al.</i> , 1990 ; Peasey <i>et al.</i> , 2000). |
| Maroc | Les rejets sont utilisés pour les besoins des périmètres agricoles péri urbains (Ratel <i>et al.</i> , 1986). Parmi les cultures irriguées, on trouve l'arboriculture, les cultures fourragères, la céréaliculture et le maraîchage (Oubelkas et Zellou, 1991). |
| Arabie Saoudite | Le royaume réutilisait 15 % des eaux usées traitées, pour irriguer 9000 ha de dattiers et de fourrage, notamment la luzerne (Straus <i>et al.</i> , 1990 ; Ishaq et Khan 1997 ; Faruqui, 2003 ; Abderrahman, 2003). |
| Australie | Produit entre 150 à 200 x 10 ⁶ m ³ /an d'eaux usées traitées, 9 % sont réutilisées (Radcliffe, 2004). |

I.1.5.2. En Algérie

Selon Medkour (2002), l'Algérie se penche, actuellement, sur la régularisation de la réutilisation des eaux usées en agriculture. Ceci nécessite dans un premier temps d'identifier et de quantifier les volumes d'eaux usées rejetés par les agglomérations à travers le pays. Le volume d'eaux usées rejetées annuellement par les agglomérations supérieures à 20.000 habitants est estimé à 550 x 10⁶ m³ et qui constate que près de 60 % de ces eaux sont rejetées soit loin des périmètres agricoles et des barrages, soit vers la mer. L'Algérie, qui dispose d'un volume d'eau traité de 560 000 m³, consacre 65 % de ses ressources hydriques au secteur de l'agriculture (MRE, 2012), cependant une utilisation sans risque de cette eau nécessiterait qu'elle soit traitée et contrôlée.

I.1.6. Réglementations de la réutilisation des eaux usées traitées en irrigation

I.1.6.1. Normes européennes (OMS)

Les recommandations de l'OMS sont source d'inspiration pour de nombreux pays à travers le monde. Les normes concernent uniquement les quantités de microorganismes. Les protozoaires et les virus ne sont pas considérés. Ces normes sont destinées à une utilisation internationale, et sont donc adaptées aux pays en voie de développement. Elles représentent la limite au-delà de laquelle la santé publique n'est plus assurée (FAO, 2002) (tableau 18 annexe D).

I.1.6.2. Normes Algériennes

Selon le journal officiel de la république algérienne n° 41 du 15 juillet 2012 relative sur la spécification des eaux usées épurées à des fins d'irrigation. L'utilisation des eaux usées brutes pour l'irrigation est interdite (JORA, 2005). La préservation de la qualité d'eau exige un contrôle continu basé sur des paramètres microbiologiques et physico-chimiques (tableau 19 et 20 annexe D).

I.2. Généralités sur la culture de tomate

I.2.1. Origine de la tomate

La tomate du genre *Lycopersicon* est une plante cultivée dans le monde entier pour son fruit. Elle est originaire des régions Andines côtières du Nord-Ouest de l'Amérique du Sud, dans une zone allant du sud de la Colombie au Nord du Chili et de la côte Pacifique, aux contreforts des Andes (Equateur, Pérou) (Chaux et Foury, 1994).

En Algérie, ce sont les cultivateurs du Sud de l'Espagne (Tomateros), qui l'ont introduite étant donné les conditions qui lui sont propices. Sa consommation a commencé dans la région d'Oran en 1905 puis, elle s'étendit vers le centre, notamment au littoral Algérois (Latigui, 1984).

I.2.2. Classification de la tomate

I.2.2.1. Classification botanique

La tomate dont l'appartenance à la famille des *Solanacées* avait été reconnue par les botanistes a été classée par Linné en 1753, comme *Salanum lycopersicon*. Cronquist (1981) ; Gaussen *et al.* (1982) rappellent que la tomate appartient à la classification suivante :

Systematique :

Règne : Plante

Sous règne : Trachenobionta.

Ordre : .Solonales.

Division : Magnoliophyta.

Famille : Solanaceae

Classe : Magnoliopsida.

Genre : *Solanum ou Lycopersicon*

Sous classe : Asteridae.

Espèce : *Lycopersicon esculentum Mill.***I.2.2.2. Classification génétique**

La tomate cultivée, *Lycopersicon esculentum Mill* est une espèce diploïde avec $2n=24$ chromosomes, chez laquelle il existe de très nombreux mutants monogéniques. Dont certains sont très importants pour la sélection. Sa carte chromosomique compte actuellement 235gènes localisés avec précision (**Gallais et Bannerot, 1992**).

❖ **Variétés fixées**

Il existe plus de cinq cents variétés fixées (conservent les qualités parentales). Leurs fruits sont plus ou moins réguliers, sont sensibles aux maladies, mais donnent en général des fruits d'excellente qualité gustative (**Publishers, 2004**).

❖ **Variétés hybrides**

C'est le produit d'un croisement entre deux plantes qui appartiennent à eux variétés différentes (**Lafon et al., 1998**). Les variétés hybrides sont plus nombreuses. Elles sont relativement récentes, puisqu'elles n'existent que depuis 1960 (**Polese, 2007**).

I.2.2.3. Classification variétal selon le mode de croissance❖ **Variété à croissance indéterminée**

Elles continuent de pousser et de produire des bouquets floraux, tant que les conditions sont favorables. Comme leur développement est exubérant, leur tige doit être à un tuteur, sous peine de s'affaisser au sol. Il est également nécessaire de les tailler et de les ébourgeonner régulièrement. Elles ont une production plus échelonnée et plus étalée. Elles sont plus productives en général que les tomates à port déterminé (**Polese, 2007**).

❖ **Variété à croissance déterminée**

Dans ce groupe et selon la variété, la tige émet 2 à 6 bouquets floraux, puis la croissance s'arrête naturellement. Elle est caractérisée par l'absence de la dominance apicale. Ce type de variété est destiné à l'industrie agro-alimentaire sous le nom de variété industrielle (Laumonier, 1979).

I.2.3. Exigences édapho-climatiques de la tomate

Les conditions climatiques et édaphiques nécessaires pour la culture de tomate sont rapportés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Exigences climatiques et édaphiques pour la culture de tomate.

| | | Conditions favorables |
|--|-------------------|---|
| Exigences climatiques (Naika <i>et al.</i> , 2005). | T °C de l'air | La tomate est une plante des saisons chaudes. Les températures optimales pour la plupart des variétés sont de 18 °C le jour et 15 à 25 °C la nuit. |
| | La lumière | La tomate n'est pas sensible au photopériodisme, cependant son développement exige de fortes quantités de lumière. |
| | Humidité de l'air | La tomate est très sensible à l'hygrométrie, il semble qu'une hygrométrie relativement ambiante de 60 % à 65 % soit la meilleure, l'humidité de l'air joue un rôle important dans la fécondation. |
| Exigences édaphiques (Chaux et Foury, 1994 ; Rey et Costes, 1965). | La nature du sol | La tomate peut convenir et s'adapter à toutes les textures, allant des sols argileux, aux sables dunaires à conditions que les travaux du sol soient effectués convenablement. |
| | pH du sol | le taux de pH toléré varie de 4,5 à 8,5. Le meilleur équilibre nutritionnel est assuré à des pH compris entre 6 et 7. |
| | T °C du sol | La température du sol est le premier facteur dont dépendent le pourcentage de levée et la vitesse de germination. Cette dernière augmente avec la température jusqu'à une valeur optimale de 25 °C, et ente 15 °C et 20 °C. |

I.2.4. Valeurs nutritionnelles de la tomate

La tomate crue fait partie des légumes les moins énergétiques avec son apport de 16,40 kcal pour 100 g (soit 68,8 kJ) alors que l'apport moyen des légumes frais est de 37,56 kcal. Le tableau 4 nous renseigne sur la quantité moyenne, ainsi que les quantités minimum et maximum pour 100 g net de tomates crues (Ciqual, 2013).

Tableau 4 : Table de composition nutritionnelle de tomate (Ciqual, 2013).

| Composants | | Quantités | Min – Max |
|----------------------------|------------------------------|-----------|----------------|
| Eau | | 94,5 g | 88 – 96,6 g |
| Protéines | | 0,8 g | 0,5 – 1,3 g |
| Lipides | | 0,26 g | 0,07 – 0,8 g |
| Acides gras saturés | | 0,048 g | 0,02 – 0,07 g |
| Glucides | | 1,72 g | - |
| Sucre | | 1,68 g | NC – 3,5 g |
| Fibres | | 1,41 g | 0,7 – 3,2 g |
| Acides organiques | | 0,39 g | - |
| Vitamines | Provita mine A | 840 µg | 184 - 1200 µg |
| | Bé ta -carotène | | |
| | Equivalent Vitamine A | 140 µg | 30.67 - 200 µg |
| | Vitamine B1 | 0,06 mg | 0,02 – 0,07 mg |
| | Vitamine B2 | 0,04 mg | 0 – 0,4 mg |
| | Vitamine B3 | 0,6 mg | 0,44 – 0,85 mg |
| | Vitamine B5 | 0,27 mg | 0,04 – 0,33 mg |
| | Vitamine B6 | 0,08 mg | 0,05 – 0,15 mg |
| | Vitamine B9 | 20,5 µg | 1 - 52 µg |
| | Vitamine C | 14,3 mg | 4,7 – 26,5 mg |
| | Vitamine E | 1,11 mg | 0,39 – 1,3 mg |
| Minéraux et oligo-éléments | Calcium | 8,24 mg | 3,17 - 60 mg |
| | Cuivre | 0,0326 mg | 0,01 – 0,13 mg |
| | Fer | 0,151 mg | 0,01 – 0,95 mg |
| | Iode | 2 µg | 0,01 - NC µg |
| | Magnésium | 10,1 mg | 5 - 20 mg |
| | Manganèse | 0,0711 mg | 0,04 – 0,93 mg |
| | Phosphore | 19,3 mg | 8 - 53 mg |
| | Potassium | 251 mg | 92 - 534 mg |
| | Sélénium | 0,3 µg | 0,15 - 10 µg |
| Polyphénols | Sodium | 3,29 mg | 1 - 112 mg |
| | Zinc | 0,221 mg | 0 – 2,42 mg |
| | Flavonoides | 0,29 mg | - |
| | Acides phénoliques | 3,87 mg | - |
| Polyphénols totaux | | 4,16 mg | - |

Chapitre II.

Matériels et Méthodes

<< Pendant les études, la réussite ne dépend que de soi, dans la vie professionnelle, la réussite dépend aussi des autres. >>

Edine-le-sage

*Ingénieur Conseil, Guitare, Lecture, Ecriture, France,
Paris, 1963.*

II. Matériels et méthodes

Cette partie décrit les conditions expérimentales dans lesquelles les eaux usées traitées par électrocoagulation et par boues activées sont plus tard étudiées d'une part et la mise en place de la culture maraichère et son irrigation d'une autre part. L'analyse des paramètres physico-chimiques, microbiologiques et le dosage des éléments traces métalliques (ETM) ont été effectués sur l'eau, le sol et la plante. Ces analyses permettant de déterminer l'efficacité des traitements appliqués et l'impact de ces eaux traitées sur la tomate : *Lycopersicon esculentum* qui est Le matériel biologique utilisé durant l'expérience, le matériel non biologique (voir annexe II)

II.1. Protocole expérimental

La première étape dans la présente étude est la conception du pilote expérimental pour traiter les eaux usées par le procédé d'électrocoagulation qui s'est déroulée à l'Ecole Nationale Polytechnique d' El Harrach (laboratoire d'URIE). La deuxième étape consiste à valoriser ces eaux usées traitées dans le domaine agricole ; pour assurer cet objectif, un autre dispositif d'une culture maraichère (plantation et irrigation) a été mis en place sous serre au sein de l'Institut Technique des Cultures Maraichères et Industrielles (ITCMI) de Staouali. L'étude a été faite sur une variété hybride de tomate Zahra obtenue d'une pépinière de Boumerdes, sur une période de 8 mois du 15 décembre 2016 au 24 juillet 2017.

II.1.1. Configuration du réacteur utilisé (électrocoagulation)

Le type de réacteur choisit dans le cadre de ce travail est mono polaire en batch. Le choix de la distance et de nature d'électrodes utilisées sont des éléments essentiels dans la conception du dispositif en plexiglas. Le réacteur utilisé est d'un volume de 10 litres, il comporte deux électrodes formées de deux plaques en fer rectangulaires, en parallèle (anode et cathode), d'une dimension de 15 cm x 14 cm. La surface latérale d'une électrode est de 420 cm². L'épaisseur des plaques est de 2 mm, n'a pas d'effet sur le traitement étant donné que seule une face de chaque électrode est en contact avec l'effluent. La distance entre les électrodes est de 5 cm avec une intensité de courant électrique fixée à 3 A (30 Volts). Les électrodes sont placées verticalement dans le réacteur (figure 5). La distance entre les électrodes et les valeurs de l'intensité de courant sont maintenues stables durant toute la période du traitement. L'électrocoagulation est utilisée en mode de tension, en utilisant un générateur de courant continu. Une agitation de la solution électrolyte est assurée par un agitateur et un barreau magnétique au fond de la cellule électrolyte. Le réacteur agité permet l'homogénéisation de

l'effluent mais cette agitation est maintenue à une vitesse assez faible afin de ne pas cisailer les floccs et faciliter leur décantation.

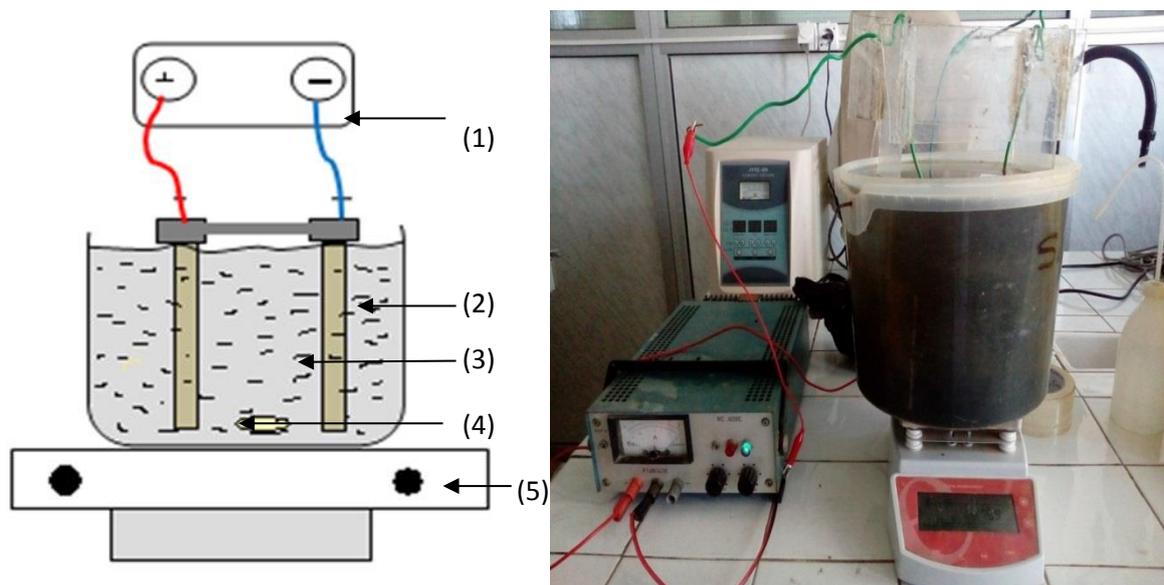


Fig.5. Dispositif expérimental de traitement par l'électrocoagulation. (1) générateur de courant, (2) cellule électrolyte, (3) électrodes en Fe, (4) barreau magnétique, (5) agitateur magnétique.

Un nettoyage des plaques avant le lancement de chaque traitement est obligatoire avec un papier à verre et une solution de NaCl à 0.1 N. Après une heure (60 min) de traitement, l'eau traitée est décantée et filtrée sur un papier filtre (Whatman). Cette eau fera l'objet d'une réutilisation dans l'irrigation d'une culture maraîchère.

II.1.2. Site de prélèvement (STEP de Baraki)

Les eaux brutes et traitées par boues activées sont prélevées au niveau de la station d'épuration de Baraki (Alger). Le choix du site a été porté sur l'origine des eaux brutes qu'elle reçoit et la nature de traitement de la station d'épuration de Baraki. Cette dernière est de type boues activées avec une capacité nominale de 900 000 équivalents habitant, et un débit moyen journalier d'environ 140 000 m³/j (Amrani et Lounes, 2012) (figure 6). Les eaux usées reçues dans cette station sont d'origine urbaines (égouts), industrielles (production pharmaceutique SAIDAL, central électrique de Sonelgaz, etc.) et domestique de l'agglomération des communes environnantes (El-Harrach, Birtouta, Bab Ezzouar, Baba Ali, Oued Samar, Hussein dey et Dar El-Beida). Les eaux usées traitées de cette station d'épuration sont acheminées vers l'oued El-Harrach qui se déverse au centre de la baie d'Alger. Les prélèvements des eaux brutes (après prétraitement) et des eaux traitées par boues activées (clarificateur secondaire) sont réalisés

avec une fréquence hebdomadaire à raison de 50 litres pour chaque eau dans des récipients de 10 litres avec un volume total de 1400 L pour chaque type d'eau.



Fig.6. Station d'épuration de Baraki (Alger).

II.1.3.Réalisation de la culture

Pour la mise en place de l'expérimentation, nous avons utilisé 60 pots en plastique de 30 cm de diamètre. Les pots sont perforés pour laisser l'eau s'écouler. Le sol utilisé dans l'expérimentation a été prélevé dans une parcelle non cultivée de Staouali, il est de nature sableuse et pauvre en matière organique. 10 kg sont pesés et placés dans chaque pot. La granulométrie du substrat a été analysée au niveau du laboratoire (ITAF Boufarik-Blida), les caractéristiques du sol sont présentées dans le tableau 5.

Tableau 5 : Granulométrie du substrat utilisé

| Echantillon | Argile (%) | Limon fin (%) | Limon grossier (%) | Sable fin (%) | Sable grossier (%) | Observation |
|--------------------|------------|---------------|--------------------|---------------|--------------------|------------------|
| Sol de remplissage | 04,25 | 01,19 | 00,85 | 11,55 | 82,15 | Texture sableuse |

◆ Choix de la culture

Selon l'arrêté interministériel du Février 2012, relatif à l'utilisation des eaux usées épurées dans l'agriculture, fixant les cultures à irriguer, qui autorise l'irrigation des cultures maraichères destinées à l'industrie parmi lesquelles la tomate industrielle (JORA, 2012). Sur ce nous avons

choisi d'appliquer nos essais sur une culture de tomate en plus de sa disponibilité, son faible coût ainsi qu'à sa forte consommation par le peuple algérien.

Les plantes de tomate : *Lycopersicon esculentum* utilisées pour l'expérimentation sont de variété *Zahra*, ont été obtenues à partir de plantules de 20 cm de hauteur, la plantation a eu lieu le 18/04/2017, dans des pots contenant 1/3 de gravier et 2/3 d'un mélange de sol et de tourbe. Les essais se sont déroulés sous une serre de 400 m² avec une bâche en polyéthylène. Les plantes poussent naturellement dans les conditions locales avec une température moyenne de 30 °C et sont arrosées 3 fois/semaine avec un volume de 500 ml de la mise en pot à la fin de floraison (avril-mai), puis une irrigation quotidienne au stade de nouaison jusqu'à grossissement des fruits (mai-juin) avec 750 à 1000 ml, et une fréquence (2 fois/jours) avec 500 ml du début de la maturation à la fin de la récolte (en mois de juillet).

II.1.4. Plan de l'expérience

L'expérimentation comporte 03 traitements, divisés en 03 lots de 20 pots dont chacun correspond aux trois différents types d'eaux d'irrigation qui sont comme suit :

- Traitement (T1) : irrigation par l'eau de puits (EP), considéré comme témoin,
- Traitement (T2) : irrigation par l'eau traitée par le procédé d'électrocoagulation (ETec)
- Traitement (T3) : irrigation par l'eau traitée par les boues activées de la station d'épuration de Baraki (ETba).

Les pots sont placés selon un dispositif en bloc aléatoire complet présenté dans la figure 7. Durant toute la période de l'expérimentation, une observation visuelle (décoloration, jaunissement, pigmentation, nécroses, etc.) et une mesure de croissance de la partie aérienne des plantes (longueur et le diamètre de la tige principale) sont réalisées chaque 15 jours.



Fig.07. Dispositif expérimental d'une culture maraichère tomate : *Lycopersicon esculentum* au niveau de l'ITCMI. (T1 : traitement par EP ; T2 : traitement par EC ; T3 : traitement par BA).

II.1.5. Traitement des plantes

II.1.5.1. Traitement phytosanitaire

Durant l'essai la culture de la tomate *Lycopersicon esculentum* a subi une attaque causée par un insecte qui est la mouche mineuse *Tuta absoluta* c'est un parasite dévastateur de la tomate. La larve creuse de grandes galeries dans les feuilles, les tiges, au niveau des bourgeons apicaux, et les fruits verts et mûrs, causant des pertes de rendement jusqu' à 100 %. La larve peut s'alimenter de toutes les parties de la plante de tomate et peut perturber toutes les étapes de la croissance. Le traitement phytosanitaire utilisé durant l'expérimentation est mentionné dans le tableau 6.

Tableau 6 : Traitements phytosanitaires.

| Traitement | Insecticide «Oberon » Fongicide « Ortiva » | Insecticide «Mospilan » Fongicide « Bayfidan » | Insecticide « coragene » | Insecticide « tracer » |
|------------|---|---|-----------------------------|---------------------------|
| Dose | 1 L/60 plants | 1 L/60 plants | 1 L/60 plants | 1 L/60 plants |

II.1.5.2. Engrais appliqué

Un mois après la plantation, nous avons commencé l'application de l'engrais (NPK 20-20-20) pour le développement des racines une fois par semaine, en démarrant par une dose de 20 g/traitement (équivalent de 1 g/pot) cette dose a augmenté avec le développement végétatif de la plante jusqu'à atteindre 6 g/pot.

II.2. Prélèvement et Echantillonnage

Plusieurs prélèvements ont été réalisés pour les trois natures d'eau, sol et plante (racine, feuilles et fruits) pour l'étude des paramètres physico-chimiques, microbiologiques et toxicologiques (ETM). La méthode d'échantillonnage diffère selon la nature du produit à analyser.

II.2.1. Eau

L'échantillonnage a été effectué manuellement à l'aide d'une perche depuis le clarificateur pour les ETba et à la fin de traitement par électrocoagulation pour les ETec. Le tout est récupéré dans des flacons en verre stériles pour les analyses microbiologiques et dans des bouteilles en polyéthylène pour les analyses physicochimiques et dosage des ETM. Les échantillons sont immédiatement conservés et transportés au laboratoire d'analyse dans une glacière à 4 °C. Le nombre d'analyse et le volume d'échantillonnage réalisés sont mentionnés dans le tableau 7.

Tableau 7 : Echantillonnage des eaux à analyser (ETba) eau traitée par boues activées, (ETec) eau traitée par électrocoagulation, (EP) eau de puits.

| | Etude microbiologique | | | Etude physico-chimique | Dosage ETM |
|------------------|-----------------------|------|-----|------------------------|------------|
| | ETba | ETec | EP | ETec | EP |
| Volume (ml) | 500 | 500 | 500 | 3 L | 3 L |
| Nombre d'analyse | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |

II.2.2. Sol

L'échantillonnage du sol a été réalisé par le prélèvement d'une carotte de chaque pot pour les trois traitements réalisés (T1, T2 et T3) dans des sacs en plastiques afin d'obtenir un

échantillon représentatif et homogène sur des intervalles de 10 à 15 jours selon le tableau 8 suivant :

Tableau 8 : échantillonnage du sol

| | Quantité de sol prélevée (g) | | | Nombre d'analyse |
|-----------------------|------------------------------|-----------------|-----|------------------|
| | pH et CE | microbiologique | ETM | |
| T0 (avant plantation) | 20 | 25 | 10 | 1 |
| T1 (témoin EP) | 20 | 25 | 10 | 6 |
| T2 (ETec) | 20 | 25 | 10 | 6 |
| T3 (ETba) | 20 | 25 | 10 | 6 |

II.2.3. Plante et fruits

Après la fructification et le grossissement des fruits, nous avons commencé la récolte à partir des trois lots de pots. Nous avons prélevé soigneusement et séparément des fruits de tomate dans des sacs stériles, conservés et transportés dans une glacière à 4 °C (tableau 9).

A la fin de l'expérimentation, nous avons prélevé des plantes de façon aléatoire qui sont ensuite coupées au niveau des racines. Les feuilles et les racines sont ensuite transvasées dans un sac en papier pour l'analyse toxicologique.

Tableau 9 : Echantillonnage de la tomate

| | Etude Microbiologique | Dosage des Eléments traces métalliques (ETM) | |
|----------------------|-----------------------|--|-------------------|
| | | Chair | Peau |
| Nombre d'échantillon | 10 fruits/analyse | 14 fruits/analyse | 14 fruits/analyse |
| Nombre d'analyse | 05 | 01 | 01 |

II.3. Méthodes d'analyses

II.3.1. Analyses physiques et chimiques

Les analyses physiques, chimiques et toxicologiques (ETM) des eaux ont été réalisées au laboratoire d'analyse de SEAAAL et de l'Office Nationale d'Assainissement de Baraki (ONA). Les mesures et les méthodes utilisées sont regroupées dans le tableau 10 ci-dessous :

Tableau 10 : Paramètres physico-chimiques et toxicologiques (ETM) mesurés

| Paramètres mesurés | Méthode | Echantillon |
|---|----------------------|-------------|
| pH | pH mètre- NF T90-031 | Eau, sol |
| Conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | Ph mètre- NF T90-031 | Eau, sol |
| Demande chimique en oxygène (mg/l) | ISO 6060 | Eau |
| Demande biologique en oxygène (mg/l) | ISO 5815 | Eau |
| Matières en suspension (mg/l) | NF T 90-105 | Eau |
| Chrome | NF EN ISO 15586 | Eau |
| Fer | FD T90.122 | Eau |
| Plomb | NF EN ISO 15586 | Eau |
| Cadmium | NF EN ISO 15586 | Eau |
| Cuivre | ISO 8288 | Eau |
| Aluminium | NF EN ISO 15586 | Eau |
| Zinc | ISO 8288 | Eau |

II.3.1.1. Potentiel hydrogène (pH)

◆ Principes

Le pH est une mesure de la différence de potentiel existant entre une électrode de mesure et une électrode de référence plongeant dans une même solution (NA.751/1990). Le pH est mesuré à l'aide d'un pH mètre (st5000-f).

◆ Mode opératoire (NF T90-031).

- Allumer le pH-mètre puis rincer les 2 électrodes avec l'eau distillée ;
- Etalonner l'appareil au moyen de deux solutions tampon de pH connu et de préférence située de part et d'autre à mesurer. L'étalonnage se fait sur place juste avant la mesure ;
- Prendre environ 100 ml d'eau à analyser et faire la correction de la température ;
- Tremper l'électrode avec les précautions habituelles dans le bécher, laisser stabiliser un moment, puis noter le résultat.

II.3.1.2. Conductivité électrique (CE)

◆ Principes

La conductivité est la propriété que possède une eau de favoriser le passage d'un courant électrique. Elle est due à la présence dans le milieu d'ions qui sont mobiles dans un champ électrique. Elle dépend de la nature de ces ions dissous et de leurs concentrations (**Rejsek, 2002**). La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm² (**Rodier, 2005**).

◆ Mode opératoire (NF T90-031).

- Allumer le conductimètre puis rincer les deux électrodes avec l'eau distillée ;
- Plonger la sonde dans le bécher contenant l'eau à analyser ;
- Régler la température puis appuyer sur la touche (COND) pour mesurer la conductivité ;
- Lecture finale se fait lorsque la valeur devient stable, la conductivité électrique est exprimée en micro-siemens par centimètre (μS/Cm).

II.3.1.3. Matières en suspension (MES) (NFT 90-105).

La détermination des matières en suspensions est réalisée par la méthode de filtration.

◆ Mode opératoire

On utilise cette méthode pour l'eau traitée car elle est de faible charge.

- Sécher les papiers filtres MES dans une étuve à 105 °C ;
- Laisser refroidir en dessiccateur et on pèse ;
- Placer le filtre dans l'équipement de filtration et mettre en marche le dispositif d'aspiration ;
- Verser ensuite progressivement un volume bien déterminé d'eau à analyser (200 ml) sur le filtre et sécher le filtre à 105 °C, jusqu'à une masse constante.

◆ Expression des résultats

La teneur en milligrammes de matière en suspension (MES) est donnée par la formule suivante (**eq1**) :

$$\text{MES (mg/l)} = \frac{M1 - M0}{v} \quad (\text{eq1})$$

V : volume en millimètres d'eau traitée (prise d'essai).

M₀ : masse en milligrammes du disque filtrant avant utilisation (filtre vide).

M₁ : masse en milligrammes du disque filtrant après utilisation.

II.3.1.4. Demande chimique en oxygène (DCO) (ISO 6060)

◆ Principe

Les matières contenues dans l'eau sont oxydées par un excès de dichromate de potassium, en milieu acide et en présence de sulfate d'argent et de sulfate de mercure. L'excès de dichromate de potassium est dosé par le sulfate de fer et d'ammonium.

◆ Mode opératoire

- Transvaser 10 ml de l'échantillon à analyser, diluer si nécessaire dans un tube à DCO mètre (le volume totale est toujours de 10 ml) ;
- Mettre 10 ml d'eau distillée dans un tube à DCO mètre : le blanc (effectuer 2 essai à blanc) ;
- Mettre 10 ml d'hydrogénéphthalate de potassium dans un tube à DCO mètre (c'est le témoin);
- Ajouter pour chaque tube 5 ml de dichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$) et quelques billes en verre (régulateur d'ébullition) et agiter soigneusement.
- Ajouter lentement 15 ml d'acide sulfurique-sulfate d'argent sous hotte ;
- Mettre le DCO en marche à une température 150 °C pendant 120 minutes ;
- Une fois les 120 minutes entamées, éteindre le DCO mètre et les tubes refroidir ;
- Diluer le contenu de chaque tube dans une éprouvette de 100 ml à environ 75 ml ;
- Mettre 1 à 2 gouttes de l'indicateur ferroïne, et tirer avec la solution sulfate de fer et d'ammonium (sel de Mohr), la coloration passe du vert au rouge violacé.

◆ Expression des résultats

La DCO, exprimée en milligrammes par litre, est donnée par la formule (eq2) :

$$DCO \text{ (mg/l)} = \frac{8000 \times C \times (V_1 - V_2)}{V_0} \quad (\text{eq2})$$

C : la concentration en quantité de matière, exprimée en mole par litre, de la solution de sulfate de fer et d'ammonium.

V₀ : le volume en millilitres, de la prise d'essai avant dilution (s'il y a lieu).

V₁ : le volume en millilitres de la solution de sulfate de fer et d'ammonium utilisé pour l'essai à blanc.

V₂ : le volume en millilitres de la solution de sulfate de fer et d'ammonium utilisé pour l'échantillon.

8000: c'est la masse molaire en milligrammes par mole de 1/2 O₂.

II.3.1.5. Demande biologique en oxygène (DBO₅) (MA.315-DBO 1.1)

◆ Principe

La DBO₅ est la mesure de la consommation d'oxygène d'un effluent après cinq jours d'incubation à 20 °C. La consommation d'oxygène de l'échantillon provient de la dégradation des molécules organiques et de l'oxydation des molécules inorganiques comme les sulfures, les ions ferreux et les différentes formes de composés azotés.

◆ Mode opératoire

- Choisir le volume de l'échantillon qui correspond à la gamme de mesure adéquat ;
- Verser le volume d'échantillon dans le flacon DBO ;
- Ajouter de la soude pour absorber le CO₂ formé ;
- Ajouter un barreau magnétique pour assurer l'agitation et insérer le flacon dans un incubateur de DBO ; et mettre une étiquette sur chaque bouteille contenant la date de prélèvement ;
- Mettre le DBO en marche à 20 °C pendant 5 jours.

◆ Expression des résultats

La lecture est effectuée après 5 jours d'incubation à 20 °C. On calcule la concentration en DBO par la formule suivante : (eq3)

$$[\text{DBO}_5] \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) = \mathbf{v} \times \mathbf{f} \quad (\text{eq3})$$

v : la valeur indiquée après 5 jours sur l'afficheur du flacon DBO

f : le facteur qui correspond aux volumes de l'échantillon choisie.

II.3.1.6. Test de chloration (Méthode Colorimétrique) COMP.7a.F.

◆ Principe

Le Chlore Libre réagit avec la molécule DPD (Diéthyl-p-Phénylène-Diamine) dans une solution tamponnée afin de produire une coloration rosâtre. L'intensité de cette couleur produite est proportionnelle à la concentration en Chlore libre recherchée.

◆ Mode opératoire

Chlore Libre :

1. Rincer un tube avec un peu d'eau de l'échantillon en prenant soin de laisser 2 ou 3 gouttes d'échantillon dans le tube.
2. Ajouter une pastille DPD No 1 et remplir le reste du tube avec de l'eau de l'échantillon jusqu'au trait supérieur (marqué 10 ml). Agiter gentiment fin que la pastille soit complètement dissoute.
3. Insérer le tube à l'arrière du Comparateur et effectuer immédiatement la lecture.
4. Le résultat lu sur le disque représente la concentration en Chlore Libre en milligrammes par litre.

II.3.2. Analyse toxicologique (ETM)

Les éléments trace métallique (ETM) mesurés dans le sol, racine feuille et fruit sont : chrome (Cr), fer (Fe), plomb (Pb), cuivre (Cr), aluminium (Al) et le zinc (Zn). La méthode utilisée pour le dosage des ETM est la ED-XRF (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence) au niveau du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger (CRNA), les échantillons analysés sont préalablement séchés et lyophilisés.

II.3.2.1. Principe de fonctionnement d'un spectromètre ED-XRF

Les spectromètres XRF de table de SPECTRO sont basés sur la méthode d'analyse en dispersion d'énergie (ED-XRF). Les atomes dans le matériau de l'échantillon, de forma solide, liquide ou pulvérulente, sont excités par des rayons-X émis par un tube ou un radio istotope. Pour améliorer la sensibilité, la radiation de l'excitation primaire peut être polarisée en utilisant des cibles spécifiques entre le tube à rayons-X et l'échantillon (ED-Polarisation-XRF). Tous les signaux de fluorescence X caractéristiques émis par les atomes après leur ionisation photoélectrique sont mesurés simultanément par un détecteur semi-conducteur fixe ou un compteur scellé à gaz proportionnel (**Kalnicky et Singhvi, 2001**).

L'intensité des radiations du signal de chaque élément, qui est proportionnelle à la concentration de l'élément dans l'échantillon, est recalculée à partir de courbes de calibration enregistrées (**Lebart et al., 1991**).

II.3.2.2. Principe de la lyophilisation

Le procédé de lyophilisation repose en pratique sur deux opérations chronologiques : la congélation et la déshydratation. La congélation est considérée comme une étape préalable à l'opération de déshydratation. La déshydratation recouvre deux principes physiques : la sublimation de la glace (cristaux formés par congélation) et la désorption finale de la quantité

d'eau résiduelle, non congelée. Cette dernière fraction d'eau peut représenter de 10 à 30 % de l'eau initialement présente dans le produit (Wang, 2000).

◆ Mode opératoire

Des échantillons qui ont fait l'objet de cette analyse sont le sol, les fruits de tomates, les racines et les feuilles des trois traitements, ils sont préparés comme suit :

- Le sol

Les échantillons prélevés à partir des trois sols représentant aux trois traitements sont séchés dans une étuve à 110 °C pendant une heure pour obtenir un sol bien déshydraté.

- Tomates (fruit)

Tous les échantillons réalisés de la tomate obtenus des 03 traitements (T1, T2, T3) sont pelés pour avoir deux matrices à analyser : la peau et la chair (figure 8). La chair de la tomate est bien broyée jusqu'à l'obtention d'une purée, et la peau bien découpée en miettes qui sont par la suite solidifiées à l'aide de l'azote liquide à (-195,79 °C). Les deux matrices sont séchées en premier lieu dans un lyophilisateur pendant cinq jours, suivies d'un second séchage dans une étuve à 105 °C pendant une heure.



Fig.8. Préparation des échantillons de la tomate par la séparation des deux matrices, la peau (A) et la chair (B).

- Racines et feuilles

Les échantillons ont subi un pré séchage à l'air libre pendant une semaine puis transférés dans le lyophilisateur pour optimiser le séchage après avoir été solidifiés par l'azote liquide.

Les échantillons séchés sont broyés à l'aide d'un broyeur manuel puis remplis dans des pastilles en plastiques munis d'un support (Ultra-Thin Mylar Plastique) (figure 9).



Fig.9. Préparation des pastilles (A) broyage des échantillons après séchage, (B) remplissage des pastilles pour l'analyse.

Les pastilles préparées sont introduites une par une dans l'appareil de l'ED-XRF qui relié directement à un ordinateur qui affiche les résultats sous forme de courbes d'intensité. Les concentrations des éléments recherchés sont calculées à partir des intensités données en appliquant le modèle mathématique suivant (eq4) :

$$I_x / I_s \times C_s = C_x \quad (\text{eq4})$$

C_x = concentration de l'élément recherché.

C_s = concentration du standard (Soil-7 = 21.808).

I_x = intensité de l'élément recherché.

I_s = intensité du standard.

II.3.3. Analyses microbiologiques

Nous avons effectué l'étude des paramètres microbiologiques pour les trois types d'eaux, sols et tomates par la méthode du nombre le plus probable (NPP, série de cinq tubes) pour la recherche des germes de contamination (Coliformes Totaux (CT), Coliformes thermo-tolérants *Escherichia coli*, Streptocoques fécaux). Le dénombrement direct sur gélose a été réalisé pour la recherche des germes pathogènes (*Salmonella*, *Vibrio* et *Staphylococcus aureus*) et la flore fongique (levure et moisissure). Ces analyses ont été réalisées au laboratoire d'hygiène de Blida.

- **Préparation des dilutions (Sols, Tomate)**

- Solution mère (S/M) : une masse de 25 g de chaque échantillon est mélangée avec 225 ml d'eau physiologique pour donner une concentration de 10^{-1} .

- Solutions filles (S/F) : 1 ml à partir de de la solution mère est introduit dans 9 ml d'eau physiologique pour une dilution de 10^{-2} et 1 ml de cette dernière est introduit dans 9 ml d'eau physiologique pour préparer une dilution de 10^{-3} (figure 10).

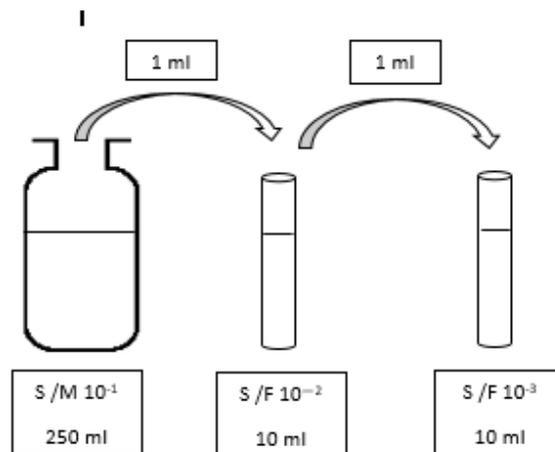


Fig.10. Préparation des dilutions pour les analyses microbiologiques

II.3.3.1. Recherche et dénombrement des coliformes totaux, thermo-tolérants et *Escherichia coli* (NF T 90-411)

- ◆ **Mode opératoire**

Cette technique fait appel à deux tests consécutifs à savoir : le test de présomption : réservé à la recherche des Coliformes totaux et le test de confirmation : appelé encore test de Mac Kenzie, réservé à la recherche des Coliformes fécaux (thermo-tolérants) à partir des tubes positifs du test de présomption.

- Test de présomption

Préparer dans un portoir une série de tubes contenant le milieu sélectif (BCPL) pour les trois types de sol et d'eau et le milieu (VBL) pour les fruits de tomates à raison de cinq tubes par dilution (10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3}).

A partir des dilutions décimales, porter aseptiquement 1 ml dans chacun des cinq tubes correspondant à une dilution donnée. Chassez le gaz présent éventuellement dans les cloches

de Durham, bien mélangé le milieu et l'inoculum et desserrer légèrement les tubes pour assurer un bon dégagement de gaz. L'incubation se fait à 37 °C pendant 24 à 48 heures.

- **Lecture**

Sont considérés comme positifs les tubes présentant à la fois :

- un dégagement gazeux (supérieur au 1/10 de la hauteur de la cloche),
- un trouble microbien accompagné d'un virage du milieu au jaune (ce qui constitue le témoin de la fermentation du lactose présent dans le milieu).

Ces deux caractères étant témoins de la fermentation du lactose dans les conditions opératoires décrites. La lecture finale se fait selon les prescriptions de la table de Mac Grady.

- Test de confirmation (Mac Kenzie)

Les tubes de BCPL trouvés positifs lors du dénombrement des Coliformes totaux feront l'objet d'un repiquage par le prélèvement de 1 ml à l'aide d'une pipette pasteur dans des tubes d'eau peptonée exempte d'indole.

Les tubes de VBL positifs seront repiquer à l'aide d'une anse bouclée dans à la fois sur un tube de VBL muni d'une cloche, et sur un tube d'eau peptonée exempte d'indole. Bien mélanger les tubes. L'incubation se fait cette fois-ci à 44 °C pendant 24 heures.

- **Lecture**

Sont considérés comme positifs, les tubes présentant :

- Un dégagement gazeux dans les tubes de VBL,
- Un anneau rouge en surface, témoin de la production d'indole par *Escherichia coli* après adjonction de 2 à 3 gouttes du réactif de Kowacs dans le tube d'eau peptonée exempte d'indole. La lecture finale s'effectue également selon les prescriptions de la table de Mac Grady.

Etant donné que les Coliformes thermo-tolérants font partie des Coliformes totaux, il est pratiquement impossible de trouver plus de Coliformes thermo-tolérants que de Coliformes totaux.

II.3.3.2. Recherche des *Staphylococcus* (NF en ISO 6888-3)

◆ **Mode opératoire**

Préparation du milieu d'enrichissement en ajoutant 15 ml d'une solution de Tellurite de Potassium à un flacon de 250 ml contenant le milieu de Giolitti Cantoni.

Eau : Remplir trois tubes stériles avec 10 ml du milieu d'enrichissement et ajouter à l'aide d'une pipette graduée 5 ml de l'échantillon.

Fruits de tomate : Ajouter aseptiquement à l'aide d'une pipette graduée 1 ml de la solution mère et les dilutions décimales dans chaque tube correspondants.

L'incubation se fait à 37 °C pendant 24 à 48 heures.

- **Lecture 1**

Seront présumés positifs les tubes ayant virés au noir.

Pour s'assurer qu'il s'agit bien d'un développement de *Staphylococcus aureus*, ces tubes feront l'objet d'une confirmation par isolement sur gélose Chapman préalablement fondue, coulée en boîtes de pétri et bien séchée. Les boîtes de Chapman ainsiensemencées seront incubées à leurs tours à 37 °C pendant 24 heures.

- **Lecture 2**

Après ce délai, repérer les colonies suspectes à savoir les colonies de taille moyenne, lisses, brillantes, pigmentées en jaune. Pour s'assurer qu'il s'agit bien de colonies de *Staphylococcus aureus*, effectuer sur 2 à 3 colonies de chaque boîte des tests biochimiques (catalase et coagulase).

II.3.3.3 Recherche et dénombrement des Streptocoques fécaux (ISO 7899-1)

- **Mode opératoire**

- Test de présomption

Préparer une série de 5 tubes du milieu sélectif ROTHE pour les trois dilutions 10^{-1} , 10^{-2} et 10^{-3} qui seront ensuite incubés à 37 °C pendant 24 à 48 h.

- **Lecture**

Les tubes positifs se manifestent par un virage de la couleur et un trouble bactérien.

- Test de confirmation

Les tubes positifs sont repiqués sur le milieu EVA LITSKY et incubés à 37 °C pendant 24 h.

- **Lecture**

Les tubes pris en considération dans le dénombrement sont ceux présentant un trouble bactérien avec apparition de pastille violette ou blanche. La lecture finale se fait selon les prescriptions de la table de Mac Grady.

II.3.3.4. Recherche des *Vibrions* (ISO /TS 21872-1)

- Enrichissement primaire : Un volume de 450 ml d'eau à analyser estensemencé dans un flacon contenant le milieu eau peptonée alcaline 10 fois concentré, l'incubation se fait à 37 °C pendant 24 h.
- Enrichissement secondaire : A partir de l'enrichissement primaire, nous avons procédé comme suit d'une part à l'enrichissement secondaire sur milieu EPA en tube à raison de 1ml, d'autre part à l'isolement sur gélose GNAB, le tout est incubé à 37 °C pendant 24 h. La boîte de gélose GNAB a fait l'objet d'une lecture en recherchant les colonies caractéristiques grosses et transparentes dégageant une odeur de jasmin.

II.3.3.5. Recherche des *Salmonella* (ISO/TS 6579-2)

- **Mode opératoire**

Pour la recherche des *Salmonella* nous avons prélevé 1 ml des dilutions des trois types de tomates (10^{-1} , 10^2 , 10^3) dans chacun des tubes correspondant de milieu sélectif (SFB + 4 gouttes d'additif sélénite acide de sodium) puis incubé à 37 °C pendant 24 heures. Les tubes positifs virent vers le rouge brique feront l'objet d'un isolement en stries sur le milieu Gélose Hectoén, puis incubés à 37 °C pendant 24 heures. Les colonies de *Salmonella* se présentent le plus souvent en gris bleu à centre noir.

II.3.3.6. Recherche et dénombrement des Levures et Moisissures (NF V08-059)

La recherche des levures et moisissures du sol est réalisée sur Sabouraud au Chloramphénicol, ce milieu permet la croissance des levures et moisissures en inhibant le développement des bactéries.

- **Mode opératoire**

A partir des dilutions décimales, 10^{-3} à 10^{-1} , porter aseptiquement 4 gouttes dans une boîte de pétri contenant le Sabouraud au Chloramphénicol, Etaler les gouttes à l'aide d'un râteau

stérile, puis incuber à 25 °C pendant 5 jours, en présence de boîtes témoins (milieu, eau physiologique).

- **Interprétation des résultats**

Calculer le nombre de colonies à l'aide de la formule ci-dessous : (eq5)

$$N \text{ UFC/ml} = \text{nombre de colonies} \times 3 \times \frac{1}{\text{dilution}} \quad (\text{eq5})$$

Trois répétitions ont été réalisées pour chaque dilution (10^{-1} , 10^{-2} et 10^{-3}) pour tous les paramètres microbiologiques.

II.3.4. Etude statistique

Des tests paramétriques basés sur l'analyse de variance (ANOVA) et l'analyse multivariée des composantes principales (ACP) ont été réalisés. En tenant compte des faibles effets et des variances de condition d'exposition d'une manipulation en utilisant le logiciel STATISTICA version (7).

Chapitre III.

Résultats et discussion

*<<J'ai beaucoup appris avec ''
Apostrophes ''.C'était une façon pour moi
De continuer mes études >>*

Bernard Pivot

Animateur, Journaliste (1935).

III. Résultats et discussion

Nos résultats sont répartis en deux volets : le premier volet présente la caractérisation des eaux brutes et l'efficacité du traitement par les deux procédés : électrocoagulation et boues activées (station d'épuration de Baraki), le second englobe l'impact de la réutilisation de ces eaux traitées en irrigation sur le sol et la culture maraichère de la tomate *Lycopersicon esculentum*.

III.1. Traitement des eaux brutes

III.1.1. Caractérisation des eaux brutes

Avant de procéder à l'étape de la plantation et l'irrigation des cultures de tomates, il a été nécessaire dans un premier temps de caractériser les eaux brutes (EB) (effluent avant traitement). Les concentrations obtenues des paramètres physicochimiques, toxicologiques et microbiologiques sont présentées dans le tableau 11 ci-dessous.

Tableau 11 : Caractérisation des eaux brutes (EB)

| Type de Paramètres | Paramètres | Caractérisation | Normes de rejet (JORA, 2006) |
|---------------------------------|--|-----------------|---------------------------------|
| | pH | 7,4 -7,8 | 6,8-8,5 |
| Paramètres | Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | 1428-1542 | - |
| Physico- chimiques (mg/l) | DCO | 1059 | 120 |
| | MES | 783 | 35 |
| | DBO ₅ | 780 | 35 |
| Dosage des ETM (mg/l) | Aluminium | 2,296 | 0,3 |
| | Plomb | 0,117 | 0,5 |
| | Cuivre | 2,7 | 0,5 |
| | Cadmium | 0,2 | 0,2 |
| | Fer | 5 | 3 |
| | Chrome | - | 0,5 |
| | Zinc | - | 3 |

| | | |
|--|-----------------------------|-------|
| | Germes totaux | >1000 |
| | Coliformes totaux | >1000 |
| | Coliformes fécaux | >1000 |
| Paramètres Microbiologiques (UFC/ml) | <i>Escherichia coli</i> | >1000 |
| | <i>Streptococcus</i> | >1000 |
| | <i>Staphylococcus</i> | >1000 |
| | Levures et moisissures | ≥ 130 |
| | <i>Salmonella/Shigella</i> | Abs |
| | <i>Vibrions cholériques</i> | Abs |
| | | |

(-) Non déterminé, abs (absence)

A l'égard des résultats obtenus, il apparaît clairement que les paramètres de pollution DCO, DBO₅ et MES sont très chargés. L'analyse microbiologique des eaux usées nous a permis de définir que ces eaux présentent une pollution microbiologique vu la charge élevée des germes pathogènes. Ces résultats dépassent largement les normes de rejets recommandées par le **Journal Officiel de la République Algérienne (2006)**. Le rapport DCO/DBO₅ nous indique sur la biodégradabilité des eaux, il détermine l'importance des matières polluantes peu ou non biodégradables (**Rodier, 1996**). Les eaux brutes de la station de Baraki sont faiblement biodégradables avec un rapport de 1,35.

Concernant les éléments métalliques en traces (ETM) ont montré des concentrations similaires aux normes de rejet à l'exception de l'aluminium est de 2,2 mg/l qui dépasse la norme fixée à 0,3 mg/l.

III.1.2. Caractérisation des eaux traitées

III.1.2.1. Paramètres physico-chimiques et toxicologiques

Nous rapportons, dans le tableau 12, les résultats des paramètres physicochimiques et des éléments toxiques des eaux usées traitées par le procédé d'électrocoagulation (ETec) et par boues activées (ETba).

Tableau 12 : Paramètres physicochimiques et toxicologiques (ETM) des eaux traitées par électrocoagulation et par boues activées.

| | Electrocoagulation (60min) | Boues activées | Normes d'irrigation |
|--|-------------------------------|----------------|-------------------------------|
| pH | 8,5-9 | 7,7-7,90 | $6,5 \leq \text{pH} \leq 8,5$ |
| Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | 1231-1446 | 1450-1537 | 6000 |
| MES (mg/l) | 10-45,2 | 14-71 | 30 |
| DCO (mg/l) | 38-74,4 | 38-104 | 90 |
| DBO ₅ (mg/l) | 12-32 | 11-36 | 30 |
| Al (mg/l) | 0,04055 | 0,137 | 20,0 |
| Cu (mg/l) | 0,1591 | 0,09 | 5,0 |
| Cr (mg/l) | 0,00410 | - | 1,0 |
| Fe (mg/l) | 0,87-14,5 | 2,3 | 20,0 |
| Zn (mg/l) | 0,353 | 0 | 10,0 |
| Cd (mg/l) | 0,0006 | 0,006 | 0,05 |
| Pb (mg/l) | 0,032 | 0,021 | 10,0 |

(-) Non déterminé

Il en ressort de ces résultats l'efficacité des deux traitements sur l'ensemble des paramètres étudiés que nous allons détailler dans la partie qui suit.

III.1.2.1.1. Potentiel hydrogène (pH)

La figure 11 montre une augmentation du pH après 60 min de traitement par électrocoagulation pour atteindre une valeur basique de 9. Cette augmentation est due à la formation d'ions hydroxydes au niveau de la cathode provenant de la réaction de réduction des molécules d'eau (eq8).



Des auteurs ont montré que durant le processus d'électrocoagulation, le pH de l'eau augmente approximativement d'une unité (**Rubach et Saur, 1997 ; Abuzaid et al., 2002**), ce qui est due au dégagement de l'hydrogène à la cathode (**Vik et al., 1984**). L'emploi d'électrodes de fer conduit à la formation de floccs de couleur vertes au niveau de l'anode à un pH basique, signe de la formation d'hydroxydes ferreux (**Aoudjehane et al., 2010**).

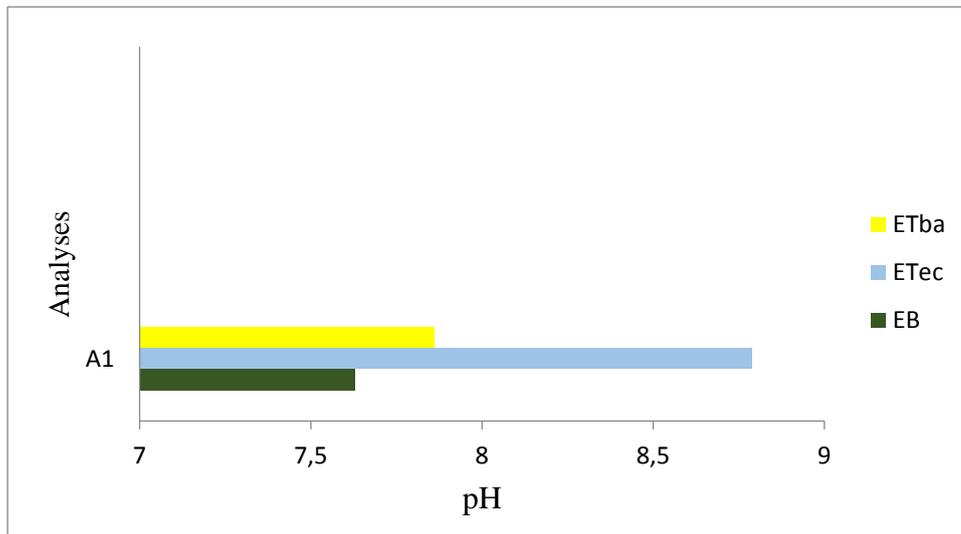


Fig.11. La moyenne des variations de pH après traitement par les deux procédés, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer ($T=25\text{ °C}$, $\text{pH initial}=7,78$, distance entre les électrodes=5 cm, intensité =3 A) ; (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EB) : eau brute, $P < 0.05$.

Une variation négligeable du pH a été constatée pour les ETba qui est de 7,9. Cela montre que le traitement par boues activées n'a pas affecté le pH de l'effluent. Selon **Sevrin et al. (1995)** le pH alcalin et la température modérée des bassins d'aération constituent des conditions de milieu idéales pour la prolifération des algues et des bactéries qui établissent un parfait équilibre biologique permettant la dégradation de la matière organique et la décontamination de l'eau.

III.1.2.1.2. Conductivité électrique

La conductivité électrique (CE) est l'une des plus importantes variables pour le contrôle de la qualité des eaux usées. Elle traduit le degré de minéralisation globale, elle nous renseigne sur le taux de salinité (**Salghi, 2007**). La CE des effluents est en effet un paramètre important à surveiller lors de l'électrocoagulation, car si elle est insuffisante, la résistance du milieu devient très forte et le courant ne circule pas entre les électrodes (**Picard, 2000 ; Mollah et al., 2001**).

Les résultats liés à la CE sont rapportés dans la figure 12, qui montre une diminution assez remarquable à la fin du traitement par le procédé d'électrocoagulation où des valeurs oscillent entre 1231 et 1446 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour les trois caractérisations réalisés (Mollah *et al.*, 2004). Ceci est probablement dû à la neutralisation de l'eau au cours du traitement. Ce résultat est similaire avec plusieurs travaux effectués par Boudjema *et al.* (2014) ; Mameri *et al.* (2001) et Mollah *et al.* (2004).

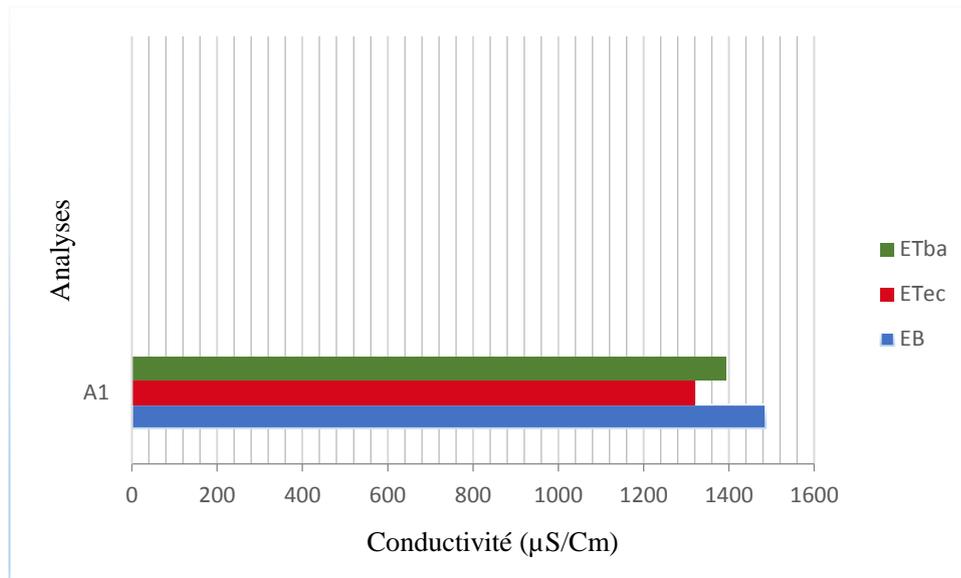


Fig.12. La moyenne des variations de la conductivité électrique après traitement par les deux procédés, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer (T 25 °C, CE initiale = 1542, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité =3 A) ; (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EB) : eau brutes, $P < 0.05$.

La conductivité électrique des ETba est comprise entre 1450 et 1537 $\mu\text{S}/\text{cm}$, est pratiquement stable en comparaison avec la CE des eaux brutes. D'après Loulah (1995) et Rodier (1996), ces eaux présentent une minéralisation élevée, ceci est probablement dû à un apport massif de détergents et produits chimiques apportés par les eaux brutes.

III.1.2.1.3. Matières en suspension (MES)

Les matières en suspension sont en majeure partie de nature biodégradable. La plus grande part des micro-organismes pathogènes contenus dans les eaux usées est transportée par les MES. Elles donnent également à l'eau une apparence trouble, un mauvais goût et une mauvaise odeur. Cependant, elles peuvent avoir un intérêt pour l'irrigation des cultures (Faby *et al.*, 1997).

La concentration de MES obtenue au bout de 60 min de traitement par électrocoagulation est d'une moyenne de 27 mg/l. En comparaison avec les EB, la réduction de la charge en matières en suspension est très élevée (figure 13). Nos résultats sont proches de ceux trouvés par **Camilleri (1980)** sur le traitement de rejet urbain par électrocoagulation-flottation ; et à celui signalé par **Debillemont (1996)**. Cette élimination est probablement due à la formation des floes au cours du traitement et leur décantation avec les matières en suspension au fond de l'électrolyte. La coagulation-floculation facilite l'élimination de MES et des colloïdes en les rassemblant sous forme de floes dont la séparation s'effectue par décantation, flottation et/ou filtration (**Ketbar et al., 1988; Ketbar et al., 1991 ; Khosla et al., 1991 ; Maes, 1994 ; Zongo, 2009**).

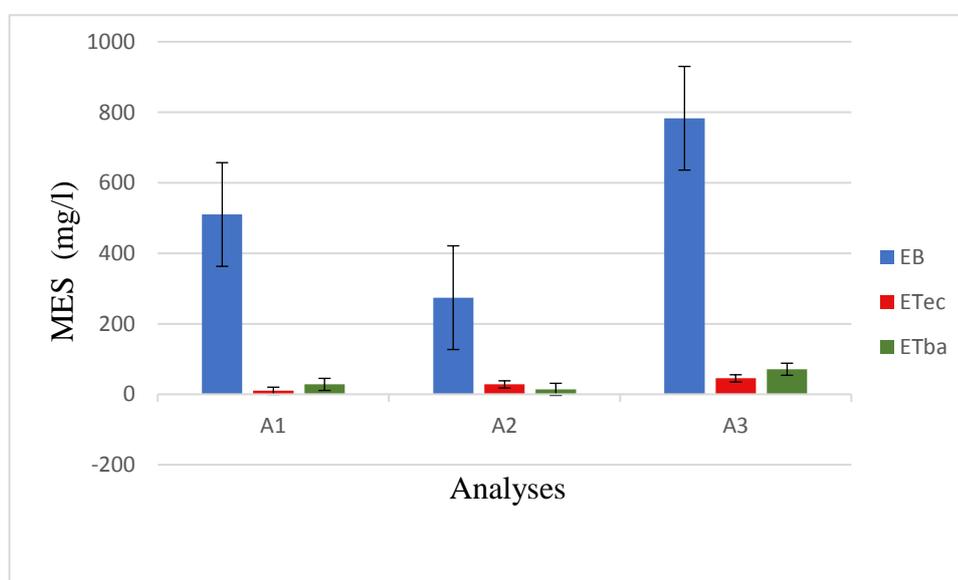


Fig.13. Variations de Matières En Suspension après traitement par les deux procédés (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer (T 25 °C, MES initiales = 783, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité = 3 A) ; (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EB) : eaux brutes, $P < 0.05$.

Lors de nos traitements par le procédé d'électrocoagulation, nous avons observé la formation de mousse et leur flottation au début du traitement suivi par formation des floes, ces derniers sont décantés vers la fin du traitement au fond de l'électrolyte (figure 14).



Fig.14. Etapes de la formation de mousse et de floccs au cours du traitement par le procédé d'électrocoagulation. (a) Flottation de mousse, (b) Décantation des floccs, (c) Filtration de l'eau traitée.

Le mécanisme d'élimination de la matière organique est principalement dû à la neutralisation de la charge et la compression des colloïdes formés avec des hydroxydes ferreux et leur instabilités dans la solution causée par électrocoagulation (**Pouet *et al.*, 1992 ; Pouet et Grasmick, 1995 ; Bratby, 2006 ; Vepsalainen *et al.*, 2012 ; Boudjema *et al.*, 2016 b**).

Concernant la concentration moyenne de MES des ETba est de 38 mg/l, l'élimination de ces dernières est importante. Cette élimination est due à la dégradation de la matière organique par les micro-organismes présents dans le bassin d'aération. Et par adsorption des matières polluantes sur flocc-bactérien.

III.1.2.1.4. Demande Chimique en Oxygène (DCO)

La concentration initiale de la DCO des EB porte une charge élevée comprise entre 80 à 1059 mg/l. D'après **Cardot (1999)**, cette valeur élevée de la DCO s'explique par la présence d'une fraction des matières organiques non biodégradables provenant d'un rejet industriel, ce qui est peut être à l'origine de ce dépassement.

La figure 15 montre une diminution significative de la DCO dans les eaux usées traitées par électrocoagulation avec une moyenne de 59 mg/l. D'après l'étude réalisée par **Kuokkanen *et al.* (2013)**, une partie de la DCO est éliminée par réduction cathodique. Les composés organiques présents sous forme de particules ou colloïdales sont déstabilisés par la neutralisation qui est imposé à la présence d'ions $Fe^{2+/+3}$ produit par dissolution anodique. Aussi, les particules déstabilisées peuvent plus facilement flocculer et être séparées de la phase aqueuse grâce à la formation de bulles de gaz hydrogène (H_2) générées à la cathode.

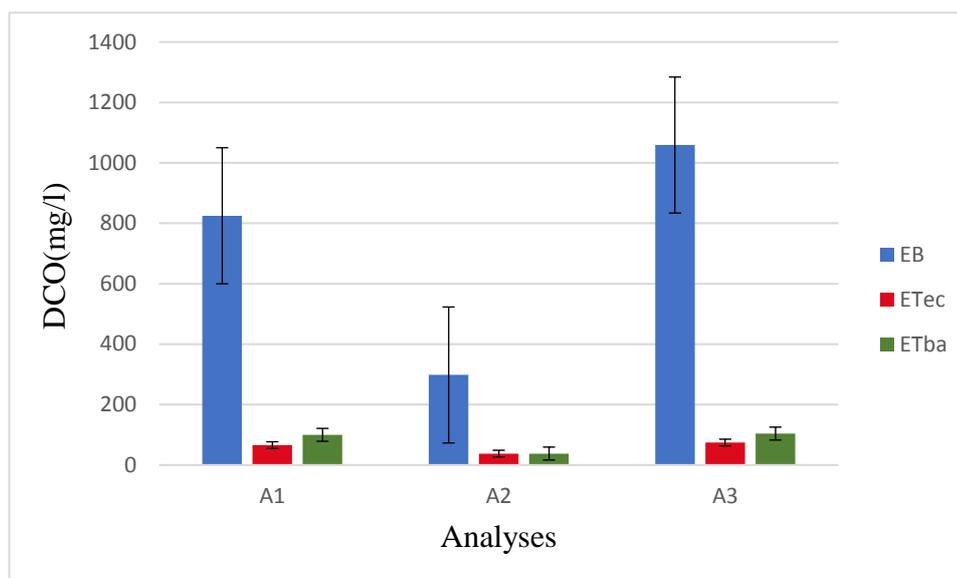


Fig.15. Variations de la DCO après traitement par les deux procédés, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25 °C, DCO initiale = 1059, distance entre les électrodes= 5 cm, intensité=3 A) ; (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EB) : eaux brutes, $P < 0.05$.

Quelle que soit la nature d'électrodes utilisée et les valeurs de l'intensité du courant appliquées, l'abattement de la DCO augmente de façon régulière avec l'électrocoagulation et ce en fonction du temps (Mollah *et al.*, 2004 ; Khemis *et al.*, 2006 ; Chih-TaWanga, 2009 ; Khennoussi *et al.*, 2013 ; Boudjema *et al.*, 2015). Dans notre cas, l'abattement de la DCO est obtenu avec des électrodes de fer et une intensité du courant de 3 A pendant 60 minutes de traitement. Cette observation a été constatée par plusieurs auteurs, citant le cas des effluents textiles traités avec des électrodes de fer (Daneshvar *et al.*, 2003 ; Can *et al.*, 2006 ; Zongo *et al.*, 2011) et avec les électrodes d'aluminium (Kobyia *et al.*, 2003 et 2006) et des effluents de tannerie traités avec des électrodes en fer (Babu *et al.*, 2007).

Le traitement de ces eaux par boues activées a montré une élimination significative pour atteindre une moyenne de 80 mg/l. Ceci est due à la prolifération de la biomasse bactérienne qui s'agglomèrent et forment le floc bactérien. Les matières organiques polluantes vont être captées par ces floes et former des boues activées qui sont brassées et assurent l'épuration des eaux usées dans le bassin d'aération.

III.1.2.1.5. Demande Biochimique en Oxygène (DBO₅)

La demande biochimique en oxygène après 5 jours d'un échantillon est la quantité d'oxygène consommée par les micro-organismes aérobies présents dans cet échantillon pour l'oxydation biochimique des composés organiques et/ou inorganiques (Rejsek, 2002).

La concentration de la DBO₅ dans les eaux traitées par électrocoagulation est d'une moyenne de 24 mg/l. Une diminution très significative de la DBO₅ est observée après 60 min de traitement avec des électrodes en fer. Ceci est dû à l'élimination d'une partie de la matière organique et en matière en suspension par la décantation de ces dernières sous formes de colloïdes adsorbés aux floes (hydroxydes ferreux) formés par le procédé d'électrocoagulation (figure 16).

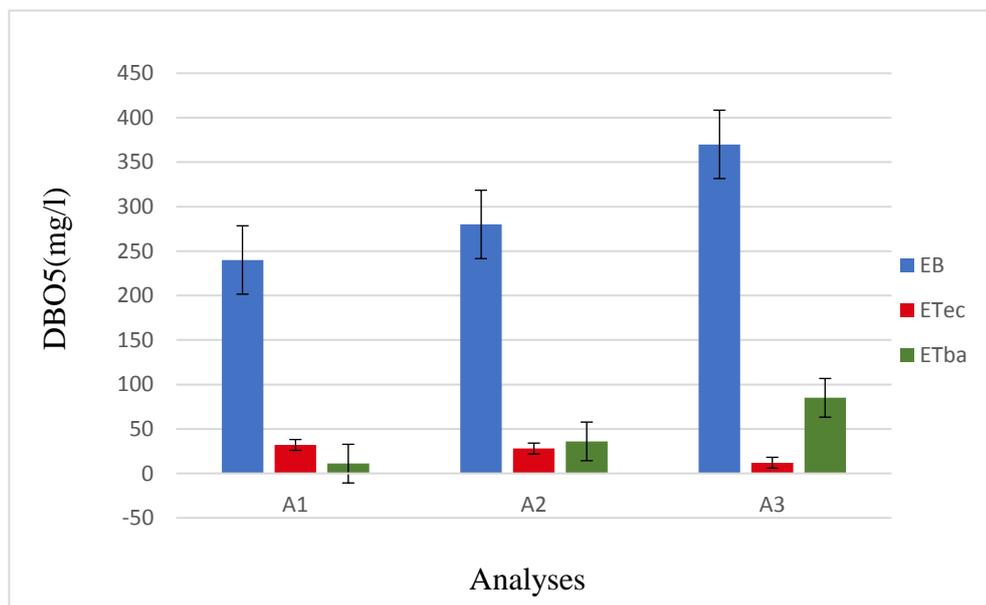


Fig.16. Variations de la DBO₅ après traitement par les deux procédés, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25 °C, DBO₅ initiale = 780, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité=3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EB) : eaux brutes, P< 0.05.

Tandis que les eaux traitées par boues activées portent une moyenne de 44 mg/l. D'après Cardot (1999) la diminution de la DBO₅ est due à l'activité des micro-organismes épuratrices qui assurent la dégradation et la transformation de la matière organique en CO₂, H₂O et NH₃ permettant donc l'élimination de la pollution organique, ainsi que le bon fonctionnement du clarificateur qui assure une décantation efficace favorisant la sédimentation des boues responsables à l'élimination de la quasi-totalité de la DBO₅.

III.1.2.1.6. Eléments trace métalliques (ETM)

La caractérisation des eaux brutes révèle des concentrations faibles en éléments traces métalliques (Al, Fe, Cu, Cd, Zn, Pb). La concentration moyenne des ETM obtenue après 60 min de traitement par électrocoagulation présente une diminution significative pour l'ensemble des ETM à l'exception du fer (figure 17). Ce dernier a augmenté à la fin du traitement. Selon **Wery (2000)** le procédé d'électrocoagulation génère au cours du traitement des cations solubles $Fe^{2+/3+}$, les cations se transforment en leur hydroxydes permettant une précipitation des ETM. La présence d'une quantité importante de fer est due au fait que les électrodes de fer s'usent au cours de la réaction (**Zodi, 2012**).

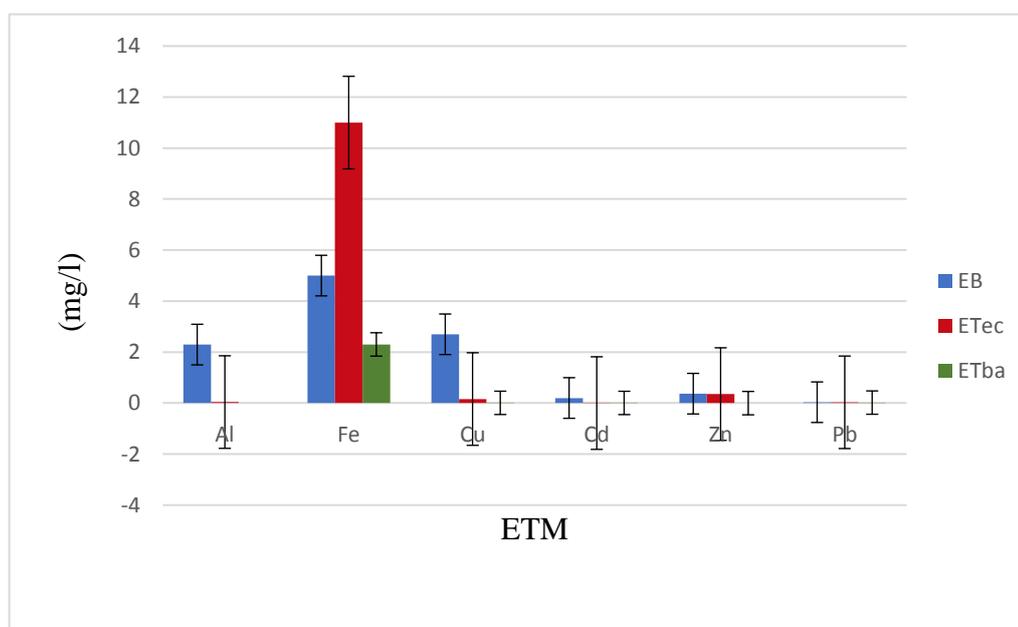


Fig.17. Variations des ETM après traitement par les deux procédés, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation (T 25 °C, distance entre les électrodes en fer= 5 cm, intensité=3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EB) : eaux brutes, $P < 0.05$.

Selon **Nicholson et al. (1999)** l'élimination des éléments traces métalliques dans les eaux traitées par boues activées est due à la décantation gravitaire et cela revient essentiellement à leur présence dans les particules sédimentaires et non dans celles qui restent en suspension dans le surnageant.

III.1.2.2. Paramètres microbiologiques

Le tableau 13 englobe les résultats de l'analyse microbiologique dans les trois types d'eau (Eau brute, eaux traitée par électrocoagulation et par boues activées)

Tableau 13 : Paramètres microbiologiques recherchés dans les eaux brutes (EB), les eaux traitées par électrocoagulation (ETec) et par boues activées (ETba).

| Paramètres (UFC/100 ml) | EB | ETec | ETba |
|----------------------------|-------|------|------|
| CT | >1000 | 25 | 37 |
| CF | >1000 | 7 | 11 |
| <i>Escherichia coli</i> | >1000 | 0 | 1 |
| <i>Streptocoque fécaux</i> | >1000 | 6 | 13 |
| <i>Staphylococcus</i> | >1000 | 0 | 0 |

III.1.2.2.1. Les coliformes totaux

Nos résultats ont montré que les coliformes totaux sont très répandus dans les eaux brutes. Ceci résulte à l'abondance des nutriments, oxygène dissous, le pH alcalin et la température modérée ce qui constitue des conditions de milieu idéales pour la prolifération des bactéries (Sevrin *et al.*, 1995).

Après 60 min de traitement par le procédé électrocoagulation nous avons noté une réduction très importante des coliformes totaux pour atteindre une moyenne de 25 UFC/100 ml (figure 18). Cette diminution peut être attribuée au courant électrique imposé dans la solution qui est supérieur à celui existant au niveau de la membrane bactérienne, et qui peut avoir un effet bactéricide (Eynard *et al.*, 1999).

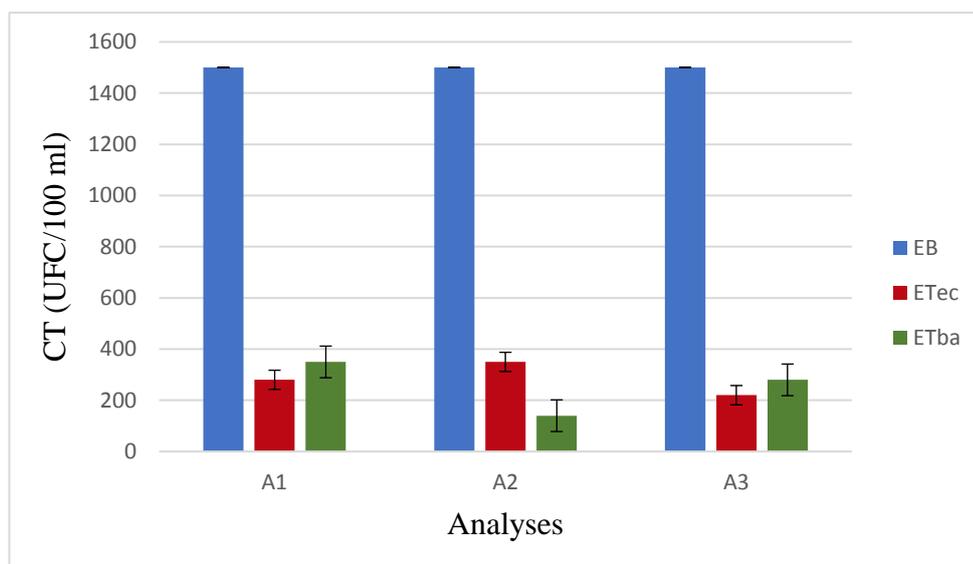


Fig.18. Variations des CT après traitement par les deux procédés, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25 °C, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité= 3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EB) : eaux brutes, $P < 0.05$.

Le traitement par boues activées élimine à son tour une fraction très importante des coliformes totaux avec une moyenne de 37 UFC/100 ml. Selon **Shang *et al.* (2005)**, le processus d'élimination des micro-organismes le plus consistant est leur association avec les floccs préformés par la boue activée et leur élimination par décantation de ces floccs.

III.1.2.2.2. Coliformes thermo-tolérants et *Escherichia coli*

Lors de notre étude, le traitement par électrocoagulation et par boues activées ont réduit considérablement la pollution microbienne à savoir les coliformes thermo-tolérants (CF) qui est de 7 UFC/100 ml et 11 UFC/100 ml, respectivement. Cette élimination se fait par le même principe que les CT.

Selon **Chitnis (2004)** qui a remarqué une différence entre la concentration en bactéries de l'eau et celle de la boue biologique du décanteur ; il affirme donc que les bactéries adhèrent aux particules en suspension. Selon lui, l'aération permettrait la ségrégation des bactéries fermement accrochées aux matières en suspension, et le décanteur permettrait la séparation de ces matières en suspension. Donc, un décanteur efficace qui élimine les matières en suspension de l'eau, joue un rôle primordial dans la réduction microbiologique. Cette élimination est corrélée positivement avec le temps de rétention des eaux usées dans le bassin.

Concernant l'indicateur de contamination fécale *Escherichia coli* a montré son élimination totale au bout de 60 minutes de traitement par électrocoagulation et une réduction élevée par les boues activées (1 UFC/100 ml).

La plupart des auteurs considérant que la cause de la réduction des bactéries par électrocoagulation est dû principalement à l'importance du champ électrique créé entre les électrodes qui provoque la destruction des composants de la cellule (**Persin et al., 1989 ; Boudjema et al., 2014 et 2017**).

Selon **Boudjema et al. (2014)** la membrane cytoplasmique d'*Escherichia coli* traitée par le champ électrique laisse apparaître une déchirure par la formation des pores désordonnés. La paroi et la membrane cytoplasmique sont complètement altérés ce qui a provoqué un échappement du cytoplasme vers l'extérieur de la cellule au la fin du traitement, et éventuellement la mort d'*Escherichia coli*. Ce qui explique qu'elle est beaucoup moins résistante dans l'environnement ou à des traitements de désinfection effectués dans les stations d'épuration (**Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France, 1995**).

III.1.2.2.3. Streptocoques fécaux

La recherche de streptocoques fécaux ne doit être considérée que comme un complément à celle des coliformes thermo-tolérants pour être le signe d'une contamination fécale. (**Joseph et Salvato, 1958**).

Les eaux analysées à la fin du traitement d'électrocoagulation révèlent une efficacité pour l'élimination des streptocoques qui atteint une moyenne de 6 UFC/100 ml. L'élimination très importante des germes par ce procédé pourrait s'expliquer par plusieurs phénomènes à savoir : Le champ électrique créé entre les électrodes qui joue un rôle très important ; il aurait un effet bactéricide sur l'ensemble des micro-organismes présents dans le milieu (**Patermarakis et al., 1990**). En outre durant l'électrocoagulation il y'a formation de certains oxydants comme l'eau oxygénée ou les acides hypochloreux (0,2 mg/l) obtenus sous l'effet de l'oxydation des chlorures l'acide hypochloreux ne comporte aucune charge électrique, ce qui lui permet de franchir efficacement la membrane cytoplasmique de la cellule bactérienne et provoquer sa mort en affectant certains processus du métabolisme bactérien (**Debillemont, 1996 ; Winter et al., 2008 ; Prutz, 1998**) (figure 19).

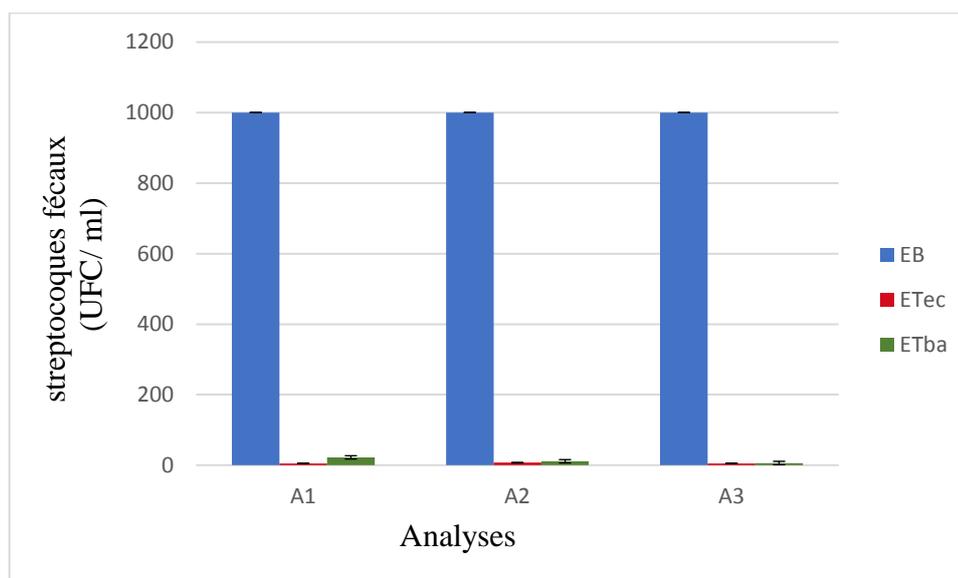


Fig.19. Variations des Streptocoques fécaux après traitement par les deux procédés, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25 °C, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité =3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EB) : eaux brutes, $P < 0.05$.

Les eaux traitées par boues activées présentent une grande efficacité en terme d'abattement des streptocoques fécaux qui arrive jusqu'à 13 (C/100 ml). Selon **Beupoil et al. (2010)** les streptocoques fécaux peuvent survivre jusqu'à deux mois dans une eau non traitée mais sont très sensible à la chloration, étant rapidement inactivé par une concentration de chlore résiduel libre variant de 0.1 à 1 mg/l. Après avoir effectué le test de chloration pour les eaux traitées par boues activées nous avons constaté que la concentration du chlore dans ces eaux est comprise entre 0.1 et 0.2 mg/l.

Selon **Asano (1998)**, l'efficacité du traitement des eaux par boue activée dans l'élimination des bactéries a lieu grâce à la sédimentation de MES, la compétition avec les micro-organismes non pathogènes et la température ; la part la plus importante est due à la sédimentation.

III.1.2.2.4. Germes pathogènes

Les bactéries pathogènes des genres *Staphylococcus* n'ont pas été détectées dans les deux traitements, l'eau traitée par électrocoagulation et par boues activées.

III.1.3. Rendement d'abattement des paramètres de pollution par EC et BA

Une étude comparative sur l'efficacité de traitement par les deux procédés électrocoagulation (EC) et boues activées (BA) a été effectuée par le calcul du rendement (%) de traitement pour chaque paramètre étudié. Les résultats obtenus sont rapportés dans le tableau 14. Ce dernier nous a permis de constater que le traitement d'électrocoagulation est similaire

voir meilleur que celui des boues activées en termes d'abattement des paramètres physico-chimiques, toxicologiques (ETM) et microbiologiques. Le procédé d'électrocoagulation est très efficace en termes d'abattement des germes de contamination coliformes totaux, thermo-tolérants et streptocoques fécaux qui dépassent 95 % et 100 % pour *E. coli* et *Staphylococcus*.

Tableau 14 : Rendement du traitement des eaux usées par le procédé d'électrocoagulation et celui de boues activées

| Paramètres | Rendement (%) | |
|-----------------------------|---------------|-------|
| | ETba | ETec |
| DCO | 93,4 | 94,7 |
| DBO ₅ | 97 | 98 |
| MES | 95 | 97 |
| Al | 94 | 98 |
| Cu | 96 | 94 |
| Pb | 82 | 73 |
| Cd | 97 | 99,7 |
| Coliformes Totaux | 96,3 | 97,5 |
| Coliformes thermo-tolérants | 98,9 | 99,33 |
| <i>Escherichia coli</i> | 99 | 100 |
| <i>Streptocoque fécaux</i> | 88 | 99 |
| <i>Staphylococcus</i> | 100 | 100 |

Nos résultats sont similaires à ceux trouvés par plusieurs auteurs (**Servais *et al.*, 2001 ; Ghernouat *et al.*, 2008**). Toutefois, les résultats obtenus par les deux procédés sont conformes aux normes algériennes d'irrigation fixées par **JORA (2012)** et à la directive concernant la qualité microbiologique des eaux usées utilisées en agriculture prescrite dans la catégorie A (**OMS, 1989**) (tableau 17 Annexe I), de ce fait ces eaux usées traitées peuvent faire l'objet d'une réutilisation dans le domaine agricole sur le plan microbiologique et physico-chimique.

III.1.4. Etude statistique

L'analyse des composantes principales réalisée sur l'ensemble des variables étudiées (figure 20) a montré une corrélation significative entre les facteurs physico-chimiques pour les deux traitements. Sur le facteur F1 de 67,95 % d'inertie, les variables sont rassemblées en deux groupes. Le premier définit les paramètres de pollution (MES, DCO, DBO5) qui sont corrélés positivement, ce dernier est corrélé négativement avec le second groupe qui est représenté par un seul paramètre physique la conductivité électrique (CE).

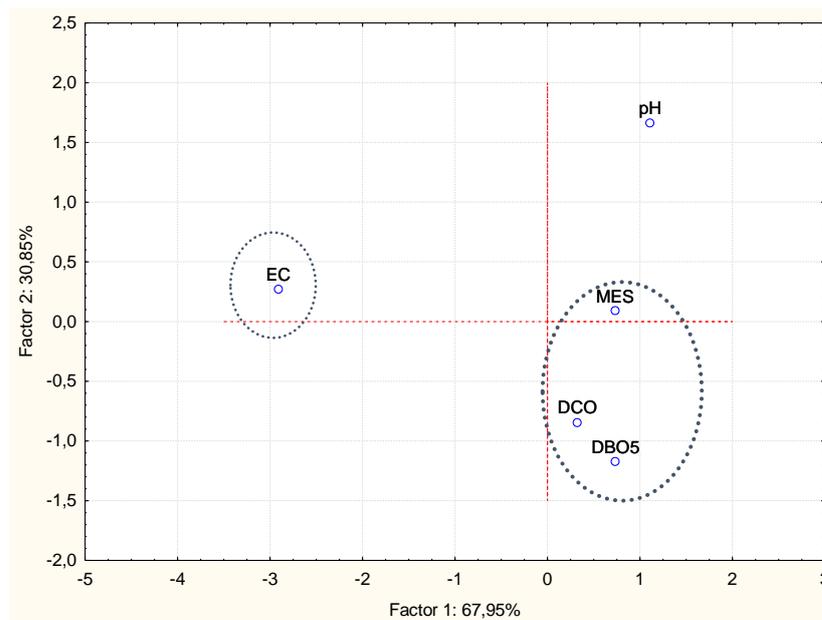


Fig.20. Analyse de composante principale des paramètres physico-chimiques des deux traitements (électrocoagulation et boues activées)

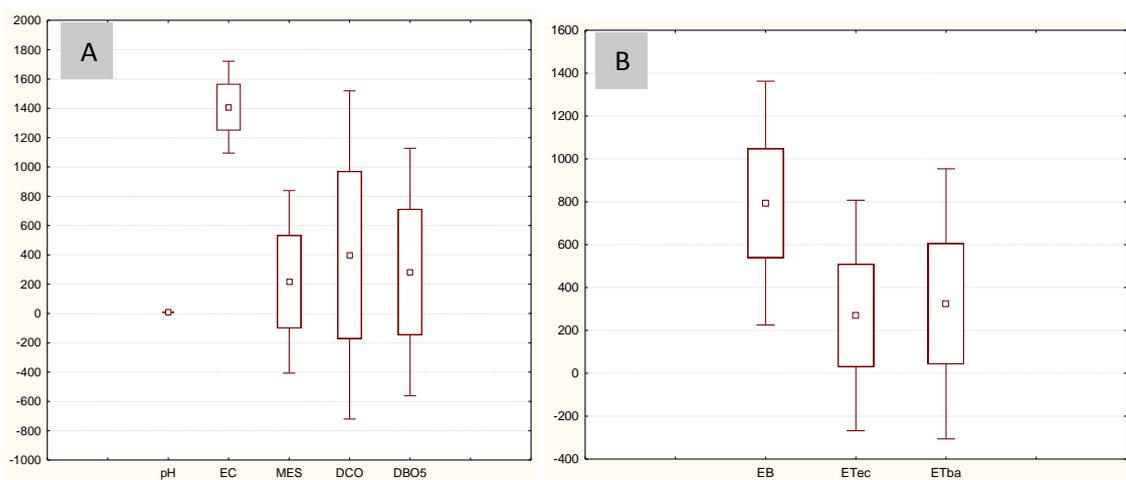


Fig.21. (A) Ordination des variables abiotiques (pH, CE, MES, DCO, DBO5), (B) Efficacité du traitement (électrocoagulation et boues activées) sur la réduction des paramètres de pollution.

La figure 21 (A) montre clairement les corrélations existantes entre les paramètres de pollution et CE, L'élimination de MES et en relation avec la réduction de la DCO et de la DBO5. La figure (B) traduit l'efficacité du traitement des eaux usées par le procédé d'électrocoagulation par rapport au traitement de boue activée. L'analyse de variance ANOVA a montré une différence significative entre les deux traitements (Electrocoagulation et boues activées) avec un coefficient de corrélation ($R^2=0,99$) et $p < 0,05$.

III.2 Culture et irrigation

III.2.1. Caractérisation du sol utilisé

Une caractérisation du sol utilisé a été réalisée avant de passer à l'étape de la plantation des plants de tomate *Lycopersicon esculentum* dans des pots en plastiques sous serre. Les résultats des paramètres physiques, microbiologiques et toxicologiques (ETM) sont présentés dans le tableau 15.

Tableau 15 : Caractéristique physiques microbiologiques et toxicologiques du sol utilisé.

| Paramètres | | Résultats |
|--|--------------------------------|-------------------|
| Physiques | pH | 7,48 |
| | CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | 17,72 |
| Toxicologiques (ETM) ($\mu\text{g}/\text{g}$) | Al | 0,75 |
| | Fe | 3,77 |
| | Pb | 4,94 |
| | Cu | 7,52 |
| | Cr | 47,88 |
| Microbiologiques (UFC/100 ml) | Cd | <LID |
| | Zn | 35,41 |
| | CT | 11×10^3 |
| | CF | 0 |
| | <i>E. Coli</i> | 0 |
| | Champignons | 102×10^3 |

(LID) : limite inférieure de détection

Nous avons choisi de caractériser le sol avant plantation pour connaître les charges et les concentrations initiales des différents paramètres afin de pouvoir déterminer l'impact de l'irrigation avec les eaux usées traitées (EUT) sur le sol.

Le sol utilisé est de nature sableuse, présente une charge importante en coliformes totaux (11×10^3 UFC/100 ml) et riche en flore fongique (102×10^3 UFC /100 ml).

III.2.2. Après plantation et irrigation

Une cinétique des paramètres physique (pH, conductivité), ETM et paramètres microbiologiques (CT, CF, *E. coli* et champignons) du sol a été réalisée pour les trois traitements effectués (eau de puits EP, ETec et ETba). Un suivi de l'étude est respecté de la plantation jusqu'à la récolte des fruits.

III.2.2.1. Paramètres physiques

III.2.2.1.1. Potentiel hydrogène (pH)

Après un mois d'irrigation avec les trois types d'eau, nous avons constaté une décroissance du pH pour les trois types de sol (figure 22). Cette diminution du pH est due suite à l'irrigation par les EUT, nos résultats sont similaires avec plusieurs auteurs (**Yadav et al., 2002 ; Abbass et al., 2007 ; Rattan et al., 2005 ; Solis et al., 2005 ; Herpin et al., 2007**). Certains auteurs expliquent cette diminution par l'oxydation de la matière organique (MO) et par la nitrification de l'ammonium du sol. Le lessivage par les eaux d'irrigation, des calcaires actifs responsables de l'alcalinité du sol est également une explication souvent invoquée (**Solis et al., 2005**). Une augmentation du pH est constatée à partir de 45 jours de culture.

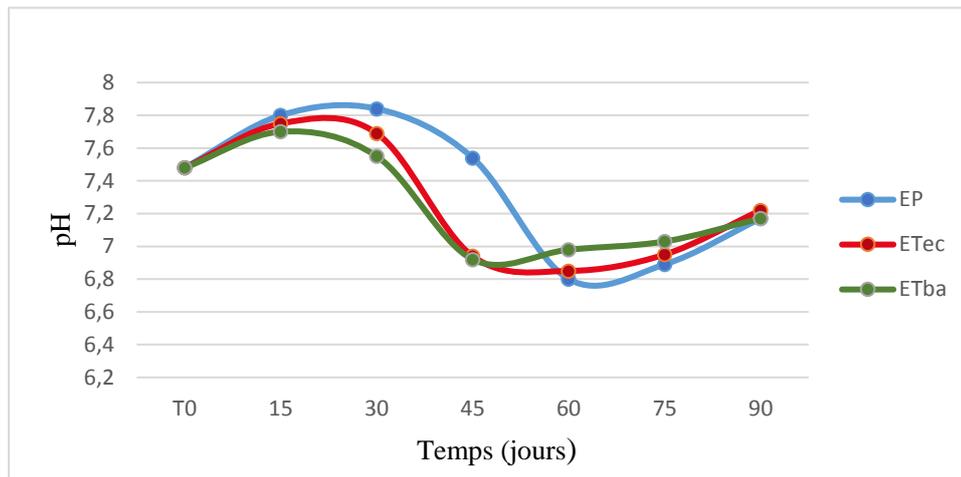


Fig.22. Cinétique du pH en fonction du temps (pendant 90 jours) au cours de l'irrigation par les trois types d'eau, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25 °C, pH initial=7,78, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité =3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EP) : eau de puits.

III.2.2.1.2. Conductivité

La conductivité électrique définit la quantité totale des sels solubles correspondant à la salinité globale du sol. Elle dépend de la teneur et de la nature des sels présents dans le sol (Guessoum, 2001). L'ensemble des résultats illustrés dans la figure 23 montre une augmentation de la conductivité électrique en fonction du temps, en comparant au sol témoin non irrigué qui présente une valeur de 17,72 mS/cm. Une stabilisation de EC s'installe à partir de 45 jours d'irrigation, et ce pour les trois types d'eau utilisées.

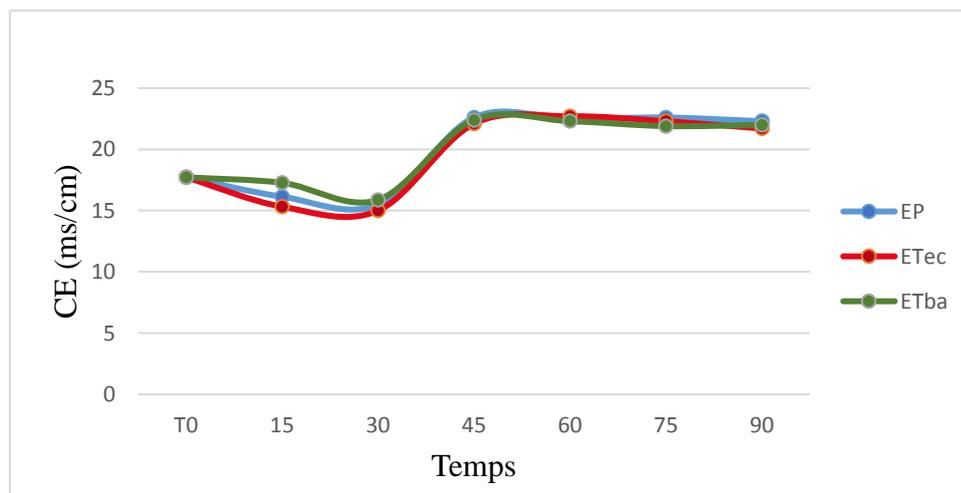


Fig.23. Cinétique de la CE en fonction du temps (pendant 90 jours) au cours de l'irrigation par les trois types d'eau, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25 °C, CE initiale= 1542, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité =3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EP) : eau de puits.

Selon **Belaid (2010)**, l'augmentation de la salinité des sols irrigués est due, essentiellement à la qualité des eaux utilisées (eau de puits, ETec, ETba) chargées en sels, à l'évapotranspiration très intense durant la saison estivale et à l'absorption de l'eau par les plantes et aussi à la grande quantité d'eau épandue en sur dose durant l'été pour satisfaire les besoins des cultures. Notant que la CE des ETec et ETba utilisées dans l'irrigation est plus au moins élevée.

Les variations du pH et de la CE du sol s'expliquent par l'augmentation de la température saisonnière et par l'effet de serre engendrant une forte évaporation de l'eau ce qui augmente la concentration en ions d'où une diminution du pH et la concentration des sels favorisant l'élévation de la conductivité électrique.

III.2.2.2. Eléments traces métalliques (ETM)

Afin d'interpréter les résultats des dosages des ETM (Al, Fe, Cr, Cu, Pb, Zn), nous avons calculé la moyenne des concentrations de chaque élément cité dans les échantillons obtenus sous forme d'intensité à partir du spectromètre ED-XRF. Les concentrations obtenues pour les quatre types de sol (sol irrigué avec EP, sol irrigué avec EC et sol irrigué avec BA) sont comparés au sol témoin T (figure 24 /25).

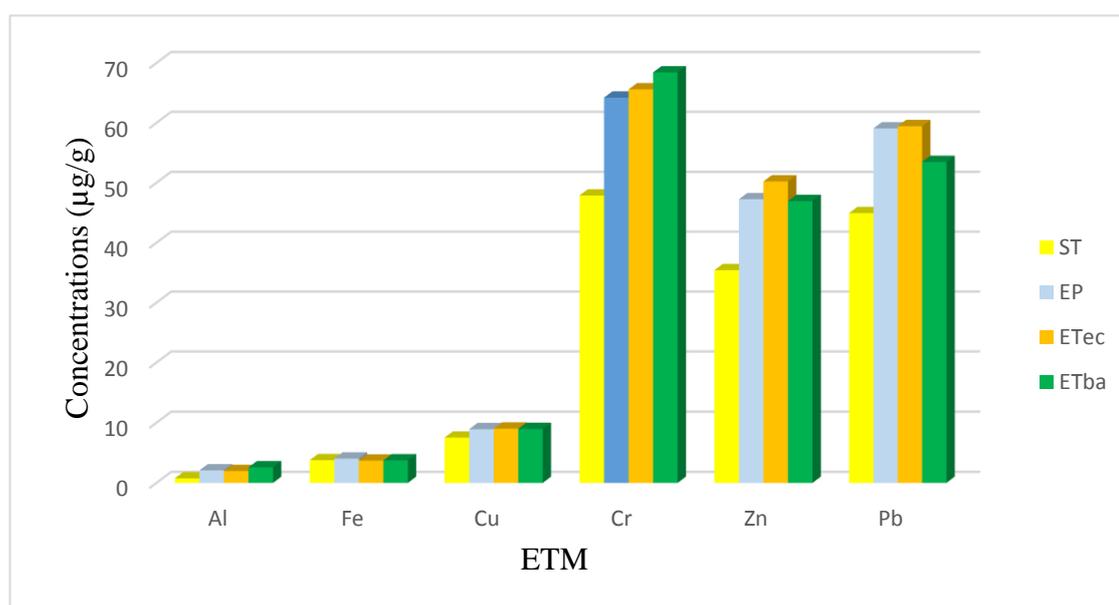


Fig.24. Variations des ETM dans le sol après traitement par les deux procédés, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25 °C, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité = 3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EP) : eau de puits ; (ST) : sol témoin.

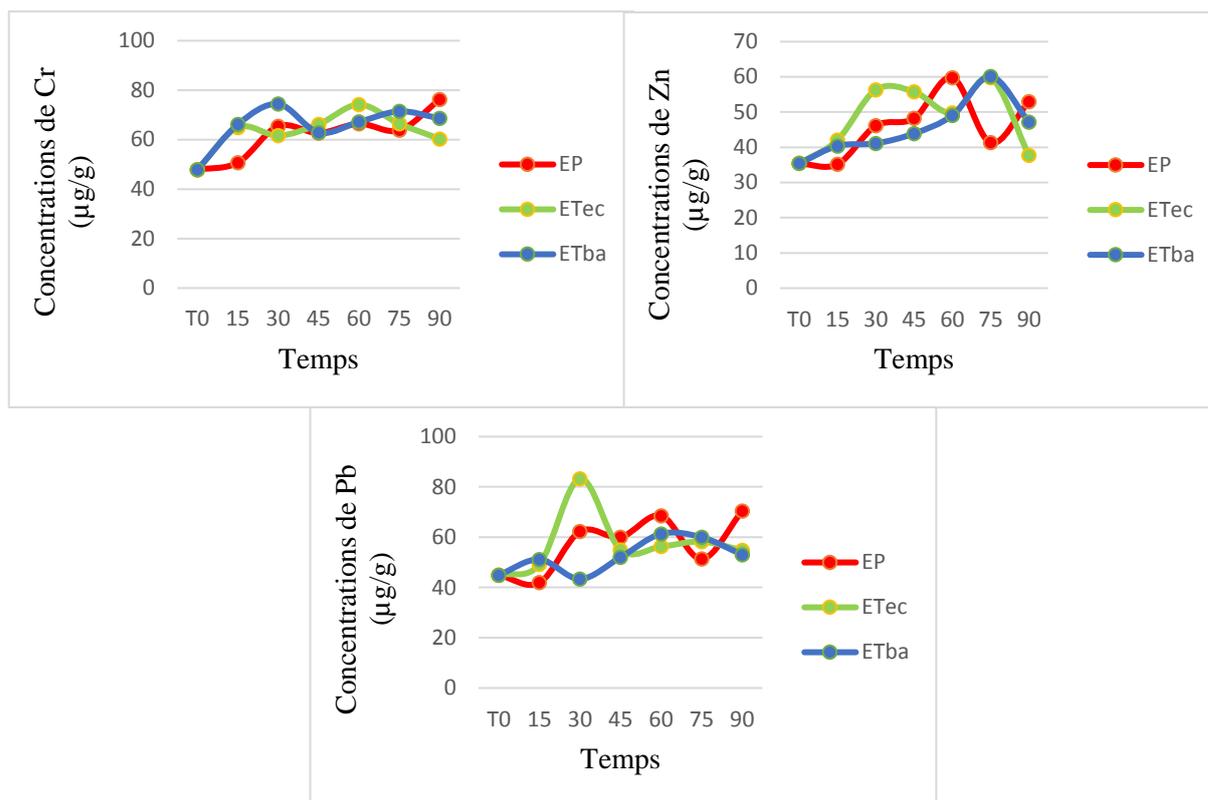


Fig.25. Cinétique des ETM (A : Cr ; B : Zn ; C : Pb) en fonction du temps (pendant 90 jours) au cours de l'irrigation par les trois types d'eau, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25 °C, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité = 3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EP) : eau de puits.

Bien que la concentration en métaux dans les eaux usées surtout traitées soit faible, l'irrigation peut, à terme, entraîner l'accumulation de ces éléments dans le sol (**Rattan et al., 2005**), ce qui explique l'augmentation des ETM dans le sol après irrigation. A la lumière des résultats obtenus, il apparaît clairement que l'apport de certains EMT (Cr, Zn et Pb) est important dans le sol venant des EUT par électrocoagulation et par boues activées.

III.2.2.3. Paramètres microbiologiques

III.2.2.3.1. Coliformes totaux

D'après la figure 26, une diminution de la charge des CT est observée dès le 15 jours d'irrigation en comparant avec la charge initiale du sol témoin (avant plantation). Cette décroissance est en relation directe avec le lessivage des sols. Selon **Campos et al. (2000)**, en cas d'irrigation par les eaux usées, le sol constitue une barrière qui arrête les micro-organismes par filtration et adsorption sur les particules, la majeure partie des germes étant retenue par les

premiers centimètres de sol. La diminution des micro-organismes s'explique par le fait qu'au niveau de la couche superficielle la mortalité des micro-organismes est élevée à cause du dessèchement rapide du sol suite à l'évaporation de l'eau. Nos résultats sont en accord avec ceux de **Trad et Sallet (1986)** et **Vallet (1994)** qui ont démontré que les sols sableux ne permettent pas une longue persistance en surface des bactéries fécales.

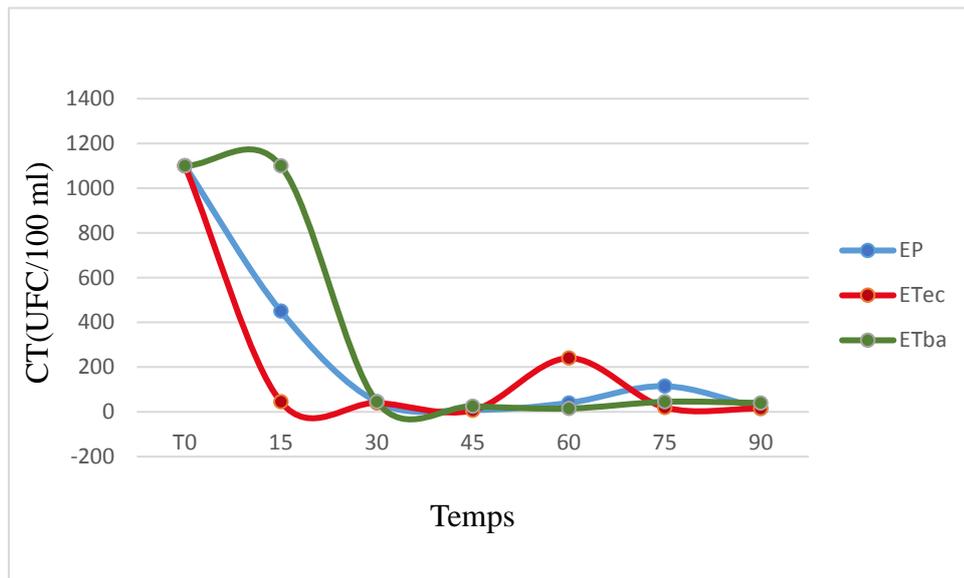


Fig.26. Cinétique des CT en fonction du temps (pendant 90 jours) au cours de l'irrigation par les trois types d'eau, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25 °C, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité = 3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EP) : eau de puits.

III.2.2.3.2. *Escherichia coli*

Après 75 jours d'irrigation nous avons noté la présence d'*E. coli* dans les différents sols irrigués avec des charges variables, plus importante dans le sol à boues activées suivi par sol à eau de puits et en dernier sol à électrocoagulation (figure 27). Ceci est en relation avec le type de traitement utilisé. Selon **Trad (1986)** et **Chenini (2002)**, cette augmentation pourrait s'expliquer par une meilleure survie des micro-organismes favorisée par un taux d'humidité plus important, et cela coïncide avec la période estivale où les fréquences et les volumes d'irrigation ont doublés.

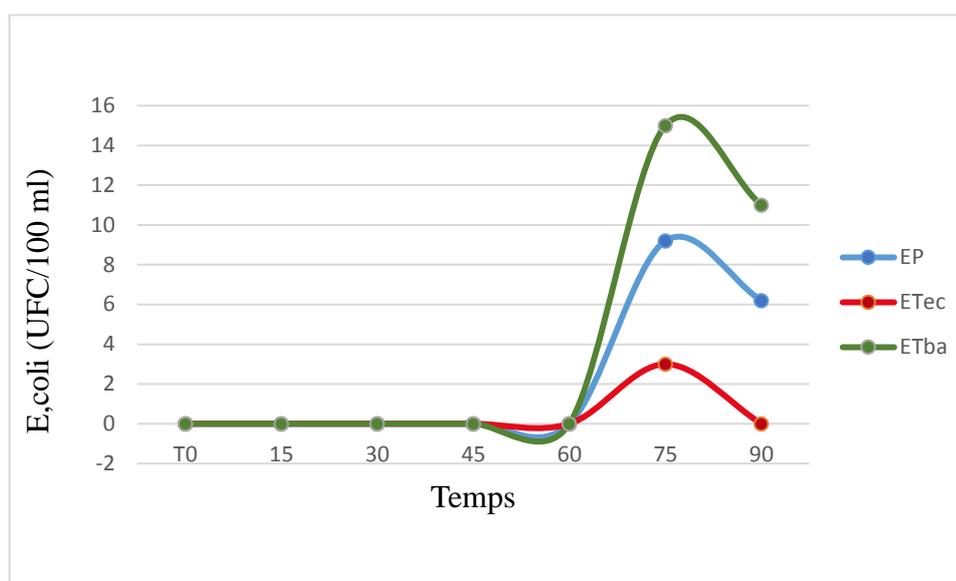


Fig.27. Cinétique des *E.coli* en fonction du temps (pendant 90 jours) au cours de l'irrigation par les trois types d'eau, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25 °C, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité =3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EP) : eau de puits.

III.2.3. Impact de l'irrigation sur la culture

Pour évaluer l'impact de l'irrigation de la culture avec les EUT (ETec et ETba) nous avons réalisé des analyses microbiologiques pour les fruits de tomates récoltés à la fin de l'essai ainsi que le dosage des ETM dans les racines, les feuilles et les fruits de tomate.

III.2.3.1. Analyses microbiologiques

Selon la réglementation, nous avons arrêté l'irrigation deux semaines avant la récolte, les fruits de tomate ont fait l'objet d'une analyse microbiologique afin de déterminer la qualité sanitaire (hygiénique) du fruit. Les analyses des paramètres recherchés (coliformes totaux, coliformes thermo-tolérants, *E. coli*, *Staphylococcus*, *Salmonella*), ont révélé une absence totale de ces germes, à partir de là nous pouvons déduire que les fruits de tomate présentent une excellente qualité microbiologique pour les trois types d'eaux.

III.2.3.2. Dosage des ETM

Concernant le dosage des ETM dans les différentes parties de la culture, les résultats sont présentés sous forme d'intensité faute de la non disponibilité des concentrations des standards,

pour cela les intensités sont comparées aux intensités du témoin (plants irrigués avec eau de puits EP).

III.2.3.2.1. Racines

Parmi l'ensemble des éléments traces métalliques, une vingtaine d'entre eux tels que le zinc, le cuivre et le fer sont indispensables aux processus physiologiques majeurs, en particulier la respiration, la photosynthèse ou l'assimilation des macronutriments (**Kabata-Pendias et Pendias, 2001**).

D'après la figure 28, le fer est le micronutriment le plus absorbé par les racines. Selon **Marschner (1995)**, le fer est un élément essentiel au développement de presque tous les organismes vivants dont les plantes.

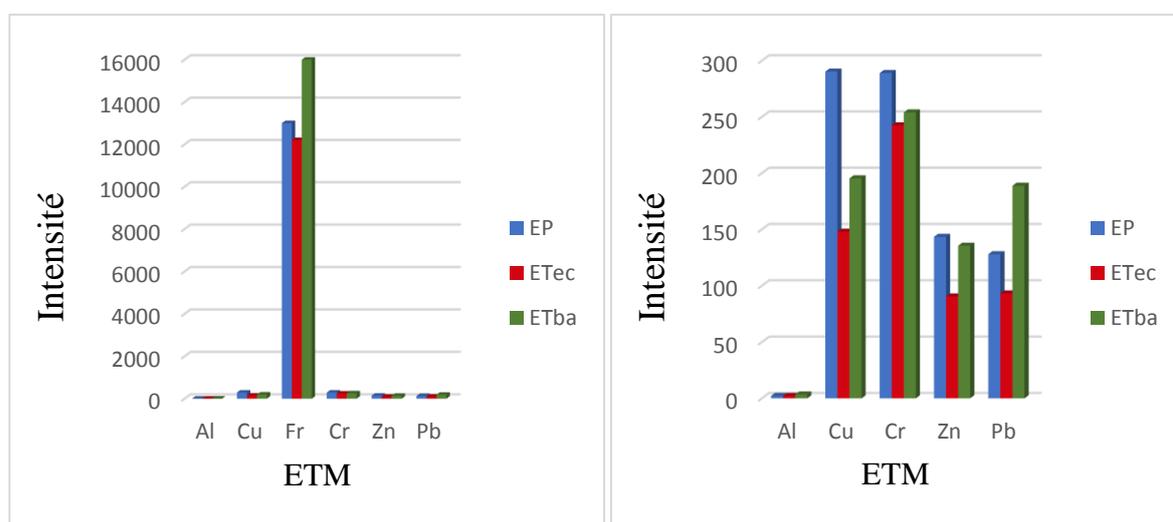


Fig.28. Variations des ETM dans les racines au cours de l'irrigation par les trois types d'eau, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25 °C, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité = 3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EP) : eau de puits.

Le fer est le microélément dont les plantes ont le plus besoin. Par son existence sous deux formes (fer ferrique Fe^{3+} et fer ferreux Fe^{2+}), le fer participe à la catalyse des réactions d'oxydo-réductions. Ce métal est impliqué dans de nombreux processus métaboliques comme les chaînes de transfert d'électrons de la respiration et de la photosynthèse mais également comme composant de cofacteurs d'enzymes responsables de réactions d'oxydo-réductions (**Viviane, 2015**).

III.2.3.2.2. Feuilles

L'irrigation par les eaux traitées par le procédé d'électrocoagulation et celle par boues activées n'a pas influencée sur l'intensité des ETM dans les feuilles en les comparant avec le témoin irrigué avec l'eau de puits (EP), à part le fer où nous avons enregistré une élévation de l'intensité dans les feuilles de tomates irriguées avec EC et BA. Ceci peut s'expliquer par l'apport des concentrations élevées de ce dernier dans les eaux traitées par les deux procédés (figure 29).

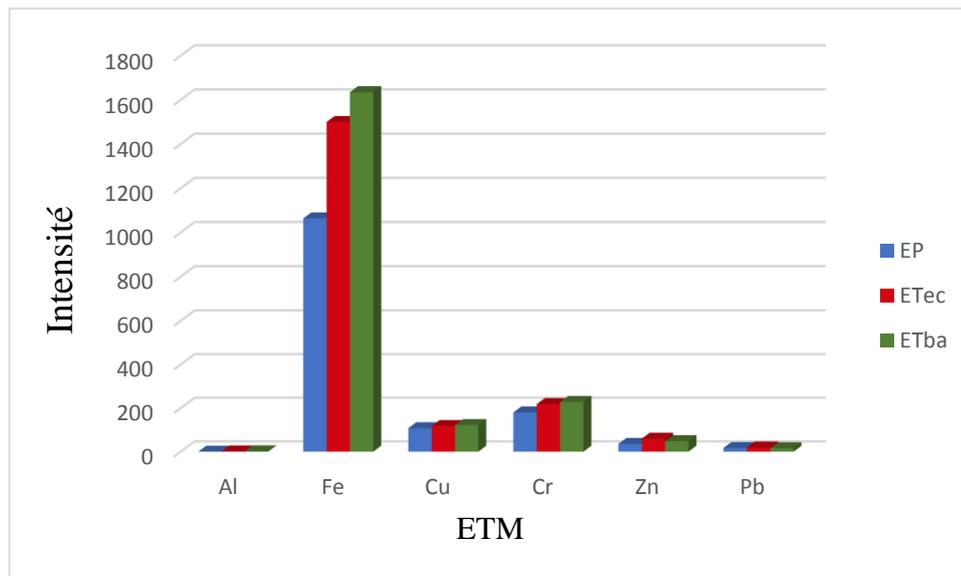


Fig.29. Variations des ETM dans les feuilles au cours de l'irrigation par les trois types d'eau, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25 °C, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité = 3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EP) : eau de puits.

III.2.3.2.3. Fruits

Le dosage des éléments traces métalliques est effectué pour la chair et la peau des fruits de tomate des trois traitements réalisés. D'après les résultats rapportés dans la figure 30 (a/b), montre que les intensités entre les deux matrices sont plutôt similaires.

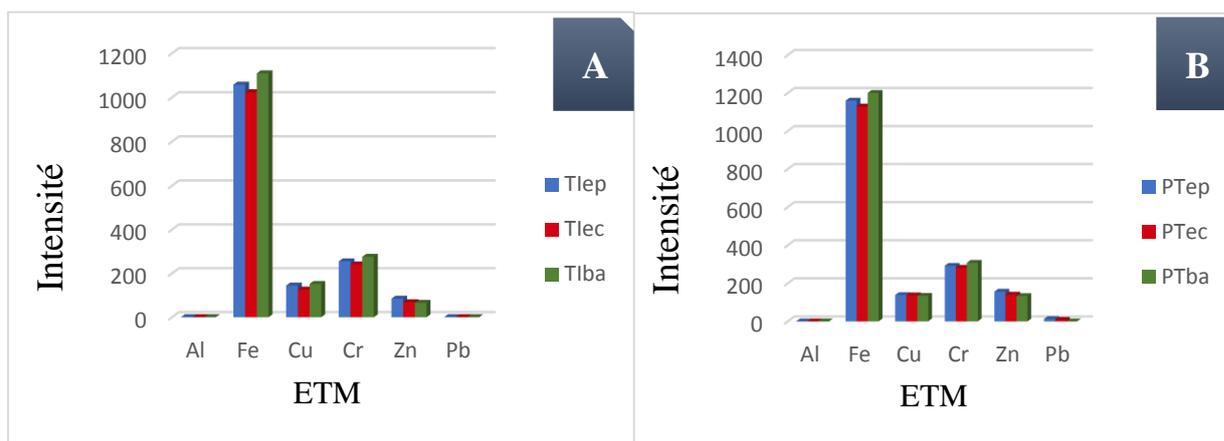


Fig.30. Variations des ETM dans les fruits (A : chair ; B : peau) au cours de l'irrigation par les trois types d'eau, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25 °C, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité = 3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EP) : eau de puits.

En comparant les intensités des fruits de tomates irrigués par les EUT avec le témoin irrigué par EP, nous avons constaté que l'irrigation n'a pas influencé sur la teneur en ETM dans les fruits de tomates.

III.2.3.3. Analyse des paramètres agronomiques des plants de tomates

Le suivi des paramètres de croissance s'est réalisé durant tout le cycle biologique de la tomate et cela par l'évaluation de la croissance des tiges (hauteur/diamètre) et par le calcul des calibres des fruits et le rendement.

III.2.3.3.1. Croissance de la tige

L'évaluation de la croissance de la tige pour la hauteur et le diamètre s'est faite depuis la mise en pots jusqu'à la fin de la récolte sur des intervalles de temps de 15 jours. La figure 31 (a/b) montre que la croissance en longueur et en diamètre de la tige n'est pas influencée par la nature des eaux usées traitées en comparant avec le témoin (EP). Elles passent de 15 cm à 160 cm et de 0,38 à 1,81 cm pour la longueur et le diamètre respectivement. Cette croissance est due à la richesse du sol et des eaux d'irrigation en substances nutritives (NPK) pour la plante (Hbaiz *et al.*, 2014).

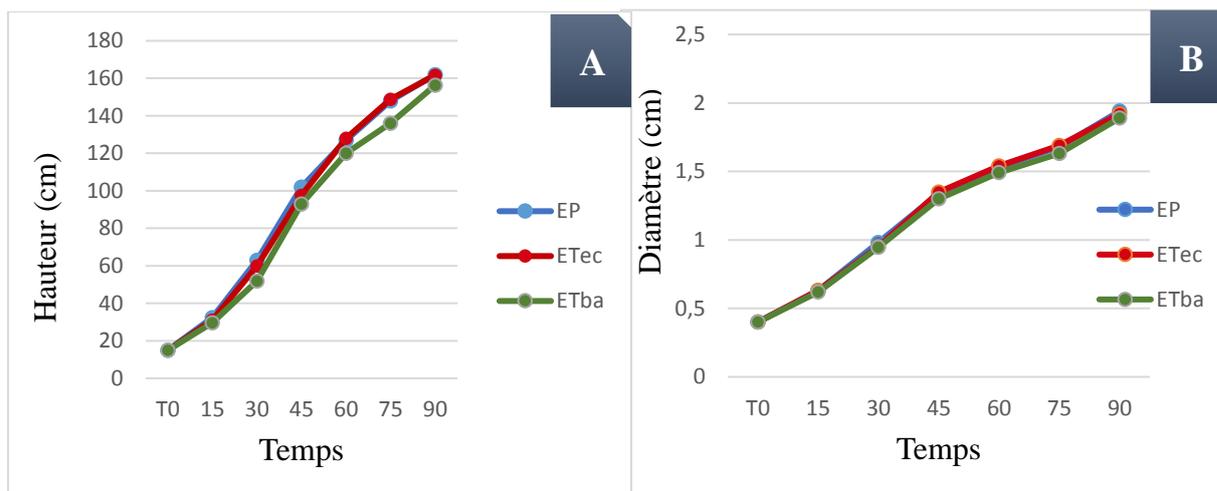


Fig.31. Cinétique des paramètres de croissances des plants (A : hauteur ; B : diamètre) au cours de l'irrigation par les trois types d'eau, (ETec) : eau traitée par électrocoagulation avec électrodes de fer, (T 25 °C, distance entre les électrodes = 5 cm, intensité =3 A) (ETba) : eau traitée par boues activées ; (EP) : eau de puits.

III.2.3.3.2. Rendement de la tomate

Les résultats du rendement du fruit sont consignés dans le tableau 19. Un bon rendement pour les trois traitements réalisés est observé. Aucune différence significative n'a été déterminée en poids et en calibres pour les tomates irriguées avec l'eau de puits et ETec. Par contre elles dépassent largement celles irriguées avec l'eau traitée par boues activées (ETba). Nous avons obtenu des fruits de moyenne et de petite taille avec un poids qui varie de 30 g jusqu'à 75 g, ces résultats sont liés au fait que la culture est réalisée hors sol et aux conditions climatiques extrêmes qu'elle a subit dans la période estivale.

Selon **Carrier et Senécal (2013)**, Les températures élevées accélèrent le développement des fruits, mais ces derniers risquent cependant d'être plus petits et de moins bonne qualité (ex. : mal colorés, mous, fendillés, etc.). La température optimale (moyenne 24 heures) pour la floraison et la nouaison de la tomate de serre est de 19 °C. En période de canicule, il est difficile, voire impossible, de maintenir ce niveau de température. Les caractéristiques morphologiques des fruits récoltés sont rapportées dans le tableau 16 et la figure 32.

Tableau 16 : caractéristiques de la récolte du fruit *Lycopersicon esculentum*

| Traitements | Rendement % | Poids (g) | Moyenne des calibres (cm) |
|-------------|-------------|-----------|---------------------------|
| Tlep | 82 | 1667,498 | 6,3 |
| Tlec | 80 | 1642,953 | 6 |
| Tlba | 79 | 1200,287 | 4,5 |

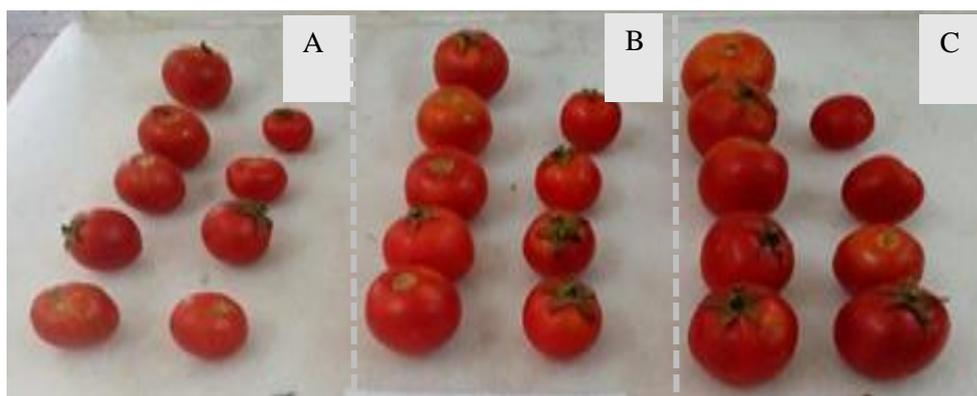


Fig.32. Taille de la tomate des trois traitements. (A) fruit irrigué par les eaux usées traitées par les boues activées de la station de Baraki, (B) eau traitée par électrocoagulation, (C) eau de puits.

Conclusion

*<<Un esprit médiocre qui s'applique à
l'étude va plus loin qu'un esprit sublime*

Qui ne s'applique à rien>>

Baltasar Gracian ; L'homme de cour (1646).

La réutilisation des eaux usées est une technique en pleine expansion principalement associée à l'agriculture. Cette réutilisation a pour objectif principal la production des quantités complémentaires en eau pour différents usages afin de combler des déficits hydriques et de trouver des sources d'eau alternatives pour l'irrigation vu les bénéfices qu'elle peut apporter pour les cultures. En effet elles contiennent des éléments fertilisants (azotes, phosphore et potassium) ainsi que des oligoéléments (Fer, Cuivre, Zinc. etc.) qui peuvent augmenter le rendement.

La présente étude s'inscrit dans le contexte de la valorisation des eaux usées traitées, elle se fixe comme objectif la caractérisation des eaux brutes de Baraki ainsi que les eaux traitées par le procédé d'électrocoagulation et de boues activées de cette station afin de comparer entre les deux procédés de traitement, suivi par une évaluation de l'impact de la réutilisation des EUT dans le domaine agricole sur une culture maraichère de tomate.

Les travaux réalisés ont touché les aspects physico-chimiques, microbiologiques et toxicologiques (ETM) des eaux destinées à la réutilisation, du sol irrigué et des plantes de tomate *Lycopersicon esculentum*.

La mise au point du pilote expérimental de l'électrocoagulation a permis d'obtenir un abattement significative des paramètres de pollution physico-chimiques, toxicologiques (ETM) et microbiologiques. Les résultats des analyses effectuées et l'étude statistique ont montré que le traitement par le procédé d'électrocoagulation est plus efficace que celui par boues activées.

La conformité des eaux traitées par les deux procédés aux normes d'irrigation fixées par **JORA (2012)**, a permis leur réutilisation dans l'irrigation d'une culture de tomate *Lycopersicon esculentum*, le suivi des paramètres microbiologiques et toxicologiques (ETM) ainsi que la cinétique des paramètres de croissance ont montré des résultats satisfaisants en termes de rendement et de qualité hygiénique des fruits.

Les perspectives portent sur une application sur terrain du traitement d'électrocoagulation (industries...) vu son efficacité approuvée par plusieurs études.

Références bibliographiques

Bibliographie



- Abbas S.T.**, Sarfraz M., Mehdi S.M., Hassan G. et Obaid-Ur-Rehman. (2007). Trace elements accumulation in soil and rice plants irrigated with the contaminated water; *Soil & Tillage Research* 94 503–509
- Abdel-Ghani N.T.**, Hegazy A., El-Chaghaby K.G. A. (2009). Typha domingensis leaf powder for decontamination of aluminium, iron, zinc and lead: Biosorption kinetics and equilibrium modeling. *Int. J. Environ. Sci. Tech.* 6 (2) : 243- 248
- Abderrahman WA.** (2003) La gestion de la demande en eau en Arabie saoudite. In : La gestion de l'eau selon l'Islam. Éditions Karthala, Paris. 144 p.
- Amat A.M.**, Arques A., Beneyto H., Garcia A., Miranda M.A., Segul S. (2003). Ozonization coupled with biological degradation for treatment of phenolic pollutants: A mechanistically based study. *Chemosphere.* 53: 79-86.
- Arnold JD.** & Stevan J. (1977) Manuel de microbiologie de l'environnement. OMS., Genève. pp. 1996- 1997.
- Arslan-Alaton I.**, Kabdash I., Hanbaba D., Kuybu E. (2008). Electrocoagulation of a real reactive dyebath effluent using aluminum and stainless steel electrodes. *Journal of Hazardous Materials.* 150: 166-173.
- Asano, T.** and Lavine, A. D. (1996) Wastewater reclamation, recycling, and reuse: past, present, and future. *Water Science & Technology* 33(11):1-14.
- Asano T.** (1998). Wastewater reclamation and reuse. Ed, Water quality management library, 1475p.
- Asselin M.** (2007). Utilisation de l'électrocoagulation dans le traitement des eaux usées industrielles chargées en matière organiques. Thèse de Maitre ès Science (M.Sc.), Université de Québec. 282p.



- Babu R.**, Bhadrinarayana N.S., Begum K.M.M.S., Anantharaman N. Treatment of tannery wastewater by electrocoagulation, *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy* 42 (2007) 201-206.
- Baumont S.**, Camard JP., Lefranc A., Franconi A. Réutilisation des eaux usées épurées : risques sanitaires et faisabilité en Ile-de-France. Observatoire régional de santé d'Ile-de-France, Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région Ile-de-France, France, 2004. 169pp
- Bayramoglu M.**, Eyvaz M., Kobya M. (2007). Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation : economical evaluation, *Chem. Eng. J.*, 128:155-161
- Beupoil A.**, LE BORGNE C., MOUSSA ATTO A., MUCIG C et ROUX A. (2010)- Risques sanitaire liés à la réutilisation des eaux usées traitée pour l'aéroaspersion des espaces verts.ingénieur du génie sanitaire PERSAN, pp 46
- Beck E.G.**, Giannini AP., Ramirez E.R. (1974) 8 Electrocoagulation clarifies food wastewater. *food technol* 28,2, 18 – 22pp.
- Belaid N.** (2010). Evaluation des impacts de l'irrigation par les eaux usées traitées sur les plantes et les sols du périmètre irrigué d'El Hajeb-Sfax: salinisation, accumulation et phytoabsorption des éléments métalliques, Thèse de Doctorat en co-tutelle de l'université de Sfax et de Limoges.
- Benitez F.J.**, Beltran-Heredia J., Terrogrosa J. (1997). Treatments of wastewaters from olive mills by UV radiation and by combined ozone-UV radiation. *Toxicol.Environ. Chem.*61: 173-185.
- Bennajah M.** (2007). Traitement des rejets industriels liquide par électrocoagulation/électroflotation en réacteur airlift. Thèse de doctorat Université de Toulouse.204p.
- Blaylock M.J.**, Huang J.W. (2000). Phytoextraction of metals. In "Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment", Eds. Raskin I., Ensley B.D., New York, pp. 53-71.
- Boudjema N.**, Abdi N., Grib H., Drouiche N., Lounici H., Mameri N. (2016 a). Simultaneous removal of natural organic matter and turbidity from Oued El Harrach River by électrocoagulation using an experimental design approach, *Desal. Wat. Treat.*, 57. 14386-14395.

Boudjema N., Drouiche N., Kherat M., Mameri N. (2016 b). Wastewater disinfection by electrocoagulation process and its interaction with a biotic parameters, *Desal. Wat. Treat.*, 57. 28151-28159.

Boudjema N., Drouiche N., Abdi N., Grib H., Lounici H., Pauss A., Mameri N. (2014). Treatment of Oued El Harrach river water by electrocoagulation noting the effect of the electric field on microorganisms, *J.Taiwan Inst. Chem. E.*, 45.1564-1570.

Bratby J. (2006). Coagulants, in *Coagulation and flocculation in Water and Wastewater Treatment*, 2nd ed., IWA Publishing, London, 50-68.



Can O.T., Koby M., Demirbas E. et Bayramoglu M., Treatment of textile wastewater by combined electrocoagulation, *Chemosphere* 62 (2006) 181- 187.

Camilleri C., Les techniques de flottation- Application à l'épuration des eaux usées industrielles et urbaines et à la preparation des eaux potables, *Tribune Cebedeau* (1980) 33, 497-505.

Campos C., Oron G., Salgot M. and Gillerman L. (2000). Behaviour of the fecal pollution indicators in a soil irrigated with treated wastewater under onsurface and subsurface drip irrigation. *Wat . Sci. Tech.*, 42(1-2), 75-79.

Cardot C. *Les traitements de l'eau – Procédés physico-chimiques et biologiques*. Paris : Ellipses,1999, 247 p.

Carrier A., Senécal M. Maintenir la qualité des tomates en été : un défi. Réseau d'avertissements phytosanitaires – Bulletin d'information No 12 – Cultures en serres – 25 juillet 2013. 6 p.

Cazoir David-Alexandre. (2011). Traitement d'eaux huileuses par photocatalyse heterogene : application a la depollution des eaux de cales. L'Universite Claude Bernard Lyon 1. Ecole Doctorale de Chimie de Lyon. 254p.

Cenkin E.V., Belevstev N.A. Electrochemical treatment of industrial wastewater, *Effl. watertreat. Jour.* 25, 243-247 (1985).

Céline P. (2003). Épandage de boues d'épuration en milieu sylvo-pastoral. Étude des effets in situ et en mésocosmes sur la mésofaune du sol et la décomposition d'une litière de chêne liège (*Quercus suber* L.) Ecole doctorale : Sciences de l'environnement, MARSEILLE (AIX-MARSEILLE III).

- Chang AC.,** Pan G., Page AL. & Asano T. (2002) Developing Human Health-related Chemical Guidelines for Reclaimed Water and Sewage Sludge Applications in Agriculture. World Health Organization. 105 p.
- Chaux C.L.,** Foury C.L. (1994). Cultures légumières et maraichères. Tome III: légumineuses prtagères, legumes fruit. Tec et Doc Lavoisier, Paris. p 563.
- Chenini F.,** Trad M., Réjeb S., Châabouni Z. (2002) Optimisation et Durabilité du Traitement et de L'utilisation des Eaux Usées en Agriculture. Institut National de Recherche en Génie Rural, Eaux et Forêts.
- Chih-Ta W.,** Wei-Lung C., Yi-Ming K (2009). Removal of COD from laundry wastewater by electrocoagulation, Separation and Purification Technology, 19, 65-76.
- Christopher, S.,** Faruqui, N.I. and Raschild-Sally, L. (2004) Wastewater Use in Irrigated Agriculture: Confronting the Livelihood and Environmental Realities, CAB International/IWMI/CRDI.
- Chitnis V.,** Chitnis S., Vaidya K., Ravikant S., Patil S., Chitnis DS., Bacterial popilation changes in hospital effluent treatment plant in central India. Water Research 2004:38:441-447.
- Cindy B.** Procédé à boues activées pour le traitement d'effluents papetiers : de la conception d'un pilote a la validation de modeles. domain stic.inge. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2007. Français.
- Crini G.,** Badot P.M. (2007). Traitement et Epuration des Eaux Industrielles Polluées. Ed. : Presses Universitaires de Franche-Comté, Besançon, 353 p.
- Q*
- Debillemont P.** (1996). Eaux résiduaires : Traitements biologiques et physicochimiques, Récents Progrès en Génie des Procédés. 10 : 129-136.
- Desjardins R.** (1997). Le traitement des eaux. 2ème édition. Ed. Ecole polytechnique.
- Dugniolle.** (1980)., Dugniolle H, (1980). L'assainissement des eaux résiduaires domestiques. CSTC, revue n°3_septembre, pp.44-52.

Drechsel P., Evans V., (2010). Wastewater use in irrigated agriculture. *Irrig Drainage Syst* (2010) 24:1–3 DOI 10.1007/s10795-010-9095-5

E

Ecosse D. (2001) Techniques alternatives en vue de subvenir à la pénurie d'eau dans le monde. Mém. DESS en Qualité et gestion de l'eau. Fac. Sci., Amiens (France). 62 p.

Edline F. (1979). L'épuration biologique des eaux résiduaires. Ed. CEBEDOC, Paris, 306p.

Eynard N., B.Gueguen A., Benichou P., Cabanese T.J et Teissié J. Éradication de légionnelles par champs électrique. Journée d'Électrochimie, Toulouse, France, 1-4 juin 1999, 1999.

F

FAO. (2002). The use of treated waste water (tw) in forest plantations in the near east region Near east forestry commission (fifteenth session), 5 pages.

Faruqui N. (2003) La gestion de l'eau selon l'Islam. Éditions Karthala, Paris. 144 p.

Feng Qi-yan., Xiang-dong L., Cheng Yu-jie, Meng Lei., Meng Qing-jun. (2007). Removal of Humic Acid from Groundwater by Electrocoagulation, *Journal of China University of Mining & Technology*, 17, 513-515.

G

Galaf F. (2003). « Contribution à l'élaboration d'un manuel et d'un site Websur la pollution du milieu marin ». Mémoire d'ingénieur d'état. Université.

Gao, T., Furnari, F., Newton, A.C. (2005). PHLPP: a phosphatase that directly dephosphorylates Akt, promotes apoptosis, and suppresses tumor growth. *Mol. Cell* **18(1)**: 13--24.

Georges I., Crop P., Servais P. Fecal coliform removal in wastewater treatment plants studied by plate counts and enzymatic methods. *Water Research* 2002; 36: 2607-2617.

Gernjak W., Maldonado M.L, S., Malto J., Caceres T., Krutzler A., Glaser R., Bauer R. (2004). Pilot-plant treatment of olive mill wastewater (OMW) by solar TiO₂ photocatalysis and solar photo-Fenton. *Sol. Energy*. 77: 567-572.

- Ghernaout D.**, Badis A., Kellil A., Ghernaout B. Application of electrocoagulation in Escherichia coli culture and two surface waters. Desalination 2008 ;219: 118–25.
- Ghernaout R.** Load Relations in Mina River Basin Situated in the North Western Region of Algeria. Thesis · December 2002 with 6 Reads University M'Hamed Bougara of Boumerdes
- Gijzen H.** (2000) Traitement des eaux usées et potentiels de réutilisation à moindre coût : Une approche de production plus propre à la gestion des eaux usées. IHE, Delft.
- Glanic R** et **Bennetion J-P**, (1989). Caractérisation d'effluents d'assainissement individuel et essais de matériels d'assainissement autonome. TSM. L'eau-84 année-n°11, pp.573-584.
- Greger M.** (1999). Metal availability and bioconcentration in plants. In: Prasad, M.N.V. & Hagemayer, J. (Eds.). Heavy metal stress in plants: From molecules to ecosystems. SpringerVerlag, Berlin, pp. 1-27.
- Grieken R.** and **Markowicz A.** (1993), Handbook of X-ray Spectrometry. Marcel Dekker, New York.
- Grosclaude g.**, 1999. L'eau : usage et polluants. Edition INRA, 210p.
- Gijzen H.** (2000) Traitement des eaux usées et potentiels de réutilisation à moindre coût : Une approche de production plus propre à la gestion des eaux usées. IHE, Delft.
- Guessoum A.** (2001). L'effet de l'irrigation sur la salinité du sol dans la région de Saada - Biskra., Thèse ing. Agro, Univ Batna., 50 P.
- 
- Hanafi F.**, Sadif N., Assobhei O., Montardar M. (2009). Traitement des margines par électrocoagulation avec électrodes plates en aluminium. Revue des sciences de l'eau/ Journal of Water Science, Vol.22. 4: 473-485.
- Hannachi A.**, Gharzouli R., Djellouli Tabet Y., (2014) Gestion et valorisation des eaux usées en Algérie Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°19, Septembre 2014, pp 55-56
- Harries J.T.** (1909) US Patent n° 93 7210.

- Hartani T.** (2004). La réutilisation des eaux usées en irrigation: cas de la Mitidja en Algérie. *In: Actes du séminaire Modernisation de l'agriculture irriguée.* Rabat (Maroc),19-23 Avril. 11 p.
- Hbaiz E.M.,** Ouhman E.M., Lebki M., Ezzarhouy D., Lebki A., Rifi E.H., (2014) Effet des eaux usées d'une station d'épuration sur la croissance du poivron (*Capsicum annum.L*) cultivé sur deux sols différents (Effect sewage of wastewater from the treatment plant on the growth in pepper (*Capsicum annum.L*) Cultivated on two different grounds. Laboratoire de Synthèse Organique et Procédés d'Extraction, Faculté des sciences, Université Ibn Tofaïl, BP133, 14000 Kénitra, Maroc, 1380 p.
- Herpin U.,** Gloaguen T. V., da Fonseca A. F., Montes C. R., Mendonça F. C., Piveli R. P., Breulmann G., Forti M. C. Et Melfi A. J., (2007), Chemical effects on the soil-plant system in a secondary treated wastewater irrigated coffee plantation- A pilot field study in Brazil. *Agricultural Water Management* 89, 105 – 115.
- Holt P.K.,** Barton G.W., Wark M., Mitchell C.A.(2002). A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation, *Colloid Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects.* 211:233-248.
- J*
- Ishaq, A.M. et Khan, A.A.,** 1997, « Recharge of Aquifers with Reclaimed Wastewater: A Case for Saudi Arabia », *Arabian Journal for Science and Engineering*, 22:133–141
- J*
- Jacangelo JG.,** Loughran P., Petrik B., Simpson D., Mcllroy C. Removal of enteric virus and selected microbial indicators by UV irradiation of secondary effluent. *Water Science and Technology* 2003; 47 (9):193-198.
- Jardé Emilie.** (2002). composition organique de boues résiduelles de stations d'épuration lorraines : caractérisation moléculaire et effets de la biodégradation. Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I. 287p
- J.O.R.A.** Journal officiel de la République Algérienne n° 60. (2005)., Loi n° 05/12 du 04 Août 2005 relative à l'eau.18p.
- J.O.R.A.** Journal Officiel De La République Algérienne. (2012). Journal Officiel De la République Algérienne Démocratique et Populaire. Conventions et accords

internationaux - lois et décrets Arrêtes, décisions, avis, communications et annonces. n° 41. 25 Chaâbane 1433. 12 Juillet 2012.27p



- Kabata-Pendias H.**, Pendias A. (2001). Trace elements in soils and plants. 3rd CRC Press, Boca Raton, London, New-York, Washington D.C.
- Kalnicky D.J.**, Singhvi R.(2001) Field portable XRF analysis of environmental samples
Journal of Hazardous Materials 83 93– 122
- Keck, P.E.**, Strakowski S. M., & McElroy, S. L. (2000). The efficacy of atypical antipsychotics in the treatment of depressive symptoms, hostility, and suicidality in patients with schizophrenia. *The Journal of Clinical Psychiatry*, 61(Suppl 3), 4-9.
- Kestioglu K.**, Yonar T., Azbar N. (2005). Feasibility of physico-chemical treatment and advanced oxidation processes as a means of pretreatment of olive mill effluent. *Process Biochem.* 40: 2409-2416.
- Ketbar D.R.**, Mallikarjuman R., et Venkatachalam S. (1988). Size determination of electro generated gas bubbles. *J. Electrochem. Soc. India*, 37, 313.
- Ketbar D.R.**, Mallikarjuman R. et Venkatachalam S. (1991). Electroflotation quartz fines. *Intern. J. Min. Process.*, 31, 127-138.
- Khemis M.**, Lecter J.P.G., Tanguy J.P., Valentin G., Lopicque F .(2006). Treatment of industrial liquide wastes by electrocoagulation. Experimental investigation and interpretaton model, *Chemical Engineering Science*, 61, 3602-3609.
- Khennoussi A.**, Chaouch M., Chahlaoui A., Merzouki M., Traitement des effluents d'abattoir de viande rouge par électrocoagulation-flottation avec des électrodes en fer, *Revue des Sciences de l'Eau* 26(2) (2013) 135-150, ISSN : 1718-8598.
- Kim T.H.**, Park C., Shin E..B., Kim S., Decolorization of disperse and reactive dyes by continuous electrocoagulation process, *Desalination*, 150,165–175 (2002).
- Koby M.**, Can O.T. et Bayramoglu M., Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes, *Journal of Hazardous Materials B* 100 (2003) 163-178.
- Koby M.**, Demirbas, E. and Bayramoglu, M. (2006). Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation. *Chemosphere*, 62, 181 – 187.

Kwon J.Y., Chung P.G., Lim I.H. Removal of residual COD in biologically treated paper-mill effluent and degradation of lignin using nonthermal plasma unit. *Journal of Environmental Science and Health*, 2004, A39(7), p. 1853-1865.

L

Lai Chen L and Lin Sheng H. 'Electrocoagulation of Chemical Mechanical Polishing (CMP) Wastewater from Semiconductor Fabrication', *Chemical Engineering Journal* 95, pp. 205 – 211, 2003.

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

Lebart L. Morineau Aet Fénelon J.P. *Traitement des données statistiques, méthodes et programmes*. Edition Dunod (2e édition) 1991.

Lehtihet L. (2005). La réutilisation des eaux usées en Algérie : Situation actuelle et perspectives de développement. Communication personnelle. 30 p.

Lemanceau P. Effets bénéfiques de rhizobactéries sur les plantes : exemple des *Pseudomonas spp* fluorescents. *Agronomie*, EDP Sciences, 1992, 12 (6), pp.413-437.

Lhadi E K., EL Kratim, Abouzaida. (1997). "Epuratio n physico – chimique des rejets liquides de l'industrie textile". *L'eau, l'industrie, les nuisances* N° 214.

Louah M. (1995) : *Ecologie des culicidés (diptera) et état du paludisme dans la péninsule de Tanger*. Thèse de doctorat, Université Abdelmalek Es Saadi, faculté des sciences Tétouan.

M

Maes M., 'Les Résidus Industriels : Traitement, Valorisation et Législation', *Entreprise Moderne d'Édition Technique et Documentation*, Paris, 1994.

Malakootian M., Fatehizadeh A., Yousefi N, et al. Fluoride removal using Regenerated Spent Bleaching Earth (RSBE) from groundwater: Case study on Kuhbonan water. *Desalination* 2011; 277(1):244-9.

Mansour A., Nabil M., Ali-Labib R., Said and H., Annos F., 2012. Reciprocal expression of survivin and SMAC/DIABLO in primary breast cancer. *Med. Oncol.*, 29: 2535-2542.

Mameri N., Lounici H., belhocine D., Grib H., Prion D.L., Yahiat Y. Defluoridation of Sahara Water by Small Plant Electrocoagulation Using Bipolar Aluminium

Electrodes. Separation and Purification Technology .Volume 24, Issues 1–2, 1 June 2001, Pages 113-119.

Mayet J., La Pratique de l'Eau, seconde édition, Editions Le Moniteur, 1994.

Meysami B., Kasaeian A.B. (2005). Use of coagulants in treatment of olive oil wastewater model solutions by induced air flotation. Bioresour. Technol. 96:303-307.

Medkour M. (2002) Réutilisation des eaux usées épurées. Forum de la gestion de la demande en eau : réutilisation des eaux usées. Rabat, 26 et 27 mars 2002. 11 p.

Mekhali F., ' Réutilisation des eaux résiduaires industrielles épurées comme eau d'appoint dans un circuit de refroidissement ', Mémoire de magister 2009.

MRE. Ministère des Ressources en Eau 2001.

Mohammed T. A., Birima, A. H., Noor, M. J., Muyibi, S. A., Idris, A. (2008). Evaluation of using membrane bioreactor for treating municipal wastewater at different operating conditions. Desalination. doi:10.1016/j.desal.2007.02.058. 221(1-3):502-510.

Mollah M.Y.A., R. Schennach, J.R. Parga, D.L. Cocke. (2001). Electrocoagulation (EC)-science and applications, J. Hazard. Mater. 84: 29-41.

Mollah, M.Y.A., Morkovsky, P., Gomes, J.A.G., Kesmez, M., Parga, J. and Cocke, D.L. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. J. Hazard. Mat., B114, 199 –210

Morel J.L., Mench M., Guckert A. (1986). Measurement of Pb²⁺, Cu²⁺ and Cd²⁺ binding with mucilage exudates from maize (Zea mays L.) roots. Biology and Fertility of Soils 2 : 29-34

N

Nicholson F.A., Chambers B.J., Williams J.R., Unwin R.J., 1999. Bioresource Technology, 70, 23-31.

O

OMS. (1989) L'utilisation des eaux usées en agriculture et en aquaculture : recommandations à avisées sanitaires. Organisation Mondiale de la Santé. Série de rapports techniques n°778. OMS. Genève.

O.N.A. Office National de l'Assainissement. (2006). Situation actuelle des stations de traitement d'eaux usées en Algérie. MRE. Alger, Algérie. 7 p.

Oubelkas M. & Zellou, M.E. (1991) Etude du plan directeur d'aménagement intégré des eaux du bassin Loukkos, Tangérois et côtiers méditerranéens. Etude préliminaire des schémas de réutilisation des eaux usées des trois principales villes de la zone. 7ème congrès mondial des ressources en eau, Rabat (Maroc), 13-18 Mai, B3 :53-55.



Paulsrud B et Haraldsen S. (1993). Experience with the Norwegian approval système for small waste water treatment plants. Wat. Sc. Techn, vol .28, n°10, pp.25-32.

Patermarakis G., et Fountoukis E., Disinfection of water by electrochemical treatment, Wat. Res. (1990) 24, 1496.

Peasey A., Blumenthal U., Mara D. & Ruiz-Palacios G. (2000). A review of policy and standards for wastewater reuse in agriculture : A latin american perspective. Well. n° 68 part II. 74 p.

Persin F. et Rumeau M., le traitement électrochimique des eaux et des effluents, tribune de l'eau, 42, 539, 45-56 (1989).

Picard G., Cathalifaud F., Mazet M., Vandensteendam C. (2000). Cathodic dissolution in the electrocoagulation process using aluminium electrodes, J. Environ. Monit. 2: 77-80.

Picard G., Contribution à l'étude des réactions aux électrodes en vue de l'application à l'électrocoagulation, thèse de doctorat, universités de Limoges (2000) France.

Pouet M. F., Persin F. et Rumeau M., Intensive treatment by electrocoagulation flocculation-tangential flow microfiltration in areas of high seasonal population, Wat. Science (1992) Tech., 25, 247-253.

Prutz W.A., Interactions of hypochlorous acid with pyrimidine nucleotides, and secondary reactions of chlorinated pyrimidines with GSH, NADH, and other substrates. Arch Biochem Biophys (1998) 349 (1): 183-91.



- Radcliffe J.C.** (2004) Water Recycling in Australia. Australian Academy of Technological Sciences and Engineering, Parkville, Victoria (Australia).
- Ratel C.,** Nejjar A. et Bentaleb M. (1986) La réutilisation des eaux usées pour l'irrigation au Maroc : Cas de la ville de Marrakech. Séminaire sur les technologies appropriées pour l'eau et l'assainissement en zones arides, Rabat (Maroc), 24-28 Novembre. pp. 31-44.
- Rattan R.K.,** Datta S.P., Chhonkar P.K., Suribabu K., Singh A.K. (2005), Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater—a case study. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 109, 310–322
- Rejsek F.** (2002), Analyse des eaux. Aspects réglementaires et techniques, centre régional de documentation pédagogique d'Aquitaine, bordeaux, France.
- Rengel Z.** (1999). Heavy Metals as Essential Nutrients. In: Prasad, M.N.V. & Hagemayer, J. (Eds.). Heavy metal stress in plants: From molecules to ecosystems. Springer-Verlag, Berlin, pp. 231- 251.
- Ricordel C.,** Darchenb A. , Hadjievic D. (2010). Electrocoagulation– electroflotation as a surface water treatment for industrial uses. *Separation and Purification Technology Science Direct.* 74:342-347.
- Rodier J.,** Bazin C., Boutin J.-P., Chambon P., Champsaur H., et Rodi L. (1996) : l'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. Paris, Dunod, 8 e édition.



- Sadek s.,** (1970) An electrochemical method for removal of phosphates from waste waters. Federal Water Quality Administration of United States. Dept of Inter voir, rapport 217,673, 27 pp.
- Saghir M.Z.,** Chaalal O., Islam M.R. (2000). Numerical and experimental modeling of viscous fingering during liquid–liquid miscible displacement. *J. Pet. Sci. Eng.* 26, 253–262.
- Sahi S.V.,** Bryant N.L., Sharma N.C., Singh S.R. (2002). Characterization of a lead hyperaccumulator shrub, *Sesbania drummondii*. *Environmental Science and Technology* 36 : 4676-4680.

- Salghi R**, Différent filières de traitement des eaux, ed univ IZ Rabat, p.22, (2007). Paulsrud B et Haraldsen S, (1993), Experience with the Norwegian approval système for small waste water treatment plants. *Wat. Sc. Techn*, vol .28, n°10, pp.25-32.
- Sanita di Toppi L.**, Gabbrielli R., (1999). Response to cadmium in higher plants. *Environmental and Experimental Botany* 41 : 105-130.
- Saur I.F.**, Rubech S., Forde J.S., Kjaerhem G. et Syversen U. (1996). Electroflocculation: removal of oil, heavy metal and organic compounds from oil-in-water emulsion. *Filt. Sep.*, 33, 295-303.
- Servais P.**, Anzil A., Frebutte D. Estimation of bacterial biomass in urban wastewater by measuring potential exoporoteolytic activity. *Revue des sciences de l' eau Rev Sci Eau* 2001;62 p.
- Shankara Naika.**, Joep van Lidt de Jeude., Marja de Goffau., Martin Hilmi., Barbara van Dam. (2005) La culture de la tomate. production, transformation et commercialisation ISBN Agromisa: 90-8573-044-9 ISBN CTA: 92-9081-300-8, 10 p
- Sharma P.**, Dubey R.S. (2005). Lead toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 17 : 35-52.
- Solis C.**, Andrade E., Mireles A., Reyes-Solis I.E., Garcia-Calderon N., Lagunas-Solar M.C., Pina C.U.et Flocchini R.G., (2005), Distribution of heavy metals in plants cultivated with wastewater irrigated soils during different periods of time. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 241, 351–355
- Strauss, M.**, Ursula J. and Blumenthal U. (1990) Human waste use in agriculture and Aquaculture: utilisation and health perspectives. International Reference Center for waste disposal (IRCWD).
- Strokach P.E.**, STipe Henko V.A and Bilaya V.P (1975) : A Study of waters purification in an electrolyser with an aluminium anode . *Electrochemistry in Industrial Processing and Biology*, 4, 7,39-46 pp.
- Stuart F.E.** (1946) Electronic principal of Water purification. The new England Wat. Works Assoc. 60, 3, 236 – 242 pp.
- Shankara Naika.**, Joep van Lidt de Jeude., Marja de Goffau., Martin Hilmi., Barbara van Dam. (2005) La culture de la tomate. production, transformation et commercialisation ISBN Agromisa: 90-8573-044-9 ISBN CTA: 92-9081-300-8, 10 p



Tanji Y., Mizoguchi K., Yoichi M., Morita M., Kijima N., Kator H., Unno H. Seasonal change and fate of coliphages infected to *Escherichia coli* O157 :H7 in a wastewater treatment plant. *Water Research* 2003 ; 37:1136-1142.

Tamrabet, L., Goléa D., Bouzerzour H. (2002). La réutilisation des eaux usées en agriculture: insuffisances et solutions des méthodes de traitement des effluents en Algérie. *Watmed2002*, Monastir, Tunisie. Pp. 295-302

Temmink H., GrolleK. Tertiary activated carbon treatment of paper and board industry wastewater. *Bioresource Technology*, 2005, 96, p.

Trad M. et Saillet H. (1986) - Etude de la contamination bactérienne de la nappe, du sol et des cultures par l'apport d'eaux usées traitées et de boues résiduaires.



Vaillant J.R. (1974)., Perfectionnement et nouveautés pour l'épuration des eaux résiduaires : eaux usées urbaines et eaux résiduaires industrielles. Ed. Eyrolles. Paris, 413p.

Vallet A. (1994). Les risques de transmission de maladies infectieuses ou parasitaires par les effluents d'élevage de ruminants. *Fourrages* (1994) 140, 431-442.

Vik E.A., D.A. CARLSON, A.S. EIKUM et E.T. GLESSING (1984). Electrocoagulation of potable water. *Water Res.*,18, 1355-1360.

Viviane M. (2015). Caractérisation de mutants d'*Arabidopsis thaliana* affectés dans le stockage du fer dans leurs graines. Thèse de doctorat, Cellule Université Paris -Sud, école doctorale: Sciences du végétal Institut des Sciences du Végétal Institut de Biologie Intégrative de la Cellule ,223p.



Wang W. Lyophilization and development of solid protein pharmaceuticals. *Int. J. of Pharmaceutics*, Vol. 203, pp. 1-60 (2000).

Weller DM. (1988) Biological control of soilborne plant pathogens in the rhizosphere with bacteria. *Annu Rev Phytopathol* 26, 379-407

- Wery M.** ‘Décapage des Métaux’, Techniques de l’Ingénieur, Traité Matériaux. M1445-6, 2000.
- Who**, 1989. Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture. World Health Organization, Guidelines, 76 pp.
- Winter J.**, Ilbert M., Graf P.C., Ozcelik D., Jakob U. Bleach activates a redox-regulated chaperone by oxidative protein unfolding. *Cell* (2008) 135 (4): 691-701.

Y

- Yadav RK.**, Goyal B., Sharma RK., Dubey SK et Minhas PS. (2002), Post-irrigation impact of domestic sewage effluent on composition of soils, crops and groundwater—A case study. *Environmental International* 28: 481–486
- Yahiaoui O.**, H. Lounici, N. Abdi, N. Drouiche, N. Ghaffour, A. Pauss, N. Mameri. (2011). Treatment of olive mill wastewater by the combination of ultrafiltration and bipolar electrochemical reactor processes, *Chem. Eng. Process.* 50: 37-41.
- Yang C.L.**, Dluhy R., Electrochemical generation of aluminium sorbent for fluoride dsorption, *J. Hazard. Mater.*, 94, 239 (2002).
- Youchun Z.**, Dunwen L., You Gqi Z, Jianmin L, and MEI QIANG L (1991). “The study of the electrolysis coagulation process using insoluble anodes for treatment of printing and dyerng wastewater” *Water – heat*, 6, 227 – 236.
- Yousuf M.**, Mollah A., Schennach R., Parga J.R., Cocke L. Electrocoagulation (EC), science and applications, *J. Hazard. Mater.*, 84, 29-41 (2001).

Z

- ZODI S.** (2012) Étude de l’épuration d’effluents de composition complexe par électrocoagulation et des couplages intervenants entre le traitement électrochimique et l’étape de séparation : application à l’industrie textile et papetière. Thèse de Doctorat .Université de Lorraine, Ecole doctorale ressources procédés produits environnement (rp2e) laboratoire réactions et génie des procédés (lrgp - upr 3349 cnrs).
- Zongo I.**, Étude expérimentale et théorique du procédé d’électrocoagulation : application au traitement de deux effluents textiles et d’un effluent simulé de tannerie. Thèse de Doctorat, Université de Nancy, École nationale supérieure des industries chimiques, France (2009) 226 p.

Zongo I., Wéthé J., Merzouk B., Maïga A. H., Lapticque F., Leclerc J. P., Traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie par électrocoagulation : étude énergétique et effet des paramètres opératoires sur le traitement des polluants. European Journal of Scientific Research ISSN. (2011) 1450-216X Vol.62 No.2, pp. 216-235.

Annexes

Liste des cultures autorisées

Une autre réglementation a été mise en œuvre, c'est l'arrêté interministériel du 8 Safar 1433 correspondant au 2 janvier 2012 fixant la liste des cultures pouvant être irriguées avec des eaux usées épurées. Ce texte est promulgué par les ministres chargés des ressources en eau, de l'agriculture et de la santé. Les parcelles destinées à être irriguées avec des eaux usées épurées ne doivent porter aucune culture, autre que celles figurant sur la liste indiquée (Tableau 17).

Tableau 17. Liste des cultures pouvant être irriguées avec des eaux usées épurées (JORA, 2012 in Hannachi *et al.*, 2014).

| Groupes de cultures pouvant être irriguées avec des eaux usées épurées | Liste des cultures |
|---|---|
| Arbres fruitiers (*) | Dattiers, vigne, pomme, pêche, poire, abricot, nèfle, cerise, prune, nectarine, grenade, figue, rhubarbe, arachides, noix, olive. |
| Agrumes | Pamplemousse, citron, orange, mandarine, tangerine, lime, clémentine. |
| Cultures fourragères (**) | Bersim, maïs, sorgho fourragers, vesce et luzerne. |
| Culture industrielles | Tomate industrielle, haricot à rames, petit pois à rames, betterave sucrière, coton, tabac, lin. |
| Cultures céréalières | Blé, orge, triticale et avoine. |
| Cultures de production de semences | Pomme de terre, haricot et petit pois. |
| Arbustes fourragers | Acacia et a triplex. |
| Plantes florales à sécher ou à usage industriel | Rosier, iris, jasmin, marjolaine et romarin. |

(*) L'irrigation avec des eaux usées épurées est permise à condition que l'on cesse l'irrigation au moins deux (2) semaines avant la récolte. Les fruits tombés au sol ne sont pas ramassés et sont à détruire. (**) Le pâturage direct dans les parcelles irriguées par les eaux usées épurées est strictement interdit et, ce afin de prévenir toute contamination du cheptel et par conséquent des consommateurs.

Tableau 18. Directives concernant la qualité microbiologique des eaux usées utilisées en l'agriculture (OMS, 1989).

| Catégories | Condition de réutilisation | Groupe exposé | Coliformes intestinaux (Nombre/100ml) Moyenne géométrique | Procédé de traitement susceptible d'assurer la qualité microbiologique voulue |
|------------|--|--|--|--|
| A | Irrigation des cultures destinées à être consommées crues, des terrains de sports, des jardins publics | Ouvriers agricoles, consommateurs, publics | ≤ 1000 | Une série de bassins de stabilisation conçus de manière à obtenir la qualité microbiologique voulue ou tout autre procédé de traitement équivalent |
| B | Irrigation des cultures céréalières, industrielles et fourragère, des pâturages et des plantations d'arbres | Ouvriers agricoles | Aucune norme n'est recommandée | Rétention en bassins de stabilisation pendant 8 à 10 jours ou tout autre procédé d'élimination d'helminthes et des coliformes fécaux |
| C | Irrigation localisées des cultures de la catégorie B, si les ouvriers agricoles et le public ne sont pas exposés | Néant | Sans objet | Traitement préalable en fonction de la technique d'irrigation, mais au moins sédimentation primaire |

Tableau 19. Paramètres physico – chimique et dosage des ETM (journal officiel de la république algérienne n°41 du 15 juillet 2012).

| Paramètres | Unité | Concentration maximale admissible |
|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Physiques | pH | $6.5 \leq \text{pH} \leq 8.5$ |
| | MES | mg/l |
| | CE | ds/m |
| Chimiques | DBO5 | mg/l |
| | DCO | mg/l |
| | AZOTE (NO ₃ - N) | mg/l |
| Éléments toxiques (*) | Aluminium | mg/l |
| | Cadmium | mg/l |
| | Chrome | mg/l |
| | Cuivre | mg/l |
| | Fer | mg/l |
| | Plomb | mg/l |
| | Zinc | mg/l |

Tableau 20. Paramètres microbiologiques (Journal Officiel de la République Algérienne n°41 du 15 juillet 2012).

| Cultures | Coliformes fécaux (CFU/100ml) (moyenne géométrique) |
|--|--|
| Culture de produits pouvant être consommés crus. | <100 |
| Légumes qui ne sont consommés que cuits. | <250 |
| Cultures industrielles | Seuil recommandé <1000 |

Matériels et Appareillage

◆ Matériels d'échantillonnage

- Bouteille en polyéthylènes.
- flacon stérile en verre.
- Glacière.
- Une perche de prélèvement.

◆ Appareillage

▪ Analyses physiques

- pH mètre
- Conductimètre Delta OMH/HD 3406 ,2.
- balance analytique
- Pastilles Palintest DPD No 1
- Comparateur Palintest (PT 520T)

▪ dosage des métaux lourds

- Etuve à 105°C.
- Broyeur manuel.
- Pastilles en plastiques.
- Support (ultra- thin mylar plastique).
- Spectromètres à dispersion d'énergie (ED-XRF)

▪ l'analyse microbiologique

- Bec benzène
- Les boites de pétri
- Etuve à 37 C°. 44 C°
- Bain marie
- Réfrigérateur
- Flacons en verre de 250ml stériles
- Portoirs
- Anse de platine
- Autoclave

◆ Verrerie

- Pipettes pasteurs stériles à usage unique
- Pipettes graduées de 25ml
- Tuber à essai stériles
- Les boites de pétri

- Flacons en verre de 250ml stériles
- Béchers
- Entonnoir

◆ Milieu de culture

- Bouillon lactosé au pourpre de bromocrésolé (BCPL)
- Bouillon à l'acide de sodium (bouillon de Schubert)
- Bouillon à l'éthyle violet et acide de sodium (Eva-litsky)
- Bouillon lactosé bilié au vert brillant (VBL)
- Milieu Rothe.
- Milieu de Giolitti Cantoni.
- Eau peptonée exempte d'indole
- Gélose Chapman.
- Gélose Héктоene.
- Milieu SFB.
- EPA.
- G.N.A.P.

◆ Réactifs, additifs et solutions

- Eau physiologie stérile
- Réactifs de kowacs
- Téliurité de potassium
- Sélienite de Sodium

❖ Recherche des coliformes

- **Bouillon lactosé au bromocrésolé-pourpre, (BCPL milieu simple et double concentration) en g/l d'eau distillée+la cloche :**

| | |
|--------------------------|--------|
| - Peptone | 5g |
| - Extrait de viande | 3g |
| - Lactose | 10g |
| - Pourpre de bromocrésol | 15g |
| - Bacto-Agar-Difco | 15g |
| - Eau distillée | 1000ml |
| - pH final : 6,9±0,2 | |

- **Bouillon de Schubert en g/l d'eau distillée :**

| | |
|------------------------|------|
| - Tryptophane | 0.2g |
| - Acide glutamique | 0.2g |
| - Sulfate de magnésium | 0.7g |
| - Citrate de sodium | 0.5g |

| | |
|----------------------------|-------|
| - Sulfate d'ammonium | 0.4g |
| - Chlorure de sodium | 2g |
| - Peptone | 10g |
| - Mannitol | 7,5g |
| - Phosphate disodique | 4g |
| - Phosphate monopotassique | 0,6g |
| - Eau distillée | 500ml |
| - pH final : 7,4± 0,2 | |

- **Réactif de kowacs**

| | |
|---------------------------------|------|
| - Paradiméthylaminobenzaldéhyde | 5g |
| - Alcool iso-amylque | 75ml |
| - Acide chlorhydrique | 25ml |

- ❖ **Recherche des streptocoques fécaux**

- **Milieu Rothe (milieu simple et double concentration) en g/l d'eau distillée :**

| | S/C | D/C |
|------------------------------------|------|------|
| - Hydrolysate tryptique de caséine | 12.6 | 25.2 |
| - Peptone bactériologique | 8 | 16 |
| - Glucose | 5 | 10 |
| - Chlorure de sodium | 5 | 10 |
| - Phosphate dipotassique | 2,7 | 5,4 |
| - Phosphate monopotassique | 2,7 | 5,4 |
| - Acide de sodium | 0,2 | 0,4 |

- **Milieu EVA LITSKY en g/l d'eau distillée :**

| | |
|----------------------------|--------|
| - Peptone | 20g |
| - Glucose | 5g |
| - Chlorure de sodium | 5g |
| - Phosphate dipotassique | 2,7g |
| - Phosphate monopotassique | 2,7g |
| - Azohydrate de sodium | 0,3g |
| - Éthyle-violet | 5 ml |
| - Eau distillée | 1000ml |
| pH final : 6,8± 0,2 | |

- **Gélose Chapman**

| | |
|-----------------------------|-----|
| - Peptone | 10g |
| - Extrait de viande de bœuf | 1g |
| - Chlorure de sodium | 75g |

- | | |
|------------------------|---------|
| - Mannitol | 10g |
| - Rouge de phénol | 0,025 g |
| - Agar-agar pH= 7,4 | 15g |

❖ Recherche de salmonella

• Bouillon au sélénite de sodium (SFB)

Composition type en g/l

- | | |
|----------------------------|------|
| - Peptone | 5g |
| - Tryptone | 4g |
| - Chlorure de sodium | 5g |
| - Phosphate dipotassique | 27g |
| - Phosphate monopotassique | 0,2g |
| pH final = 6,9 ± 0,1 | |
| - Phosphate disodique | 4g |
| - Mannitol | |
| - Cystéine | |
| pH final = 7 ± 0,2 | |

Autoclaver à 120 °C pendant 15 min

• Gélose Héktoène

- | | |
|--------------------------------|--------|
| - Protéose peptone | 12g |
| - Extrait de levure | 3g |
| - Lactose | 12g |
| - Saccharose | 12g |
| - Salicine | 2g |
| - Citrate de fer et d'ammonium | 1.5g |
| - Sels biliaires | 9g |
| - Fuchsine acide | 0.1g |
| - Bleu de bromothymole | 0.065g |
| - Chlorure de sodium | 5g |
| - Thiosulfate de sodium | 5g |
| - Agar | 14g |
| - Eau distillée | 1000ml |
| pH finale = 7.5 ± 0,2 | |

❖ Recherche des vibrions

• Eau peptonée alcalin (EPA)

- | | |
|--------------------|-----|
| - Protéase peptone | 10g |
| - Peptone | 10g |

- Chlorure de sodium 5g
 - Sodium thiosulfate 0,3g
- pH final = 8,6
Autoclaver à 120°C pendant 15 min

- **Agar G.N.A.P**

- Peptone de viande 5g/l
 - Extrait de viande 3g/l
 - Chlorure de sodium 2g/l
 - Bile de bœuf desséchée 18g/l
- pH finale = 8.6
Autoclaver à 120°C pendant 15 min