

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun -Tiaret
Faculté des sciences de la Nature
et de la Vie



Thèse de Doctorat en sciences
Filière : Sciences Biologiques

Présenté par :

OUADAH Sahraoui

Thème :

**Valorisation des boues résiduaires de la station
d'épuration de Tiaret pour l'agriculture**

Soutenu le :/...../2023 devant le jury composé de :

DELLAL Abdelkader.....Professeur,..... U. Ibn Khaldoun TiaretPrésident
MAATOUG M'hamed... ..Professeur,.....U. Ibn Khaldoun TiaretDirecteur de thèse
REZZOUG Wafaa..... Professeur.....U. Ibn Khaldoun Tiaret.....Examinatrice
TALEB Amine... ..MCA.....U. Tissemsilt.....Examineur
MOUSSAOUI Badreddine..... MCA.... ..U Tissemsilt.....Examineur
AYACHE Abassia..... MCA.... ..Université Djillali Liabes SBA. Examinatrice

Laboratoire d'accueil :

Laboratoire de recherche d'Agro Biotechnologie et de Nutrition en Zones Semi-arides (Algérie)

Année Universitaire : 2022/2023

Remerciements

Tout d'abord, tout louange à Dieu qui nous a fourni le courage, la capacité et la patience pour réaliser ce modeste projet avec toutes ses difficultés et ses obstacles. Au terme de ce travail, je tiens à exprimer mes sincères gratitude et remerciements à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à l'élaboration de la présente étude et qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à ma formation scientifique.

*C'est avec un grand plaisir que je saisis, l'occasion offerte par l'achèvement de ma thèse de doctorat pour remercier vivement, en premier lieu, mon Directeur de thèse **Pr. MAATOUG M'Hamed** professeur à l'université de Tiaret qui a dirigé ce travail pas à pas, avec beaucoup d'attention, de patience et d'intérêt, et qui m'a fait bénéficier durant ces années de ses conseils et de sa très grande compétence. Je tiens également à lui exprimer toute ma reconnaissance pour la confiance qu'il m'a témoignée au cours de cette recherche.*

*Je tiens à remercier vivement **Pr. DELLAL AEK**, professeur à l'université de Tiaret, qui me fait l'honneur de sa présence en tant que président de jury, ainsi que la professeure **REZZOUG Wafaa** et **Mr TALEB Amine**, **Mr. MOUSSAOUI Badreddine**, **M^{me}. AYACHE Abassia**; maitres de conférences A, qui m'ont honoré en acceptant d'examiner mon travail.*

*Je remercie très sincèrement **Pr ADDA AHMED** pour avoir laissé son empreinte dans ce travail et toute l'équipe de laboratoire, ainsi que le personnel de la faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, de l'université de Tiaret.*

Nous nous excusons si nous avons oublié certaines personnes qui ont collaboré directement ou indirectement à notre formation et la réalisation de ce modeste travail.

En fin que chacun trouve dans cette thèse l'expression de notre louable confiance.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*A ceux que j'aime beaucoup, qui ont sacrifié leurs
vies pour que je réussisse*

*Qu'ils sont toujours de mes côté, ce que j'ai de plus
cher dans ma vie, à vous ma femme et à mes chers
enfants sans oublier mon frère Hocine L. qui a été
toujours à mes cotés*

Résumé

Dans l'agriculture, les boues d'épuration sont utilisées comme engrais pour réhabiliter les sols pauvres et remplacer les engrais de synthèse. Ces boues peuvent être utilisées pour améliorer les caractéristiques physico-chimiques du sol, favoriser la vie microbienne et augmenter la production végétale, là où elles contiennent les nutriments primaires et la matière organique.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'impact du traitement des boues d'épuration sur les caractéristiques physico-chimiques du sol, mais également sur la croissance de la tomate *Solanum lycopersicum*. L'expérimentation consiste à utiliser un mélange boue-sol, avec différentes fractions de boues d'épuration : témoin sol (0% boues), 20 % boues, 40% boues, 60% boues, 100% boues. Des mesures biométriques (hauteur, diamètre de la tige et nombre de feuilles) ont été effectuées sur la tomate.

Les résultats ont montré de bonnes propriétés fertilisantes d'un mélange boue/sol avec la fraction de 60% de boue. Cependant, la tomate qui se développait sur la fraction de 40% avait une meilleure croissance et un feuillage élevé comparativement aux plantes des autres fractions. L'épandage de boues apporte un amendement du sol et un apport supplémentaire de nutriments pour tomate. L'utilisation de fraction de 40 % d'épandage de boues pour la culture de cette plante peut maintenir une meilleure fertilité des sols tout en réduisant le risque d'accumulation des métaux lourds.

Mots clés :

Boue résiduaire, station d'épuration, fraction 40% de boues, *Solanum lycopersicum L.*, Tiaret

Abstract

In agriculture, sewage sludge is used as fertilizer to rehabilitate poor soils and replace synthetic fertilizers. These sludges can be used to improve the physico-chemical characteristics of the soil, promote microbial life and increase plant production, where they contain primary nutrients and organic matter.

The objective of this work is to study the impact of the treatment of sewage sludge on the physico-chemical characteristics of the soil, but also on the growth of the tomato *Solanum lycopersicum*. The experiment consists of using a sludge-soil mixture, with different fractions of sewage sludge: soil control (0% sludge), 20% sludge, 40% sludge, 60% sludge, 100% sludge. Biometric measurements (height, stem diameter and number of leaves) were performed on the tomato.

The results showed good fertilizing properties of a sludge/soil mixture with the 60% sludge fraction. However, the tomato that grew on the 40% fraction had better growth and high foliage compared to plants on the other fractions. The spreading of sludge provides a soil amendment and an additional supply of nutrients for tomatoes. The use of 40% fraction of sludge spreading for the cultivation of this plant can maintain better soil fertility while reducing the risk of accumulation of heavy metals.

Key words:

Residual sludge, treatment plant, 40% sludge fraction, Solanum lycopersicum L., Tiaret

ملخص

يتم استخدام حمأة الصرف الصحي في الميدان الزراعي كسماد لإعادة تأهيل التربة الفقيرة واستبدال الأسمدة الاصطناعية. يمكن استخدام هذه الحمأة لتحسين الخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة ، وتعزيز الحياة الميكروبية وزيادة إنتاج النبات ، حيث تحتوي على مغذيات أولية ومواد عضوية.

الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير معالجة حمأة الصرف الصحي على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة ، وكذلك على نمو طماطم *Solanum lycopersicum*. تتكون التجربة من استخدام خليط التربة والحمأة ، مع أجزاء مختلفة من حمأة الصرف الصحي: التحكم في التربة (0% الحمأة) ، 20% الحمأة ، 40% الحمأة ، 60% الحمأة ، 100% الحمأة. تم إجراء القياسات الحيوية (الطول وقطر الساق وعدد الأوراق) على الطماطم.

أظهرت النتائج خصائص تسميد جيدة لخليط الحمأة / التربة بنسبة 60% من الحمأة. ومع ذلك ، فإن الطماطم التي نمت على الجزء 40% كان لديها نمو أفضل وأوراق شجر عالية مقارنة بالنباتات في الأجزاء الأخرى. يوفر انتشار الحمأة تعديلاً للتربة وإمداداً إضافياً بالمغذيات للطماطم. يمكن أن يؤدي استخدام 40% من انتشار الحمأة لزراعة هذا النبات إلى الحفاظ على خصوبة التربة بشكل أفضل مع تقليل مخاطر تراكم المعادن الثقيلة.

الكلمات المفتاحية :

الحمأة المتبقية ، محطة المعالجة ، 40% جزء الحمأة ، تيارت ، طماطم *Solanum lycopersicum* L

Table de Matière

Table de Matière

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale.....	2
----------------------------	---

Section I : Partie bibliographique

Section I, Chapitre 01 : Généralité sur la boue et le traitement des eaux usées

I.1. Traitement des eaux usées dans une station d'épuration.....	6
I.1.1. Pré-traitements.....	6
I.1.2. Traitement primaire	7
I.1.3. Traitements secondaires.....	7
I.1.3.1 Traitements physico-chimiques.....	7
I.1.3.2 Traitements biologiques	8
I.1.3.2.1 Traitement biologique par boues activées.....	8
I.1.3.2.2 Traitement biologique par lit bactérien	9
I.1.4. Le traitement tertiaire.....	10
I.1.4.1 Réduction des matières en suspension et de la pollution organique biodégradable	10
I.1.4.2 Réduction de la pollution organique non biodégradable	10
I.1.4.3 Réduction de la pollution phosphorée : la déphosphatation.....	10
I.1.4.4 Élimination des germes pathogènes : la désinfection.....	11
I.2. Traitement des eaux usées par lagunage.....	12
I.3. La valorisation agricole des boues urbaines	12
I.3.1. Panorama de l'épandage en agriculture.....	12
I.3.2. Intérêt agronomique des boues.....	13
I.3.3. Mise en œuvre de la valorisation agricole.....	13

I.4. Effet sur le sol	13
I.4.1. Effet sur les propriétés physiques	13
I.4.2. Effet sur la matière organique	14
I.5. Métaux lourds	14

Section I, Chapitre 02 : Généralité sur la tomate« Solanum lycopersicum »

Introduction	17
II.1. Description sommaire de la tomate	17
II.2. Classification botanique (systématique)	18
II.3. Exigence de culture	19
II.4. Préparations et plantation	21
II.4. 1. La préparation du sol	21
II.4. 2. Les semis	22
II.4. 3. Repiquage	22

Section II : Partie Expérimentale

Section II, Chapitre 01 : Matériels et méthodes

Introduction	25
I. Origine du matériel expérimentale	25
I. 1. Présentation de la station d'épuration de Tiaret	25
I.1.1. Caractéristique de la STEP (Horizon 2015)	26
I.1.2. Procédés de fonctionnement de la station d'épuration	27
I. 1.3. La récupération et le traitement d'eau	28
I.2. Production de boue	29
II. Conduite de la culture de tomate	30
II.1. Préparation du substrat de culture	30
II. 2. Le matériel végétal utilisé et conduite des essais	30
II.2.1. Le matériel végétal	30
II.2.2. La préparation et la conduite des essais	31
III. Mesure et analyses effectuées au laboratoire	32
III.1. Caractérisation physico-chimiques du sol et des boues résiduaire constituant le substrat de culture	32
III.1.1. La texture	32

III.1.2. Le pH.....	33
III. 1.3. Le carbone organique.....	33
III. 1.4. La teneur en calcaire total	33
III. 1.5. La teneur en calcaire actif	33
III. 1. 6. La conductivité électrique.....	33
III. 1.7. La capacité d'échange cationique	34
III. 1.8. L'azote total.....	34
III. 1.9. Les métaux lourds	34
III. 2. Les traits mesurés sur les plants de tomate.....	34
IV. L'analyse des résultats	34

Section II, Chapitre II : Résultats et discussion

II.1. Propriétés physico-chimiques du mélange boue/sol.....	36
II.2. Évolution des métaux lourds Pb, Zn, Cu en fonction des différentes fractions de substrat	38
II.3. Caractérisation de la distribution granulométrique dans les différentes fractions de boues (Moyenne ± ET).....	39
II.4. Croissance et productivité du tomate <i>Solanum lycopersicum</i> dans le mélange boue-sol	40
II.5. Effet de la boue résiduaire sur certains traits de croissance chez la tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.).....	42
II.6. Effet d'apport de boues résiduaires sur le sol et la Tomate. Interaction : Boues résiduaires– Sol- Tomate	42
III- Travaux de recherches de l'université de Tiaret sur la valorisation des boues résiduaires et perspectives de leurs utilisations	46
Conclusion générale	51
Références bibliographiques	57
Annexe I. Propriétés physico-chimiques de différentes fractions sol/boue.....	64
Annexe II. Concentrations du Pb, Cu et du Zn dans différentes fractions sol/boue	65
Annexe III. Paramètres biométriques de la Tomate mesurés dans différentes fractions sol/boue.....	66

Liste des abréviations

ACC : Analyse Des Correspondances Canoniques
A.F.E.E : Association Française des Evaluateurs Externes
ADEME: Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AFNOR: Association Française de Normalisation
C/N: Rapport Carbone / Azote
C: Carbone total
CO : Carbone Organique
CE : Conductivité Electrique
CEC: Capacité d'Echange Cationique
CEN: Le Comité Européen de Normalisation
Cr: Chrome
CTO: Composés trace organiques
Cu: Cuivre
DBO : Demande Biochimique En Oxygène
DCO : Demande Chimique En oxygène
DGF : Direction générale des forêts
EH : équivalents habitants
ETM: Elements traces métalliques
FAO: Food and agriculture organization
Fe: Fer
H₂SO₄: Acide sulfurique
Ha : Hectare
HF : Acide fluorhydrique
Hg : Mercure
HNO₃: Acide nitrique
J : Jour
K : Potassium
K₁ : Coefficient isohumique
K₂ : Coefficient De Minéralisation
Meq: Milliéquivalent
MES: Matière en suspensions
MF: Matière fraîche
mmhos : Millimhos
Mn: Manganèse
MO: Matière organique
MS : Matière sèche
ms : Millisiemens
MST : Matière sèche totale
N: Azote total.
Ni: Nickel
NPP : Nombre le Plus Probable
NPPUC : Nombre le Plus Probable d'Unités Cytopathiques
ONA: Office Nationale d'Assainissement
OTV : Traiter et valoriser les boues
O₂: Oxygène
P : Phosphore
Pb : plomb
PCB: PolyChloroBiphényles
pH : potentiel D'hydrogène
ppm : Partie pour million
STEP : Station traitement des eaux polluées
Zn: Zinc

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau N°01 : les conséquences de la contamination par les métaux lourds (Zinc, Nickel, Cadmium) (Soudani, 2017)	15
Tableau N° 02 : Températures requises pour les différentes phases de développement d'un pied de tomate (Martin, 2020)	19
Tableau N° 03 : Quantité des eaux usées de la station de Tiaret	28
Tableau N°04 : Caractérisation physico-chimique des différentes fractions de boues (Moyenne ± ET)	36
Tableau N°05 : Caractérisation de la distribution granulométrique dans les différentes fractions de boues (Moyenne ± ET)	40
Tableau N°06 : Paramètres biométriques des tomates cultivées dans différentes fractions de boues (Moyenne ± ET)	41
Tableau N°07 : Effet du mélange du substrat (sol, boue résiduaire) sur les traits morphologiques de la tomate.....	42
Tableau N°8 : Caractéristiques physicochimiques du substrat de différents types de mélange (Soudani, 2017)	48

Liste des figures

Liste des figures

<i>Figure N°01 : Schéma de fonctionnement d'une station d'épuration à boues activées (d'après «les boues d'épuration municipales et leur utilisation en agriculture» élaboré par le Comité Technique Permanent sur l'épandage des boues d'épuration et édité par l'ADEME)</i>	09
<i>Figure N° 02 : Bassin à lit bactérien (ADEME, 2001)</i>	10
<i>Figure N° 03 : Situation géographique de la station d'épuration (Larab, 2019)</i>	25
<i>Figure N°04 : Les cinq collecteurs principaux de la STEP de Tiaret, (Larab, 2019)</i>	26
<i>Figure N°05 : L'exutoire des eaux épuré plus les rejets de quelque localité En amont dans le barrage Dahmouni (Larab, 2019)</i>	27
<i>Figure N°06 : Maquette de la STEP de la Ville de Tiaret (Larab, 2019)</i>	27
<i>FigureN°07 : lits de séchage des boues primaires et secondaires de la STEP (cliché, SOUDANI, 2015)</i>	30
<i>Figure N°08 : pré-germination des graines. (cliché sahraoui, 2020)</i>	31
<i>Figure N°09 : repiquage des plantules dans les alvéoles (cliché sahraoui, 2020)</i>	31
<i>Figure N°10 : culture semi contrôlée des jeunes plants de la tomate (Solanum lycopersicum) (cliché sahraoui, 2020)</i>	32
<i>Figure N° 11: .Évolution des métaux lourds Pb, Zn, Cu en fonction des différentes fractions de substrat</i>	39
<i>Figure N°12 : Relation boues résiduaires – sol – plante réalisé par analyse canonique des correspondances(ACC)</i>	44

Introduction générale

Introduction générale

Les boues sont définies par le Comité Européen de Normalisation (CEN) comme «un mélange d'eau et de matières solides, séparé par des procédés naturels ou artificiels des divers types d'eau qui le contiennent». Les boues sont issues du traitement des eaux usées domestiques ou industrielles. L'épuration de ces eaux usées s'effectue en différentes étapes (qui seront décrites par la suite) selon des techniques basées sur des lois de la physique, de la chimie et de la biologie. Il en résulte une eau épurée que l'on rejette dans le milieu naturel et un résidu principal : les boues. Ce résidu est constitué de matières minérales inertes, d'azote, de phosphore et de matières organiques (Jarde et *al*, 2003)

Le traitement et l'élimination des boues représentent environ la moitié des dépenses de fonctionnement des stations d'épuration. Les techniques traditionnelles d'élimination des boues, telles que la mise en décharge, l'incinération et l'élimination en mer, présentent un certain nombre d'inconvénients. La mise en décharge et l'incinération des boues ont toutes deux des conséquences environnementales importantes en raison de la contamination des eaux souterraines et de la création de gaz à effet de serre (Scholz, 2016).

D'une part, les boues d'épuration sont nocives pour l'environnement, mais d'autre part, elles peuvent être utilisées comme engrais en agriculture biologique (Jarde, 2003 ; Soudani et *al*, 2017).

Afin que la plante valorise au mieux son potentiel génétique, il faut que le milieu où elle se développe lui assure non seulement les meilleures conditions édaphiques (propriétés physiques et chimiques) de croissance, mais aussi les meilleures conditions d'alimentation possible. Pour qu'un sol soit fertile, il faut un certains nombres de critères qui entrent en jeu parmi lesquels l'existence en quantités suffisantes et sous forme assimilable des éléments nutritifs pour les plantes et par conséquent ces dernières n'ont pas d'autres contraintes que les conditions climatiques.

L'utilisation de boues traitées dans l'agriculture peut réduire considérablement le coût d'élimination, protéger l'environnement, réduire les prix par rapport aux engrais commerciaux, offrir des nutriments essentiels aux plantes et augmenter la fertilité des sols (Dominguez et *al*, 2012). Des ajouts organiques sont nécessaires pour améliorer la fertilité et la productivité des sols dans les terres arides en raison de la faible concentration de matière organique (Scholz, 2016). Pour cela, nous émettons l'hypothèse que les boues urbaines peuvent améliorer les teneurs

en matière organique des sols agricoles, favorisant ainsi la croissance des plantes et réduisant le volume de boues d'épuration produites.

En parallèle la présence des éléments traces métalliques dans ces boues pose un problème de phytotoxicité pour les plantes à large consommation. Selon (Boumont, 2004) La seule voie de contamination préoccupante pour les éléments traces est la consommation des plantes cultivées, dans lesquelles ils s'accumulent.

En Algérie et particulièrement les zones arides et semi arides les déficiences en matières organiques et éléments fertilisants constituent un deuxième facteur limitant après l'eau dans la production végétale, toute fois l'application des boues résiduaires au sol s'avère un alternatif, vue sa richesse en matière organique biodégradable et éléments fertilisants.

Le but de cette étude est de déterminer l'impact de l'application de diverses fractions de boues urbaines de la station d'épuration de Tiaret sur les propriétés du sol, et le développement de la culture de la tomate dans un mélange de boue-sol.

Quatre chapitres fondamentaux ont été présentés dans cette étude, dont le premier présent des généralités sur les boues et les stations d'épurations des eaux usées. Une bibliographie sur la tomate a été adoptée au niveau du chapitre deux, suivi d'une présentation de la zone d'étude et le protocole expérimental adopté, évoquées dans le troisième chapitre. Le quatrième chapitre présente les résultats trouvés dans cette étude et leur discussion et interprétation.

Enfin, nous concluons et nous présenterons des perspectives qu'ouvre ce travail pour des éventuelles extensions de cette pratique.

Partie bibliographique

Chapitre I: Généralités sur les
boues résiduaires

Introduction

Une station d'épuration assure le traitement des eaux usées collectées. L'épuration des eaux usées s'effectue en différentes étapes selon des techniques basées sur des lois de la physique, de la chimie et de la biologie. Le résultat de cette dernière est une eau épurée que l'on rejette dans le milieu naturel et un résidu principal que l'on appelle les boues. Ce résidu est constitué de matières minérales inertes (micro sable, particules de terre) et de matières fermentescibles. La nature des boues varie selon le type de traitement : boues primaires (issues d'une décantation des eaux usées), boues physico-chimiques (issues de traitement de coagulation floculation), boues biologiques.

Les boues font ensuite l'objet de traitements destinés à faciliter leur élimination ultérieure: stabilisation et concentration .La filière de traitement sera décrite un peu plus précisément dans la suite.

Comme sous-produit de l'épuration, à partir du moment où les boues sont utilisées dans un milieu apte à les recevoir, elles perdent leur nature de polluant.

I.1.Traitement des eaux usées dans une station d'épuration

I.1.1. Pré-traitements

Tous eaux arrivent à la station d'épuration vont subir en premier lieu des traitements de dégrossissage, cette opération s'appelle le prétraitement ; qui va 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 (Jardé. E, 2005). Cette étape joue un rôle très important pour un traitement efficace (Ademe, 1995).

Le prétraitement s'appuie sur les types suivants:

- 1) Le dégrillage permet d'éliminer les matières volumineuses (bouteilles, bois...)
- 2) 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.
- 3) Le dessablage permet d'éliminer les graviers, sables ou particules minérales grâce à des pièges à sédiments
- 4) Le déshuilage 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.

Après ces prétraitements, les eaux usées vont suivre la filière «eau» dans le processus d'épuration.

I.1.2. Traitement primaire

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

Les matières subissent une décantation vers le centre du bassin dans les décanteurs primaires. Elles sont alors prélevées par des pompes qui les refoulent jusqu'aux installations de traitement des boues (Jardé. E, 2005).

I.1.3. Traitements secondaires

Les grandes particules de tailles supérieures à 50 microns s'éliminent pendant La décantation. Par contre, la séparation des matières finement dispersées et des colloïdes, qui sont à l'origine de la coloration des eaux, ne peut se faire directement par décantation.

Les espèces colloïdales que l'on rencontre dans une eau brute ou une eau résiduaire comprennent de l'argile, de la silice, du fer et autres métaux lourds et des solides organiques tels que des détritits d'organismes morts. Elles ont une taille inférieure à 1 micron. D'après la loi de Stokes, en régime laminaire leur vitesse de décantation est très faible. (Koller, 2004).

Les traitements secondaires sont nécessaires pour éliminer les particules non décantables et les matières dissoutes, ou ils font l'appel à des procédés physico-chimiques ou biologiques (Morel, 1977 ; Duchene, 1990 ; Debba, 1998 ; ADEME, 2001 ; Albrecht, 2007).

La décantation primaire présente les boues primaires, les boues secondaires; constituent les boues fraîches.

I.1.3.1 Traitements physico-chimiques

Le traitement physico-chimique va permettre d'agglomérer les particules (coagulation – floculation) par adjonction d'agents flocculants (chlorure de fer ou poly-alumino-chlorure PAC). Ces amas de particules ainsi formés seront séparés de l'eau par décantation dans des clarificateurs (élimination des particules formées décantables de taille généralement supérieure à

50 μm). Ce traitement peut être effectué préalablement aux traitements biologiques et s'intègre dans ce cas dans les étapes du traitement primaire (Albercht, 2007).

I.1.3.2 Traitements biologiques

Le traitement biologique se fait en mettant en contact l'eau à épurer à des micro-organismes. Ceux-ci vont se nourrir des matières organiques présentes dans les eaux usées et vont transformer les polluants :

- 1) par absorption des matières polluantes sur floc bactérien (agglomérat de micro-organismes),
- 2) par conversion en matière cellulaire,
- 3) par oxydation en CO_2 et H_2O qui produit l'énergie nécessaire au fonctionnement et à la production du matériau cellulaire (Petit, 2007).

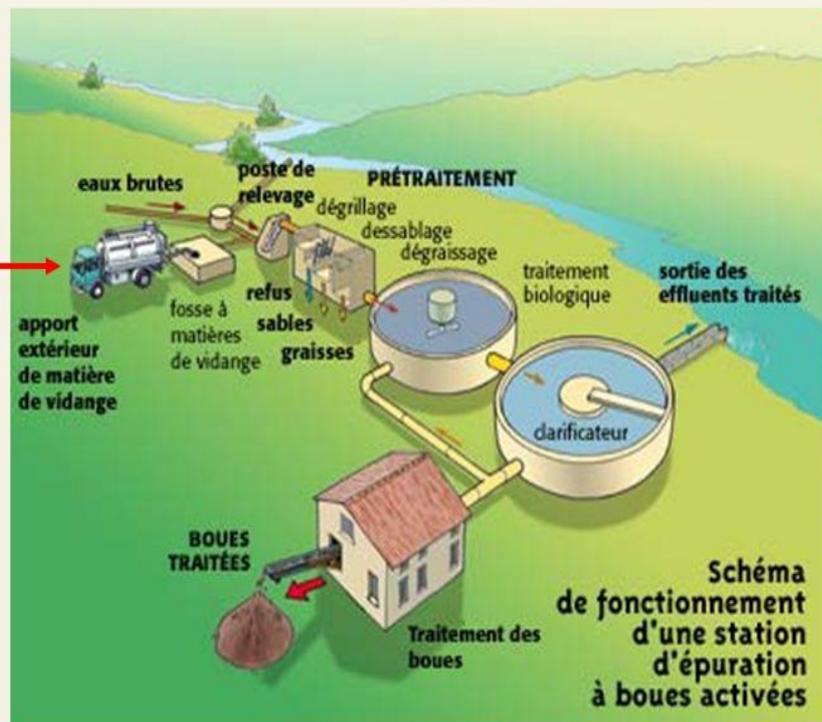
Si la culture est en suspension dans un bassin aéré, il s'agit du procédé à boues activées. Dans le procédé de type lit bactérien par contre, la culture est fixée ou retenue sur un support solide. D'autres processus sont aussi utilisés (tel que les disques biologiques, ...), mais dans le présent travail nous ne présenterons que les deux modes de traitements biologiques les plus fréquents.

I.1.3.2.1 Traitement biologique par boues activées

Ce type de traitement implique l'aération du bassin des eaux usées afin d'assurer les conditions adéquates oxygénation (O_2) pour le développement des micro-organismes qui s'agglomèrent et forment le floc bactérien. Les matières organiques polluantes vont être captées par ces floes et former des boues activées qui sont brassées et assurent l'épuration des eaux usées dans le bassin. A l'aval de ce traitement, un clarificateur (ou décanteur secondaire) permet l'isolation des boues. Pour conserver un stock constant et suffisant de bactéries dans le bassin de boues activées, une partie des boues extraites du clarificateur est renvoyée en tête de bassin. L'autre partie est évacuée du circuit et dirigée vers les unités de traitement des boues (Petit, 2007).

Matières de Vidange

Une station d'épuration devrait toujours comporter une fosse destinée à recevoir les matières collectées lors de l'entretien des fosses septiques.



<http://www.ademe.fr/partenaires/boues/pages/f14.htm>

Figure N°.01: Schéma de fonctionnement d'une station d'épuration à boues activées (d'après «les boues d'épuration municipales et leur utilisation en agriculture» élaboré par le Comité Technique Permanent sur l'épandage des boues d'épuration et édité par (ADEME, 2001)

I.1.3.2.2 Traitement biologique par lit bactérien

Le principe du traitement par lit bactérien consiste à faire ruisseler l'eau à traiter, préalablement décantée (traitement primaire), sur un support poreux contenant les micro-organismes épurateurs. L'eau à traiter est répartie uniformément à la surface du filtre (dispersion en pluie par une grille de répartition (fig.2), puis suit une phase d'aération pour apporter dans toute la biomasse du lit l'oxygène nécessaire au maintien des bonnes conditions pour la microflore, l'objectif final n'étant pas de développer une biomasse, mais de restituer une eau purifiée. Une étape de séparation liquide-biomasse est assurée par un dispositif de clarification. Comme pour les boues activées, une partie de ces boues sert à réensemencer les bassins biologiques tandis que le reste est transféré vers la filière boue (Petit, 2007)



Figure N°.02: Bassin à lit bactérien (ADEME, 2001)

I.1.4. Le 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.

I.1.4.1 Réduction des matières en suspension et de la pollution organique biodégradable

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.

I.1.4.2 Réduction de la pollution organique non biodégradable

Pour fixer les matières carbonées dissoutes non biodégradables (par exemple les détergents), le moyen le plus utilisé est l'adsorption sur charbon actif.

I.1.4.3 Réduction de la pollution phosphorée : la déphosphatation

Le principal inconvénient de la forte teneur en phosphore dans les eaux est de favoriser l'eutrophisation des cours d'eau, des lacs et des milieux marins.

Eutrophisation: enrichissement excessif d'un milieu aquatique (notamment si les eaux sont stagnantes ou à circulation réduite) en éléments nutritifs ou en matières organiques, provoquant un développement surabondant de biomasse végétale dont la décomposition ultérieure consomme, en partie ou en totalité, l'oxygène dissous dans l'eau et réduit la

biodiversité du milieu aquatique facteur clé de la lutte contre l'eutrophisation des rivières et des lacs.

Le phosphore présent dans les eaux peut avoir trois origines :

- les apports diffus d'origine agricole (élevage, engrais...),
- les apports industriels (industrie agro-alimentaire, industrie de pâte à papier...),
- les apports domestiques.

Les techniques de déphosphatation qui sont généralement appliquées font appel à des réactions de précipitation (procédés physico-chimiques) ou à des micro-organismes épurateurs qui assurent une sur-élimination du phosphore (procédés biologiques).

- 1) La déphosphatation chimique se fait grâce à l'utilisation de réactifs (tels que les sels de fer et d'aluminium ou la chaux) qui donnent naissance à des précipités ou complexes insolubles séparés de l'eau par des techniques de séparation solide-liquide.
- 2) La déphosphatation biologique repose sur un transfert de phosphore de la phase liquide (eaux usées à épurer) vers la phase solide (boues) par stockage intracellulaire. Cette accumulation conduit à la formation de granules de polyphosphates (poly-P) et entraîne un enrichissement progressif de la boue en phosphore jusqu'à des teneurs très importantes. Il est alors aisé d'assurer l'élimination du phosphore de l'eau par simple soutirage des boues en excès après une étape de décantation (Amir, 2005).

I.1.4.4 Élimination des germes pathogènes : la désinfection

Par définition, les eaux usées urbaines, parce qu'elles représentent les déchets de la vie individuelle et collective des agglomérations, contiennent des micro-organismes pathogènes susceptibles d'être à l'origine de maladies (bactéries, virus, parasites...). La désinfection a pour but de détruire les micro-organismes pathogènes. Les différents procédés de désinfection susceptibles d'être mis en œuvre utilisent :

- Le chlore (à l'état gazeux ou sous forme d'hypochlorite de sodium : eau de Javel). Ce moyen de désinfection et de stérilisation est le plus utilisé et le mieux maîtrisé,
- le bioxyde de chlore (ClO_2) qui est un réactif très performant mais dont la mise en œuvre est délicate et nécessite une surveillance importante,
- l'ozone : il est très performant et très efficace pour l'élimination des virus mais il est encore actuellement peu utilisé en raison du coût élevé de sa mise en œuvre,
- les rayons ultraviolets.

Parmi les différentes techniques de traitements tertiaires, la déphosphatation est celle qui est principalement utilisée dans la majorité des stations d'épuration (Amir, 2005).

I.2. Traitement des eaux usées par lagunage

Dans les villes ou villages qui ne sont pas reliés au réseau urbain et pour lesquels l'installation d'une station est trop onéreuse, l'épuration se fait par la méthode du lagunage.

Le lagunage est surtout développé pour les communes de moins de 2000 équivalent-habitants. Ce procédé d'épuration des eaux usées consiste en un lent écoulement de l'eau dans un ou plusieurs réservoirs peu profonds (la profondeur des lagunes varie de 0,5 à 1,5 m) où prolifèrent des bactéries et autres organismes vivants au détriment des matières organiques et des sels minéraux contenus dans les eaux. L'apport d'oxygène se fait par échange avec l'atmosphère ou par photosynthèse des algues de surface. Le temps de séjour dans les réservoirs est élevé (3 à 30 jours voire plus) ce qui entraîne une diminution du nombre d'agents pathogènes (bactéries, virus, parasites...) (A.F.E.E, 1976).

Ce processus d'épuration biologique permet l'élimination des matières organiques biodégradables avec production de sels minéraux, entraînant un phénomène d'eutrophisation (souligné par la production d'algues). Celui-ci est profitable au lagunage, car la photosynthèse des algues qui se forment fournit l'oxygène nécessaire au développement des bactéries qui vont dégrader cette matière organique selon les processus de fermentation aérobie. Le lagunage permet également l'élimination de la pollution microbienne, ce qui est un avantage par rapport aux autres techniques d'épuration. Les boues vont se concentrer sur le fond des lagunes (bassins de terre), intervenir dans la biologie du système et ne devront pas être évacuées avant 5 ou 10 ans.

I.3. La valorisation agricole des boues urbaines

I.3.1. Panorama de l'épandage en agriculture

L'épandage sur les sols agricoles est une pratique qui concerne différents produits:

- les déjections animales: 27010⁶tonnes: fumier, lisier, fientes,
- les sous-produits et déchets industriels : dans les industries agro-alimentaires, la valorisation agronomique des sous-produits est évaluée à 410⁶tonnes, non comprises les boues et les eaux usées,
- les déchets des collectivités et des ménages : les boues d'épuration représentent 5 000 000 de tonnes brutes soit 850000 tonnes de matières sèches, le compost et déchets verts représentent moins de 10000000 de tonnes, les matières de vidange issues de l'assainissement individuel en partie épandues représenteraient plusieurs millions de tonnes .Ce tonnage de boues est très modeste et les surfaces agricoles concernées sont très faibles.

I.3.2. Intérêt agronomique des boues

Riches en matières organiques, parfois en calcium ainsi qu'en certains éléments fertilisants, les déchets urbains sont potentiellement intéressants pour améliorer les propriétés des sols (Mbila, 2000). Les boues agissent comme un catalyseur de la biologie du sol et non pas seulement comme un engrais au sens strict du terme.

Il y a une dizaine d'années, c'était surtout la valeur fertilisante azotée et phosphatée des boues résiduelles qui motivait leur utilisation. La teneur en azote et en phosphore représente 3 à 7 % de la matière sèche.

I.3.3. Mise en œuvre de la valorisation agricole

La mise en œuvre de la valorisation agricole des boues comporte:

1- Les études préalables : détermination de la faisabilité de la valorisation agricole (vérification de la conformité de boues, caractéristiques du milieu naturel, étude du milieu agricole),

2- L'épandage proprement dit : définition du plan d'épandage, caractéristiques de la station et des boues produites, détermination du périmètre d'épandage, définition des modalités pratiques d'un épandage satisfaisant, présentation des résultats,

3- Le suivi de l'épandage ou la définition du suivi et l'auto-surveillance des épandages : élaboration et exploitation du cahier d'épandage, suivi analytique des boues et des sols, conseil agronomique.

Phase contractuelle d'établissement d'une convention entre le producteur de boues et l'utilisateur (Derouiche, 2012)

I.4. Effet sur le sol

I.4.1. Effet sur les propriétés physiques

Une amélioration remarquable est enregistrée pour la structure du sol dans un mélange du compost de boue et sol, riche en matière organique. Augmente sa porosité totale et diminue sa densité apparente (Pagliali et *al*, 1993).

Cependant, selon Pagliali et Antisari en 1993, l'activité du sol est améliorée en microorganismes, macro et microfaune du sol. L'érosion par ruissellement est limitée par une meilleure pénétration de l'eau dans le sol. La capacité de rétention en eau s'augmente, ce qui présente un intérêt certain en région méditerranéenne où la croissance des végétaux est limitée à cause du stress hydrique.

I.4.2. Effet sur la matière organique

Les amendements en matière organique, quel que soit leur origine, améliorent l'ensemble des propriétés d'un sol et donc sa fertilité. La matière organique peut être répartie en trois formes correspondant aux trois stades de décomposition de ces dernières :

- Les matières organiques fraîches sont les déchets végétaux ou animaux qui retournent ou qui sont apportés au sol,
- Les produits transitoires résultant de la décomposition active de ces matières fraîches,
- l'humus stable est enfin synthétisé à partir de certains de ces produits transitoires: des éléments carbonés issus principalement de la lignine et de la cellulose oxydée et des matières azotées à divers stades de décomposition.

Deux coefficients quantifient les transformations de ces formes de la matière organique .Le coefficient isohumique K_1 représente le pourcentage de matière sèche apporté chaque année au sol et transformé en humus. Le coefficient K_1 dépend beaucoup du type d'amendement humifère. Pour une boue d'épuration, le coefficient K_1 se situe au environ de 20 % (Saruhan et *al*, 2010). Le coefficient de minéralisation de l'humus K_2 représente le pourcentage de l'humus stable minéralisé par an. Ce coefficient dépend surtout du type de sols. Il passe de 2.5 % pour les sols sableux noncalcaires à 1.5% pour les sols limoneux et enfin descend à moins de 0.5 % pour les sols très calcaires ($\text{CaCO}_3 > 50\%$).

Les matières organiques améliorent les qualités physiques du sol:

- elles améliorent ou stabilisent la structure du sol,
- elles régularisent l'humidité des sols en favorisant l'évacuation de l'eau en excès des sols argileux et en augmentant la capacité de rétention des sols sableux.

Les matières organiques améliorent les propriétés chimiques du sol:

- les colloïdes humiques augmentent la capacité d'échange du sol,
- les matières organiques dans l'ensemble sont, par leur décomposition, une source d'éléments nutritifs pour la plante.

Les matières organiques stimulent l'activité biologique : elles servent de support et d'aliment pour la faune et la flore du sol dont dépend la bonne nutrition des plantes.

I.5. Métaux lourds

En fonction de la taille des stations d'épuration, varie la composition en ETM. Les sols peuvent contenir des métaux en plus ou moins grande quantité selon la nature de la roche mère, et l'intensité des pollutions anthropiques diffuses auxquelles ils sont soumis. Ce qui met en relation

cette dernière avec leur capacité intrinsèque à retenir les éléments métalliques (teneur en argiles, CEC).

Selon Soudani en 2017, Parmi les métaux lourds, le zinc, le cuivre, le bore, le fer, le molybdène et le manganèse sont des microéléments essentiels à la croissance des plantes et leur présence dans les boues est bénéfique. Cependant, ils ne doivent pas dépasser certaines concentrations, car ils deviennent toxiques (St-Yves, 1984) et risquent de diminuer les rendements de la végétation (Atalay et Blanchar, 1984; Sommers, 1977)

Certain métaux lourds comme le plomb, le nickel, le cadmium, le mercure et le chrome, se retrouvent dans les boues, mais ils sont tout à fait inutiles dans le métabolisme des plantes.

Chang et al, 1984; Schalscha et al, 1982 ont déclarés que la toxicité des métaux lourds dépend de leur quantité, mais surtout de leur spéciation. La forme ionique libre est reconnue comme la plus dangereuse, car, étant soluble, elle est directement assimilée par les plantes (Adams et Sanders, 1984; Lester et al, 1983). A ce titre inductif, les conséquences de la contamination par les métaux lourds sont illustrées dans le tableau 1.

Tab.1: les conséquences de la contamination par les métaux lourds (Zinc, Nickel, Cadmium) (Soudani, 2017)

Eléments	Effet
Zinc	Provoque une détérioration de l'appareil chlorophyllien et compromet l'activité d'assimilation
Nickel	Son action toxique se manifeste par un dépérissement général de toutes les parties du végétal et la destruction graduelle de l'appareil chlorophyllien
Cadmium	Empêche le développement des végétaux, ou même provoque la mort des plantes à des doses élevées.

Chapitre II: Généralités sur
la tomate Solanum
lycopersicum

Introduction

La tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) est devenue un des légumes les plus importants du monde. En 2001, la production mondiale de tomates était d'environ 105 millions de tonnes de fruits frais sur une superficie évaluée à 3,9 millions d'hectares. Comme c'est une culture à cycle assez court qui donne un haut rendement, elle a de bonnes perspectives économiques et la superficie cultivée s'agrandit de jour en jour. La tomate appartient à la famille des *Solanaceae*. Cette famille regroupe d'autres espèces qui sont également bien connues, telles que la pomme de terre, le tabac, le poivron et l'aubergine.

II.1. Description sommaire de la tomate

La tomate est originaire des Andes d'Amérique du Sud. Elle fut domestiquée au Mexique, puis introduite en Europe en 1544. De là, sa culture s'est propagée en Asie du Sud et de l'Est, en Afrique et en Moyen Orient. Plus récemment, la tomate sauvage a été introduite dans d'autres régions de l'Amérique du Sud et au Mexique.

Parmi les noms communs utilisés pour désigner la tomate, il y a les suivants : tomate (Espagnol, Français), tomat (Indonésien), faan ke'e (Chinois), tomati (Afrique de l'Ouest), tomatl (Nahuatl, langue indigène du Mexique), jitomate (espagnol mexicain), pomodoro (Italien), Nyanya (Swahili) (Shankara et *al*, 2005).

La consommation des fruits de la tomate contribue à un régime sain et équilibré. Les fruits sont riches en minéraux, en vitamines, en acides aminés essentiels, en sucres ainsi qu'en fibres alimentaires. La tomate contient beaucoup de vitamines B et C, de fer et de phosphore. Les tomates se consomment fraîches en salade ou cuites dans des sauces, des soupes ou des plats de viande ou de poisson. Il est possible de les transformer en purée, en jus et en ketchup. Les fruits séchés et les fruits mis en conserve sont des produits transformés qui ont également une importance économique (Martin, 2020).

La tomate est une plante annuelle, qui peut atteindre une hauteur de plus de deux mètres. Cependant, en Amérique du Sud, il est possible de récolter d'une même plante pendant plusieurs années d'affilée.

La première cueillette peut avoir lieu 45 à 55 jours après la floraison, ou 90 à 120 jours après semis. La forme des fruits varie selon le cultivar. La couleur varie dans la gamme du jaune au rouge. On peut distinguer deux types différents de plantes de tomates, selon le mode de croissance :

- le type à croissance indéterminée
- le type à croissance déterminée

Les deux types de mode de croissance conduisent à deux types de culture tout à fait différents. Il existe également des variétés de tomate à croissance semi-déterminée (Shankara et al, 2005).

II.2. Classification botanique (systématique) :

La tomate cultivée, *Lycopersicon esculentum* Mill, appartient à la famille des Solanacées (Philouze, 1993). Le deuxième nom scientifique *Solanum lycopersicum* L. a été proposé pour remplacer le premier en usage, depuis de nombreuses décennies. En effet, les éléments historiques montrent que « *Solanum lycopersicum* » a été proposé par Linné en 1753, un an avant la proposition de Miller d'associer la tomate au genre *Lycopersicon* (Blancard et al, 2009). Des études phylogéniques appuient l'idée que la tomate et ses cousins les *Lycopersicon* sauvages doivent être placés dans le genre *Solanum*. Les deux noms continuent d'être utilisés dans la littérature mais « *Solanum lycopersicum* » est de plus en plus fréquent.

Embranchement : Spermaphytes ou Spermatophytes

Sous Embranchement : Angiospermes

Classes : Eudicots évoluées dites Asteridées

Sous-classe : Euastéridées I

Ordre : Solanales

Familles : Solanacées

Genre : *Solanum*

Espèce: *Solanum lycopersicum*

La classification horticole est maintenant abandonnée .La nouvelle est basée sur les critères suivants:

1- variétés à croissance déterminée

Dans ce groupe, on trouve des variétés dont la tige émet un nombre donné de bouquets à fleurs. Mais cette tige principale est terminée par un bouquet à fleurs, comme d'ailleurs les rameaux anticipés .il en résultent que faute de bourgeon terminal la croissance de la tige s'arrête d'elle-même.

2- variétés à croissance indéterminée

Ces variétés présentent une tige principale poussant avec régularité et formant un bouquet à fleurs toutes les trois feuilles généralement .il en résulte que la production des fruits est prolongée. On peut l'arrêter par un pincement du bourgeon terminal à la hauteur souhaitée généralement au-dessus de 4 ou 5 bouquets (Laumonier, 1979).

II.3. Exigence de culture

1- La température et la lumière

La tomate se développe dans un climat relativement frais et sec pour fournir une récolte abondante et de qualité. Cependant, la plante s'est adaptée à une grande diversité de conditions climatiques, allant du climat tempéré vers le climat tropical chaud et humide. La température optimale pour la plupart des variétés se situe entre 21 et 24°C. Les plantes peuvent surmonter un certain intervalle de températures, mais en-dessous de 10°C et au-dessus de 38°C les tissus des plantes seront endommagés.

La tomate réagit aux variations de température qui ont lieu pendant le cycle de croissance (voir tableau .2). Pour donner quelques exemples, cela affecte la germination des graines, la croissance des semis, la floraison, la mise à fruits ainsi que la qualité des fruits. Lorsque des périodes de froid ou de chaleur perdurent pendant la floraison, la production de pollen sera réduite. Ceci affectera la formation des fruits. Le gel tue les pieds de tomate. Pour éviter des dommages dégel, il est prudent d'attendre la fin définitive de l'hiver avant de semer.

Si l'on sème à l'intérieur, il est possible de le faire plus tôt (dans des pots ou des caissettes). L'intensité de la lumière affecte la couleur des feuilles, la mise à fruits et la couleur des fruits (Martin, 2020).

Tableau 2 : Températures requises pour les différentes phases de développement d'un pied de tomate (Martin, 2020).

Phases	Température (° C)		
	Min	Intervalle optimale	Max
Germination des graines	11	16- 29	34
Croissance des semis	18	21- 24	32
Mise à fruits	18	20-24	30
Développement de la couleur rouge	10	20-24	30

Dans les basses-terres des pays tropicaux, la température minimale qui survient la nuit est également à surveiller. Des températures inférieures à 21°C peuvent provoquer l'avortement des fruits.

2- L'eau et l'humidité

Une simple astuce permet de déterminer si les réserves en eau disponibles sont suffisantes pour cultiver la tomate. Si des plantes herbacées (des plantes avec de nombreuses

feuilles fines) poussent dans le milieu naturel, il sera possible d'y faire pousser des tomates. Il faut pouvoir compter sur au moins trois mois de pluie. Le stress causé par une diminution de la teneur en eau et les longues périodes arides fait tomber les bourgeons et les fleurs et provoque le fendillement des fruits. Par contre, lorsque les averses sont très intenses et l'humidité est très élevée, la croissance des moisissures et la pourriture des fruits seront plus importants. Les temps nuageux ralentissent le mûrissement des tomates. Cependant, des cultivars adaptés sont disponibles. Les sociétés semencières ont des variétés de tomates spécialement adaptées aux climats chauds et humides.

3- Le sol

La tomate pousse bien sur la plupart des sols qui ont une bonne capacité de rétention de l'eau, une bonne aération et qui ne contiennent pas des teneurs élevées en sels. Elle préfère les terres limoneuses profondes et bien drainées.

La couche superficielle du sol doit être perméable. Une profondeur de sol de 15 à 20 cm est favorable à la bonne croissance d'une culture saine. Dans les sols argileux lourds, un labour profond permettra une meilleure pénétration des racines.

La tomate tolère modérément un large intervalle de valeurs du pH (niveau d'acidité), mais pousse le mieux dans des sols où la valeur du pH varie entre 5,5 et 6,8 et où l'approvisionnement en éléments nutritifs est adéquat et suffisant. En général, ajouter de la matière organique stimule une bonne croissance. Les sols qui contiennent beaucoup de matière organique, comme les sols tourbeux, sont moins appropriés du fait de leur forte capacité de rétention d'eau et à une insuffisance au niveau des éléments nutritifs (Martin, 2020).

La Tomate se cultive dans presque tous les sols, allés des sols alluvionnaires jusqu'aux sols argileuses les plus lourds. Cependant son développement est remarquable dans des sols légers, perméables meubles et riches en humus ou ces derniers lui conviennent particulièrement bien (Lambert, 2006).

4- Humidité du sol

Les exigences de la tomate en humidité du sol sont très grandes pendant toute la végétation. Cela peut s'expliquer par la capacité potentielle de l'espèce *Lycopersicon Esculentum* à développer dans une période relativement courte, une très grande masse végétative et un très grand nombre de fleurs et de fruits.

5- pH du sol

Selon Chaux et Foury (1994), la tomate est très tolérante en pH. Le meilleur équilibre nutritionnel étant assuré entre 6.0 et 7.0.

6- L'eau

Tomate présentant un système racinaire superficiel, et n'ayant pas la faculté de puiser les réserves d'eau des profondeurs, elle exige une bonne conduite des irrigations. Ces dernières sont surtout prononcées à partir du début de grossissement des fruits ou les besoins de la plante deviennent importants.

La tomate est une plante assez résistante à la sécheresse, surtout si un ameublissement du sol est effectué, car ce dernier lui permet de développer un système racinaire important. Néanmoins, elle exige une humidité suffisante du sol, et les arrosages sont favorables à son développement. On estime que pendant la quarantaine de jours qui suivent la transplantation, les jeunes pieds ont besoin de 50 m³/ha/jour. Pendant la floraison et la maturation, ces besoins en eau sont de l'ordre de 100 à 110 m³/ha/jour. La tomate craint l'excès d'humidité et la stagnation de l'eau. Il faut éviter de mouiller les feuilles durant l'arrosage si on veut éviter les attaques généralisées des maladies cryptogamiques et la chute des fleurs (Andry, 2010).

Selon Chauv et Foury (1994), l'hygrométrie durant la phase végétative doit être maintenue à 70-80% au-delà de cette humidité, cas assez fréquent dans les abris plastiques, les risques des maladies cryptogamiques augmentent.

II.4.Préparations et plantation

II.4.1. La préparation du sol

Il est nécessaire de labourer (ou de bêcher) afin de préparer le sol pour une nouvelle culture. Dans les régions où l'eau est un facteur contraignant, le labour améliore également la capacité de rétention de l'eau.

Un labour effectué après la récolte de la culture précédente améliore la structure du sol ainsi que sa capacité de rétention de l'eau. Cela permet également de réduire les risques de contamination par des ravageurs et des maladies car l'exposition de la terre au soleil ardent peut éliminer ces derniers. Il faut effectuer un labour en profondeur pour casser la couche dure du sous-sol qui est imperméable (la semelle de labour), pour éliminer les mauvaises herbes et pour ameublir le sol. Cette pratique bénéficie également à la croissance des racines. Il est souvent nécessaire de herser à deux reprises pour bien niveler le sol, casser les mottes et éliminer les résidus de culture de la campagne précédente.

On peut cultiver la tomate sur des planches surélevées, sur des billons ou sur des sillons afin de faciliter l'irrigation et le drainage de l'eau. Malgré cela, 60% de la culture se fait encore avec irrigation par ruissellement.

II.4. 2. Les semis

En général on repique les tomates car on obtient des meilleurs résultats lorsque les semis sont levés en pépinière. Il existe deux méthodes pour faire lever les semis en pépinière :

- semer sur un lit de semence
- semer dans une caissette à semis (pratiqué par de nombreux agriculteurs et agricultrices en Asie du Sud-Est)

En pépinière, il faut moins de graines pour produire le nombre de pieds souhaités. On peut y sélectionner les plantules en fonction de leur taux de croissance et de leur état de santé avant de les repiquer sur le sol, on pourra y protéger convenablement les plantules. Par ailleurs, la distance de plantation est plus régulière en cas de repiquage qu'en cas d'ensemencement direct sur le sol.

Préparations de la pépinière

Le lit de semis doit mesurer entre 60 et 120 cm de large et avoir une hauteur de 20 à 25 cm. La longueur de la planche dépendra du nombre de plantules souhaité. Il faut éliminer les mottes et les chaumes. Ajoutez du fumier de ferme bien décomposé ainsi que du sable fin. Il faut bien ameubler le sol afin d'élever un nombre suffisant de semis pour planter un hectare de tomates, il faudra semer entre 150 et 200 g de graines sur 250 m² de lit de semis.

Sur la longueur du lit de semis, dessinez des lignes espacées de 10 à 15 cm. Semez les graines à petits intervalles le long de ces lignes et appuyez doucement. Recouvrez les graines de sable fin et de paille. Arrosez les lits de semis deux fois par jour afin d'assurer que le degré d'humidité soit suffisant pour la germination. Après la germination, il faudra enlever la paille.

II.4. 3. Repiquage

Le repiquage des plantules sur le sol aura lieu entre 3 et 6 semaines après l'ensemencement. Une semaine avant le repiquage, il faudra sevrer les plantules en réduisant l'arrosage, mais 12 à 14 heures avant de les enlever du lit de semis il faudra les arroser copieusement pour éviter les dommages excessifs aux racines lorsqu'on les déterre.

Les plantules de 15 à 25 cm de haut qui ont entre 3 et 5 feuilles réelles sont les plus appropriées pour le repiquage. Ce travail ne devrait être effectué que pendant l'après-midi ou pendant un jour nuageux afin de réduire le choc de transplantation, et il sera nécessaire d'arroser immédiatement.

Partie expérimentale

Chapitre I: Matériels et
méthodes

Introduction

Les boues utilisées dans notre expérimentation sont celles issues de la station d'épuration de Tiaret, qui fonctionne actuellement avec le traitement de 38.000 mètres cubes/jour, soit un traitement plus de trois millions de mètres cubes d'eaux usées par an. Cette station construite par une société Algéro-Allemande, devrait traiter plus de 7 millions de mètres cubes d'eaux usées, pour être ensuite déversées dans le barrage de Dahmouni destiné à l'irrigation de vastes périmètres agricoles d'une superficie de 4.000 hectares. Les boues extraites d'un volume avoisinant 18800m³ sont utilisées en tant qu'apport organique par différents organismes dont la conservation des forêts et les fermes pilotes.

I. Origine du matériel expérimentale

I. 1. Présentation de la station d'épuration de Tiaret

La STEP de Tiaret occupant une superficie de 9,47 hectares (ONA, 2018) est localisée dans la commune d'Ain Bouchekif (Fig.03 ; 04), située à 4,5 km de la ville de Tiaret selon les coordonnées Lambert (35° 21' 21" nord, 1° 30' 38" est).

Les eaux usées d'origine domestique et pluviales émanant des quatre communes, Tiaret, Sougueur, Dahmouni et Aïn Bouchekif (Chafaa et *al*, 2015), arrivent à l'ouvrage par gravité grâce à un réseau de plusieurs collecteurs (cinq collecteurs principaux) (Fig.04). En absence de cet ouvrage ces eaux sont déversées dans Oued Nouria long de 17Km (fig.05), qui les conduit directement dans le barrage de Dahmouni. La conception de cette station d'épuration permet donc de protéger le barrage contre la pollution et le phénomène d'eutrophisation qui conduit à un développement excessif d'algues et par la même un déséquilibre de l'écosystème



Figure N°03: Situation géographique de la station d'épuration (Larab, 2019)

La zone d'Ain BOUCHEKIF est caractérisée par une activité agricole due à la présence de l'oued WASSEL qui verse directement dans le barrage de DAHMOUNI.

I.1.1. Caractéristique de la STEP (Horizon 2015)

- Date d'inscription : 28/12/2002
- Capacité : 390 000 E/H
- Procédé : boue Activée moyen charge par insufflation d'air à fine bulles.
- Débit moyen : 38 000 m³ /j
- Charge polluante : DBO5 :21 060 kg/j
DCO : 42 120 kg/j MES : 27 300 kg/j
- Production de boue: 380 M3/j

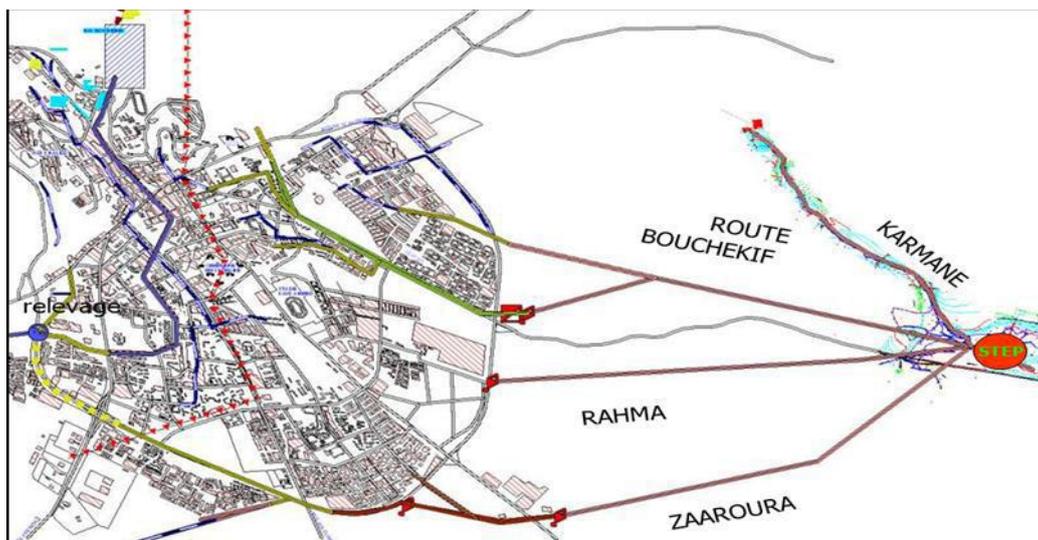


Figure N °04: Les cinq collecteurs principaux de la STEP de Tiaret, (Larab, 2019)

Depuis sa mise en service en année 2008, son fonctionnement a inclus les principaux objectifs englobant, le traitement et la revalorisation des eaux usées d'une part et d'autre part, la récupération des résidus solides (boue résiduaire) leur traitement et leur préparation en intrant fertilisant riche en matière organique. En effet, la réutilisation des eaux traitées et l'application des engrais biologiques issus de la matière solide récupérée, ont contribué efficacement au développement de plusieurs spéculations agricoles au niveau de cette zone (Larab, 2019).



Figure N°05: L'exutoire des eaux épuré plus les rejets de quelque localité En amont dans le barrage Dahmouni (Larab, 2019).

I.1.2. Procédés de fonctionnement de la station d'épuration

Le fonctionnement de la station génère deux produits valorisables (Fig.06), les eaux traitées réutilisables et les boues résiduares (Larab, 2019).

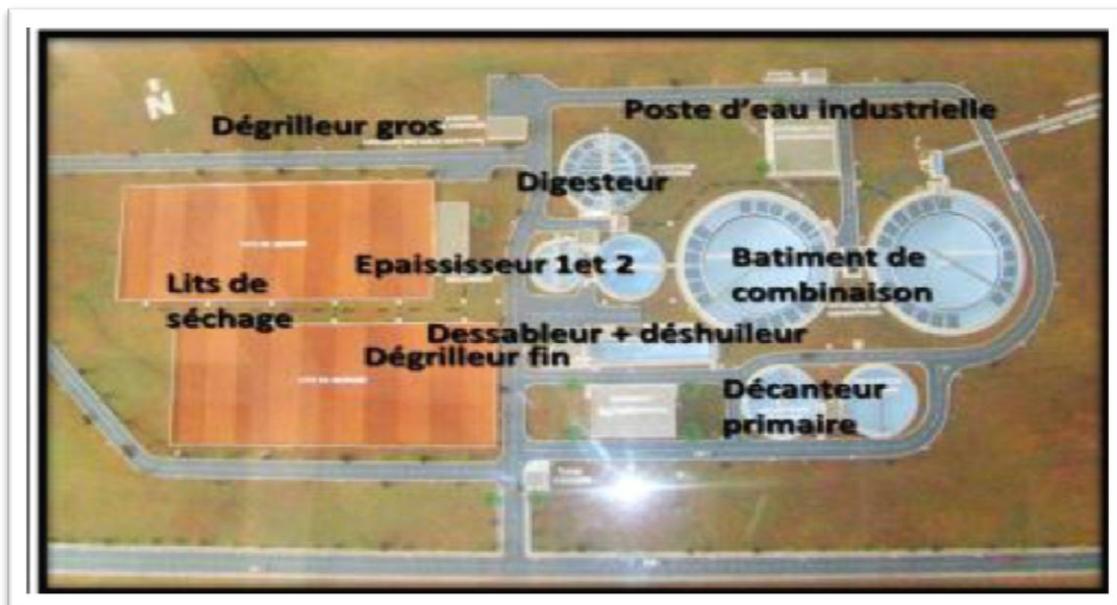


Figure N°06: Maquette de la STEP de la Ville de Tiaret (Larab, 2019)

I.1.3. La récupération et le traitement d'eau

La station traite la quantité d'eau usée (Tab.07) émanant des différentes sources citées précédemment selon un procédé établi par Joseph et *al.* (2002) et basée sur différentes opérations complémentaires. On note ainsi que les manipulations de séparation de boues résiduelles et l'eau sont jumelées. Elles concernent les étapes suivantes et seront détaillées dans le procédé de récupération de la boue :

- Un prétraitement
- Un traitement primaire
- Un traitement secondaire
- La clarification (décantation secondaire)

Les opérations de décantation permettent la séparation d'eau traitée des mélanges solides constituant par conséquent la boue résiduelle, produit récupéré et ayant servi à l'amendement du sol pour la pratique de la culture.

Le tableau n° 03, présente les données de base sur la qualité et la quantité des eaux usées prises en compte par la station en 2015 et à l'horizon 2030 (STEP DE TIARET 2019).

Tableau N° 3 : Quantité des eaux usées de la station de Tiaret.

Paramètre	2015	Horizon 2030
Équivalent Habitant	390 000	473 000
Charges polluantes (Kg/J)		
MES	27 300	33 111
MES réduite	27 480	28 475
DBO₅	21 060	25 542
DCO	42 120	51 085
Charges polluantes (mg/l)		
MES	718	583
DBO₅	554	450
DCO	1108	900
DCO/DBO₅	2	2

Une station d'épuration comprend obligatoirement deux filières de traitement : la filière eau et la filière boue. Les résidus générés de cette dernière, sont traités et déshydratés avant leur évacuation. (Larab, 2019).

Dans la filière eau, l'eau est débarrassée de différents polluants avant son rejet dans le milieu naturel. Cette filière comprend généralement (Joseph et *al*, 2002).

- Un prétraitement
- Un traitement primaire
- Un traitement secondaire
- La clarification (décantation secondaire).

I.2.Production de boue

La production de la boue résiduaire passe les quatre étapes cités ultérieurement et employées conjointement pour l'épuration d'eau. Elle concerne les phases de traitements suivantes où les résidus sont traités et déshydratés avant leur récupération:

- Phase de prétraitement : elle permet d'éliminer les éléments solides les plus grossiers par des procédés physiques tels que la sédimentation, la flottaison et le tamisage. On élimine ainsi les feuilles, les morceaux de papier et de plastique, les graisses, le sable... Les sous-produits de ces opérations de prétraitement seront traités comme des déchets banals.

- Phase des traitements primaires : ils permettent la décantation des matières en suspension par des processus simples. Des traitements physico chimiques ajoutant des agents coagulants ou flocculant sont également employés.

- Phase des traitements et décantation secondaires : il s'agit d'opération de clarification par des traitements biologiques. Ils consistent à extraire les matières organiques dissoutes dans les eaux usées. On utilise des micro-organismes qui vont se nourrir de ces substances dissoutes. Différents procédés existent : le lagunage naturel, les procédés biologiques à culture libre et les boues activées, les procédés biologiques à culture fixées ou bio filtre et à lits bactériens.

Les boues primaires et secondaires évacuées tout au cours du processus de dépollution seront soumis à une déshydratation dans des lits de séchage (Fig.07) (ONA ,2018).



*Figure N°07: lits de séchage des boues primaires et secondaires de la STEP
(Cliché, SOUDANI, 2017)*

II. Conduite de la culture de tomate

II.1. Préparation du substrat de culture

Le substrat de culture utilisé a été préparé à base de sol et de boue résiduaire. Il concerne un traitement témoin constitué de sol uniquement et quatre autres additionnés de boue à des proportions de 20, 40, 60 et 100%. Il faut noter que le sol utilisé pour ces préparations, émane d'une parcelle agricole situé à quelques mètres du campus universitaire de Karman et isolé suffisamment de toute source de de contamination par les polluants du trafic routier.

II. 2. Le matériel végétal utilisé et conduite des essais

II.2.1. Le matériel végétal

La valorisation des boues résiduaires utilisées a été effectuée à travers la culture de la tomate (*Solanum lycopersicum* L.). A cette fin, la variété Aicha a été conduite. Sa culture est très répandue en mode sous serre en Algérie, elle se définit par une croissance indéterminée, à fructification abondante et un fruit rond de gros calibre. Elle est résistante à plusieurs maladies cryptogamiques et virales tel Tomato yellow leaf curl virus (TYLCV).

II.2.2. La préparation et la conduite des essais

Les graines de tomate désinfectées ont été mises en germination (Fig.8) dans des boîtes de Pétri sur un support de coton. Les graines pré-germées ont été repiquées dans des plaques alvéolaires remplies de terreau (Fig.9), maintenues humides et conduites dans une chambre de culture illuminée pendant 12h durant la journée et à une température de 25°C.

Après 1 mois de culture, les plants au stade 3 feuilles complètement différenciées ont été repiqués dans les pots de cultures de dimensions 20cm de diamètre et 20cm de profondeur, remplis de substrat reconstitué selon le mode décrit précédemment (Fig.10). Le dispositif est constitué ainsi de cinq traitements, un témoin (T) où le substrat est constitué de sol, trois autres où le sol a été additionné de boues résiduaires à des proportions de 20% (B1), 40 (B2) et 60% (B3), enfin un dernier traitement où le substrat ne contient que de la boue résiduaire (B4).

Les substrats des différents traitements ont été séchés à l'air et tamisés avec un tamis de 2mm, afin d'éliminer les résidus et avoir un matériau homogène.

L'expérience en pot a été menée dans une conception en bloc complètement aléatoire avec 60 répétitions (Fig.08, 09)



Figure 08 : pré-germination des Graines (cliché sahraoui, 2020)



Figure 09 : repiquage des plantules dans les alvéoles (cliché sahraoui, 2020)



Figure N°10 : culture semi contrôlée des jeunes plants de la tomate (*Solanum lycopersicum*) (cliché sahraoui, 2020)

Chaque traitement est constitué de 60 pots disposés aléatoirement. Le substrat des cinq traitements était maintenu humide à 100%CC par un arrosage régulier avec de l'eau de robinet et ce jusqu'au stade six étages foliaires différenciés obtenu après deux mois de culture (stade des mesures). La dose d'irrigation a été déterminée par pesée des pots. L'essai a été conduit dans une serre où les températures nocturne et diurne ont été maintenues respectivement à 10 et 25°C et une humidité relative d'environ 60%.

III. Mesures et analyses effectuées au laboratoire

III.1. Caractérisation physico-chimiques du sol et des boues résiduaire constituant le substrat de culture

Les analyses effectuées ont porté sur la texture, le pH, la teneur en carbone organique, le calcaire total et l'azote total. La teneur en matière organique a été déduite par la formule suivante : $\%MO = 1.72 \times \%CO$. Le dosage des métaux lourds a concerné le zinc, le cuivre et le plomb. L'ensemble des analyses ont été réalisées au niveau du laboratoire de l'Université de Tiaret.

III.1.1. La texture

La détermination de la texture du sol et des boues résiduaire a été effectuée selon la méthode de Robinson Khon basée sur la sédimentation des trois fractions, argiles, limons et les sables.

III.1.2. Le pH

Le pH a été mesuré sur des extraits sol-eau (Kiemnec et *al*, 1990). Par définition, il est l'unité de mesure de la concentration en ions hydrogènes, permettant d'évaluer l'acidité ou la basicité d'un milieu.

III. 1. 3. Le carbone organique

La teneur en carbone organique est déterminée par la méthode d'ANNE (1945) qui se base sur un titrage par sel de Mhor. Ce dernier oxyde les bichromates de potassium ($K_2Cr_2O_7$) qui sont dans la solution. Les bichromates vont être fixés avec les molécules de carbone ce qui reste des bichromates qui vont être oxydés par le sel de Mhor.

La teneur en matière organique a été déduite par la relation

$$\%MO = 1.72 \times \%CO$$

Où MO : teneur en matière organique exprimé en % ; CO : la teneur en carbone organique

III. 1. 4. La teneur en calcaire total

La teneur en calcaire total est déterminée par le Calcimètre de «BERNARD». Le principe de dosage est fondé sur la réaction suivante :



C'est la mesure de CO_2 dégagé suite à l'action d'un excès d'acide chlorhydrique sur un point connu d'échantillon.

III. 1. 5. La teneur en calcaire actif

La teneur du substrat en calcaire actif a été déterminée par la méthode de Drouineau gallet citée par Callot et Dupuis (1980). Le principe est basé sur la réaction du sol avec l'oxalate d'ammonium, suivie de la détermination de l'oxalate n'ayant pas réagi par titrage de retour avec du permanganate de potassium.

III. 1. 6. La conductivité électrique

La conductivité électrique représente la totalité des sels soluble, la mesure de (CE) s'effectue à l'aide d'un conductimètre.

III. 1. 7. La capacité d'échange cationique

La capacité d'échange de cations (CEC) a été mesurée par percolation du sol avec une solution d'acétate d'ammonium (Wiche et *al*, 2016).

III. 1. 8. L'azote total

Les teneurs en azote total sont déterminées par la méthode de Kjeldhal (Mathieu et Pieltain, 2003). 1 g de sol est mis en présence de 1 g de sel de sélénium et de 15 ml d'acide sulfurique à 96 %. L'ensemble est chauffé pendant 3h à 360°C. Les échantillons ont ensuite été passés au distillateur semi-automatique « Gerhardt », qui convertit par distillation en milieu basique les sels d'ammonium produits par la minéralisation, en vapeur d'ammoniaque. Après condensation, celui-ci est recueilli dans l'acide borique puis titré par H₂SO₄ (N/25) en présence d'un indicateur coloré (vert de bromocrésol). La teneur en azote représente

III. 1. 9. Les métaux lourds

Les métaux traces (Cu, Zn et Pb) ont été déterminés à l'aide d'une spectrophotométrie d'absorption atomique. Après avoir été digérés avec un mélange d'acide nitrique (Mok et *al*, 2012).

III. 2. Les traits mesurés sur les plants de tomate

A la fin d'expérimentation, au stade 6 feuilles complètement différenciées, les pots de culture ont été vidés de leur contenu et les plants ont été récupérés. Les mesures ont portés sur la longueur de la tige exprimée en cm, le nombre de feuille par plant et le diamètre de la tige au niveau du collet, évalué par un pied à coulisse.

IV. L'analyse des résultats

Les résultats ont été traités par une analyse de la variance (ANOVA), la détermination des corrélations et une ACC par STATISTICA V.07 (Statsoft, USA).

Chapitre II:
Résultats et discussions

Résultats et discussion

II.1. Propriétés physico-chimiques du mélange boue/sol

Le principal objectif de cette partie du travail consiste en l'évaluation des effets d'amendement du sol par les boues résiduaire, sur les propriétés physico-chimiques de ce dernier. Cette étude démontre que l'épandage de boues d'épuration modifiait les paramètres du sol utilisé. Ainsi, ses caractéristiques chimiques ont été améliorées proportionnellement à la quantité de boue additionnée (Tab.4). Le contenu des boues ajoutées et les paramètres physico-chimiques du sol-support, conditionnent les variations observés dans les propriétés chimiques de ce dernier (Kidd et *al*, 2002 ; Tejada et *al*, 2016).

Tableau N° 04 : Caractérisation physico-chimique des différentes fractions de boues (Moyenne ± ET)

Niveau de Facteur	N	pH	Calcaire total (%)	Calcaire actif (%)	C%	Matière organique (%(%)	CE (mS/cm)	CEC (cmol/k)	N (%)	C/N
Boue 100% (B)	60	8.24±0.06	37,12±0,08	23,16±0,05	12,03±0,02	20,70±0,04	5,20±0,08	26,67± 0,44	1,30±0,02	9,27±0,17
Boue 20% (B1)	60	7.18±0.06	22,13±0,08	14,07±0,05	2,30±0,07	3,96±0,12	1,36±0,04	19,16± 0,18	0,24±0,01	9,74±0,52
Boue 40% (B2)	60	7.82±0.02	24,45±0,05	16,35±0,05	5,88±0,07	10,12±0,13	2,21±0,04	19,16± 0,18	0,62±0,01	9,56±0,16
Boue 60% (B3)	60	7.61±0.02	27,46±0,05	20,84±0,07	9,16±0,10	15,76±0,17	3,56±0,06	24,10± 0,03	0,96±0,02	9,52±0,16
Ordi Sol (T)	60	7.36±0.39	26,15±0,06	19,14±0,09	0,63±0,05	1,09±0,09	0,92±0,03	18,34± 0,38	0,06±0,01	11,03±10,62

Les résultats obtenus de la caractérisation physico-chimique des substrats, montrent de légères variations de leur pH en fonction de leur contenance en boue. En effet, les valeurs ont tendance à augmenter en fonction de la teneur de boue ajoutée, où on relève qu'elles varient entre 7.36 pour le sol démunis de boue et 8.24 enregistré dans le substrat constitué de boue à hauteur de 100%. Ce résultat se confirme par ceux dégagé par Park pain et *al*, (2000) qui

avaient constaté que les sols acides avaient un pH plus élevé que les sols neutres après l'ajout de boues, alors que les sols neutres n'avaient aucun changement.

Un autre paramètre qu'est la conductivité électrique se modifie par les reconstitutions des mélanges sol-boue. En effet, l'accroissement des rapports boue/sol induit des augmentations des valeurs de cette caractéristique. Elle est évaluée à 0.92ms/cm au niveau du substrat constitué de sol uniquement et augmente progressivement pour atteindre une valeur de 5.20ms/cm dans le milieu formé de 100% de boue. Selon les conclusions d'autres chercheurs, la conductivité électrique augmente lorsque la dose de boue apportée est augmentée (Dridi et Toumi, 1999; Bipfubusa et *al*, 2006 ; Amadou, 2007 ; Bahri et *al*. Annabi, 2011).

Les résultats (Tab.4) indiquent que l'apport des boues résiduelles s'est soldé par une nette augmentation de la CEC et cela de façon proportionnelle à sa teneur. Ainsi, les valeurs enregistrées oscillent dans l'intervalle délimité par 18.34cmol/k et 26.67cmol/k en évoluant du substrat constitué de sol à celui contenant 100% de boue. Ces résultats se démontrent par ceux obtenus par Epstein et *al*. (1976) qui ont découvert que l'ajout de compost de boues augmente la CEC et que cette augmentation est proportionnelle à la dose administrée. Une telle modification serait profitable à la nutrition minérale des plantes conduites sur ces substrats. Ces propos se confirment par les travaux de Mazen et *al*, (2010) et Eid et *al*, (2017) qui ont prouvé que l'augmentation de la CEC du sol augmente le pool potentiel de nutriments disponibles pour les plantes (cations) tout en diminuant la perte des éléments traces métalliques, qui sont préférentiellement fixés sur le complexe adsorbant plutôt que transférés dans la solution du sol.

L'ajout de boues résiduelles a également contribué à l'amélioration des teneurs des substrats en matière organique, qui sont passées de $1,09 \pm 0,09$ % en T (100%sol) à $3,96 \pm 0,12$ %, $10,12 \pm 0,13$ % et $15,76 \pm 0,17$ % dans B1, B2 et B3 respectivement (Tab 8). Ces valeurs intègrent ces substrats parmi ceux dits riches en matière organique selon la catégorisation de Baise (1988). Il est évident que ces progressions sont expliquées par une augmentation de la teneur en carbone organique. Ces modifications sont conformes aux conclusions d'enquêtes antérieures (Guerrero et *al*, 2001 ; Hussein, 2009 ; Mazen et *al*, 2010 ; Soudani et *al*, 2017 ; Eid et *al*, 2017). D'autres auteurs (Dridi et Toumi, 1999 ; Korboulewsky et *al*, 2001 ; Bipfubusa et *al*, 2006 ; Bahri et Annabi, 2011) avaient également découvert que l'amendement du sol avec des boues résiduelles augmentait de manière significative sa teneur

en carbone organique et en azote. Ce paramètre ainsi amélioré, confère au sol une aptitude de disponibilité des nutriments issus au fur et à mesure de la décomposition de cette dernière.

Le rapport C/N trait informatif sur l'activité biologique du substrat a présenté des variations mais particulièrement de tendance. Ainsi, une diminution des valeurs de ce rapport a accompagné l'enrichissement du sol en boue résiduaire, expliquant évidemment une amélioration de son activité biologique. Les valeurs obtenues des mesures de cette variable sont de l'ordre de 9.74, 9.56 et 9.52 inscrites dans l'ordre au niveau des substrats additionnés de 20, 40 et 60% de bous résiduaires. Alors que, dans les substrats constitués de boue résiduaire et de sol uniquement ce rapport s'évaluait respectivement à 9.27 et 11.03. Ces changements informent sur le rôle assuré par l'ajout de la boue sur l'activation des microorganismes impliqués dans ce processus. Ces propos se confirment par la synthèse des travaux de Glemas (1980). Bipfubusa (2006), Houot (2009), Bahri et Annabi (2011) qui démontrent que la diminution du C/N implique une forte activité biologique, un constat relevé dans notre cas.

II.2. Évolution des métaux lourds Pb, Zn, Cu en fonction des différentes fractions de substrat

Les résultats obtenus (Fig.11) du dosage des ETM illustrent que leur présence au niveau du substrat dépend étroitement de la quantité de boue apportée. Toutefois, des divergences d'évolution se rapportant à la nature des trois éléments, Zn, Cu et Pb. Ainsi, on note que la teneur en Zn des substrats croît d'une façon plus marquée par rapport aux deux autres éléments. Cette distinction serait liée au fait que l'élément Zn est moins lié à la matière organique que les autres éléments traces métalliques (Bhogal et *al*, 2003 et Moffett et *al*, 2003) et qui serait moins concerné par la décomposition des boues renfermant une forte proportion de matières décomposables. Cependant, ces niveaux de contamination par les ETM restent plus faibles que ceux permises par les normes AFNOR (1985).

Du fait que la richesse de la boue résiduaire en ces éléments conditionne leur présence au niveau du sol amendé, met en exergue alors, un haut potentiel fixateur du sol utilisé à l'égard de ces ETM. Néanmoins, les teneurs aussi variables qu'elles soient dans un sol s'avèrent proportionnelles aux doses d'épandage des boues (Antolin et *al*, 2005 ; Mazen et *al*, 2010 ; Nogueira et *al*, 2013 ; Soudani et *al*, 2017 ; Eid et *al*, 2017). Selon les travaux d'Eid et *al*. (2017) et de Gattullo et *al*, (2017), les teneurs en Zn et Cu des sols amendés avec des

boes résiduaies détiennent toujours des niveaux supérieurs par rapport aux autres éléments de cette catégorie chimique.

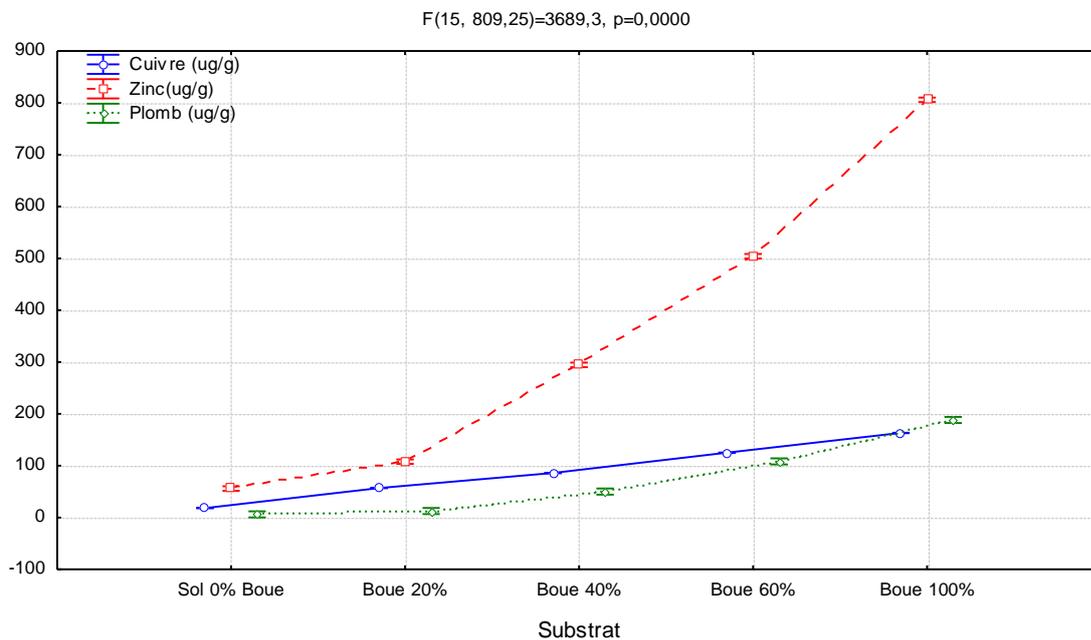


Figure N° 11:Évolution des métaux lourds Pb, Zn, Cu en fonction des différentes fractions de substrat

II.3. Caractérisation de la distribution granulométrique dans les différentes fractions de boes (Moyenne ± ET)

La texture conditionne à elle seule principalement les paramètres hydrodynamiques en particulier la perméabilité, la capacité de rétention d'eau, la porosité ainsi que la capacité d'échange cationique. Les résultats dégagés de la caractérisation granulométrique des différents substrats illustrent qu'elle est dominée par les limons et les sables et sont donc d'une texture limono-sableuse.

La texture du sol utilisé (Tab.05) est constituée essentiellement de limons (65.37%) et sables (32.43%). Le sol utilisé se définit par une faible teneur en argile avec une valeur de 2.19%. Dans le même contexte, la texture de la boue utilisée s'annonce proche de celle de ce dernier sauf qu'elle renferme une proportion d'argile plus élevée atteignant le seuil de 11.95%. Alors que ses teneurs en sables et limons sont respectivement de l'ordre de 32.51%et 55.55%. L'amendement par différentes teneurs de boue résiduaire a induit des modifications de la texture du sol concerné. On retient principalement de ces changements, la progression de la teneur en argiles du sol. Ainsi, des valeurs de 8.53, 9.93 et 11.12% ont été inscrites suite à

l'apport de la boue à des teneurs respectives de 20, 40 et 60%, représentant des progressions relatives dans l'ordre de 74.33, 77.95 et 80.31%, par rapport à celles du sol.

L'amélioration des particularités texturales du sol par son enrichissement en éléments fins (argiles) peut être réalisée par des apports de boue résiduaire riches de leur côté en ces constituants. Ces propositions ont été apportées par la synthèse des résultats dégagés par Gallardo *et al.*, (1987).

Une particularité physique commune concerne l'ensemble des substrats préparés et utilisés dans notre expérimentation et qui se rapportent à leur texture légère (limono-sableuse) favorisant la dynamique et l'entraînement des métaux lourds en profondeur.

Sachant que les boues utilisées dans notre expérimentation sont constituées des fractions suivantes par ordre décroissant : les fractions limoneuses puis les fractions sableuses et enfin les fractions argileuses. En conclusion, nos boues ont une texture limono-sableuse.

Tableau N°05: Caractérisation de la distribution granulométrique dans les différentes fractions de boues (Moyenne \pm ET)

Substrat	N	Argile(%)	Limon fin (%)	Limons grossiers (%)	Sables fins (%)	Sables grossiers (%)
Boue 100%	60	11,95 \pm 0,09	41,06 \pm 0,09	14,49 \pm 0,09	22,72 \pm 0,09	9,79 \pm 0,08
Boue 20%	60	8,53 \pm 0,22	31,75 \pm 0,29	26,09 \pm 0,24	15,82 \pm 0,30	17,80 \pm 0,55
Boue 40%	60	9,93 \pm 0,19	38,70 \pm 3,86	23,82 \pm 0,08	17,49 \pm 0,20	9,56 \pm 0,13
Boue 60%	60	11,12 \pm 0,05	40,40 \pm 0,11	18,82 \pm 0,18	20,89 \pm 0,14	8,77 \pm 0,10
Sol (Boue 0%)	60	2,19 \pm 0,11	6,22 \pm 0,09	59,15 \pm 0,39	6,85 \pm 0,30	25,58 \pm 0,36

II.4. Croissance et productivité du tomate *Solanum lycopersicum* dans le mélange boue-sol

Les mesures biométriques des plants de *Solanum lycopersicum* dans un sol mélangé à des boues d'épuration à une proportion de 0% (témoin), 20%, 40% et 60 % sont présentées dans le tableau 06.

En général, les mesures biométriques avaient augmenté avec l'augmentation de la proportion de boues dans les mélanges. Les résultats comparés à un témoin basé sur un sol agricole, montrent que la tomate pousse très significativement dans les trois mélanges, cependant cette croissance est très remarquable dans le mélange à 40% de boue (Tab.06).

Les plantes cultivées sur le mélange à 40 % de boue avaient une hauteur finale maximale de 78,50 cm, un nombre maximal de feuilles de 32,00 et un diamètre de tige maximal de 6,00 cm. Pour les plantes cultivées sur le sol témoin, des résultats maximaux beaucoup plus faibles ont été enregistrés. 36,20 cm pour la hauteur, 12,00 pour le nombre de feuilles et 2,30 cm pour le diamètre de la tige.

Les impacts des boues sur l'amélioration de l'agrégation du sol et la contribution de la matière organique à l'amélioration des caractéristiques chimiques du sol, à l'augmentation de la rétention d'eau du sol et, par conséquent, à la fourniture de nutriments essentiels à la croissance des plantes, pourraient expliquer pourquoi l'épandage de boues augmente la productivité des plantes (Antolin et al, 2005 ; Hussein, 2009 ; Soudani et al, 2016). De plus, Mendoza et al, (2006) ont constaté que l'utilisation agricole des boues d'épuration augmentait la caractéristique morphologique des plants de sorgho.

Al-Saikhan et al, (2021) avaient démontré une bonne croissance de la laitue et des concombres sur un sol aride fertilisé avec des boues municipales, considéré comme une source d'engrais en raison de sa teneur élevée en matière organique et en azote et phosphore disponibles, il avait également constaté une absorption limitée des métaux lourds.

Tableau N.06: Paramètres biométriques des tomates cultivées dans différentes fractions de boues (Moyenne ± ET)

Paramètres biométriques de la tomate	N	Moyenne ± SD	Min	Max
TH Tige Sol (cm)	60	35,73±0,32	35,00	36,20
TH Tige Boue (cm)	60	64,50±0,86	63,00	65,70
TH Tige_Boue 20% (cm)	60	49,49±5,85	5,00	50,80
TH Tige_Boue 40% (cm)	60	77,58±0,50	76,50	78,50
TH Tige_Boue 60% (cm)	60	68,04±0,63	66,80	69,00
Diam COL_ sol (cm)	60	1,99±0,19	1,60	2,30
Diam COL_ Boue (cm)	60	6,59±0,27	6,00	7,10
Diam COL_ Boue20% (cm)	60	3,17±0,22	2,70	3,50
Diam COL_ Boue40% (cm)	60	5,74±0,19	5,30	6,00
Diam COL_ Boue 60% (cm)	60	4,26±0,21	3,80	4,60
Nbr feuilles_sol	60	9,87±1,61	5,00	12,00
Nbr feuilles_boue	60	20,65±1,38	17,00	23,00
Nbr feuilles_boue 20%	60	13,28±1,17	11,00	15,00
Nbr feuilles_boue 40%	60	28,93±1,53	27,00	32,00
Nbr feuilles_boue 60%	60	20,57±12,84	17,00	118,00

II.5. Effet de la boue résiduaire sur certains traits de croissance chez la tomate (*Solanum lycopersicum* L)

L'étude des résultats (Tab.7) montre que la nature des mélanges du substrat induit des variations hautement significatives des grandeurs des paramètres morphologiques retenus dans notre étude. En effet, les substrats obtenus par des mélanges entre le sol et des teneurs croissantes de la boue résiduaire induisent des augmentations proportionnelles de grandeur de ces paramètres en comparaison avec le témoin préparé avec du sol uniquement. L'utilisation d'un substrat constitué par la boue résiduaire modifie cette tendance tout en permettant un accroissement de ces grandeurs par rapport au substrat témoin. Ces variations concerne indistinctement la hauteur de la plante ($r=0.807^{**}$), le diamètre du collet ($r=0.989^{**}$) et le nombre de feuilles par plante ($r=0.596^{**}$).

Tableau N°07 : Effet du mélange du substrat (sol, boue résiduaire) sur les traits morphologiques de la tomate

*** significatif au seuil de 0.1%

Source de variation	Paramètres	ddl	Test F	Probabilité
Substrat	Hauteur de la plante	4	2287.1***	0.000
	Diamètre du collet	4	4372.4***	0.000
	Nombre de feuilles par plante	4	95.137***	0.000

II.6. effet d'apport de boues résiduaires sur le sol et la Tomate. Interaction : Boues résiduaires– Sol- Tomate

Afin d'étudier l'effet de l'apport de boues résiduaires sur les caractéristiques physico-chimiques du sol amendé d'une part et sur les traits de croissance de la tomate d'autre part, on a réalisé une analyse des correspondances canoniques (ACC). Le résultat de cette analyse est présenté dans la Figure12.

Les résultats d'analyse s'illustrent à travers les dimensions graphiques suivantes :

- F1 qui représente 95.03% des nuages de points (95.03% des informations peuvent être expliquées dans cette dimension).
- F2 qui représente 4,7 % des nuages de points peut s'expliquer dans cet axe.

Sur l'axe F1 côté positif, on constate que les substrats constitués par la boue (100%boue, 0%sol) et le mélange B2 (60%sol, 40%boue) se correspondent et constituent les milieux les plus favorables pour une meilleure croissance de la tomate. En effet, les valeurs biométriques

les plus levées et concernant la hauteur de la plante, le diamètre du collet et le nombre de feuilles par plante ont été obtenus par les plantes conduites sur ces deux substrats. Cet effet s'explique par leur richesse en matière organique, en Azote et une conductivité électrique favorable. Ces évènements résultent par les apports de la boue résiduaire en éléments fertilisants (phosphore, azote, oxyde de calcium, matière organique) qui à ces proportions s'annoncent plus favorables à la croissance et au développement des plants de tomate. Le substrat contenant 60% de boue résiduaire détient également des particularités permettant une croissance optimale de la plante.

La qualité fertilisante et par conséquent nutritionnelle de la boue est conditionnée par la fraction solide qui résulte des effluents traînant la matière organique et minérale. Ce potentiel subit toutefois des variations spatio-temporelles notables (Bahri et *al*, 1987). Ces résultats se concordent avec ceux de Soudani et *al*, (2017) qui avaient prouvé que les valeurs biométriques (hauteur de la plante, le diamètre des tiges, nombres des feuilles) des plants d'*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh cultivés sur des substrats de mélanges sol-boues (20%, 40% et 60%), étaient supérieures par rapport à celles obtenues des plants conduits sur un sol sans apport. Toutefois, les résultats étaient meilleurs dans le mélange sol-boue à hauteur de 60%. Dans notre cas, les plants de tomate ont enregistré les meilleures valeurs biométriques en cas de substrat sol-boue à une teneur de 40%.

Sur ce côté aussi, une interaction entre le taux du limon d'un côté et les substrats de boue et de mélange sol-boue à 60% d'autre côté, a été observée. Ainsi, plus le pourcentage de la boue est élevé plus la quantité du limon est importante.

Cependant, le mélange 60% présente un risque de pollution en métaux lourds, notamment le Pb mais qui reste admissible. Des plantes bio-accumulatrices des métaux lourds peuvent être cultivées dans des mélanges sol-boues, afin de réduire ces teneurs qui ne doivent pas dépasser les niveaux autorisés selon la norme AFNOR (1985), avant toute utilisation de ces sols en agriculture.

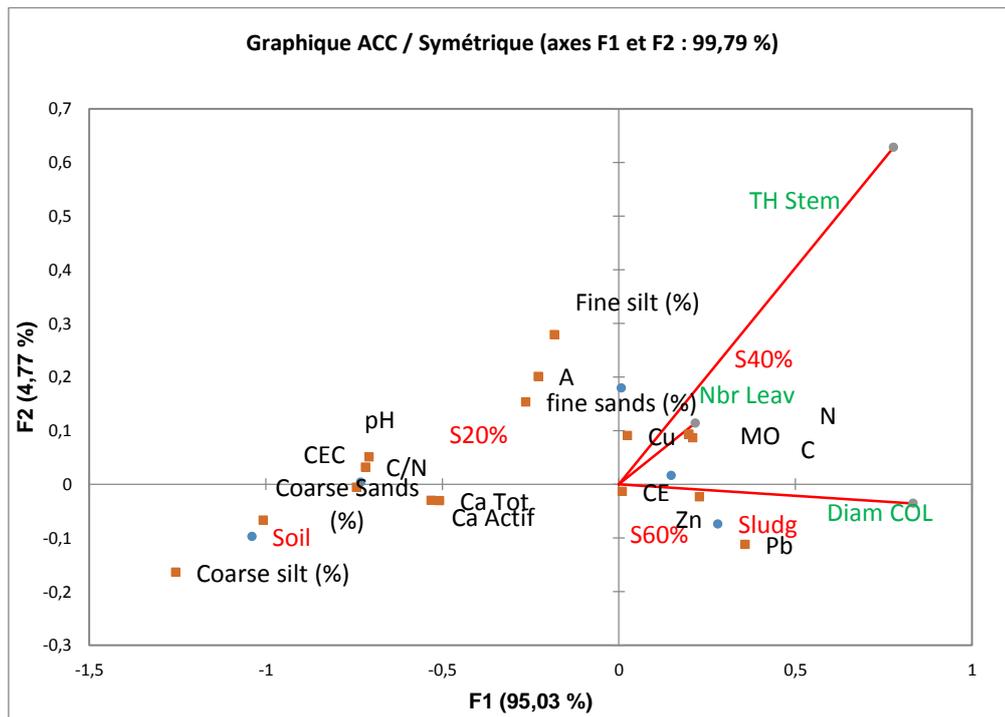


Figure N°12: Relation : boues résiduaires – sol – plante réalisé par analyse canonique des correspondances (ACC)

La désintoxication des sols contaminés par les ETM peut toutefois être effectuée par certaines espèces végétales bio-accumulatrices. Dans ce contexte, Akintola et *al* (2019) ont montré l'efficacité et la capacité *Adansoniadigitata* L. à accumuler et à distribuer des métaux lourds dans ses parties tissulaires. Ainsi, une différence des concentrations en mg/Kg du Pb (28,22 ; 19,58), du Zn (76,22; 48,06) et du Cu (55,68; 26,45) dans le sol, avant et après plantation de l'*Adansoniadigitata* L, nettement significatif a été observée.

Selon cette analyse (Fig.12), l'amendement du sol en boue résiduaire à des teneurs supérieures à 40% a contribué à l'augmentation de son pH. Ce paramètre s'annonce par conséquent plus faible dans les substrats constitué de sol (100%sol) et sol-boue à hauteur de 20%. Cette situation a généré une minéralisation de la matière organique plus conséquente, ce qui est prouvé par un rapport C/N assez élevé conjointement à une diminution de la fraction d'azote minéral. Selon le même axe, une tendance positive est démontrée entre l'augmentation du pH du substrat et l'amélioration de sa capacité d'échange cationique. En effet, la capacité de rétention des éléments nutritifs est rehaussée par un pH alcalin.

La texture limoneuse du sol enrichit également par l'apport de la boue particulièrement de limons fins, est associée à un taux de calcaire actif moyennement plus élevé.

Dans l'axe F2, côté positif, la projection de l'information sur cet axe permet de définir la correspondance de la fraction 40% et le taux des argiles et du limon (fins et grossiers). Il faut noter que la texture du mélange sol-boues est fortement influencée par la condition du milieu, notamment le facteur climat à long terme. Une augmentation de la teneur en matière organique, en certains éléments minéraux (P et Ca), de la capacité d'échange cationique et du pH ont été constaté dans un champ du sol sableux caillouteux mélangé avec incorporation de boues d'épuration ou de composts urbains et cultivé en région tempérée, après 18 ans d'expérimentations. Sur un plan pratique, l'utilisation des composts et des boues permet de maintenir le stock d'humus du sol. Les coefficients isohumiques sont compris entre 0,08, et 0,20 pour les boues et entre 0,28 et 0,33 pour les composts (Fahd-Rachid, 1993).

III- Travaux de recherches de l'université de Tiaret sur la valorisation des boues résiduairees et perspectives de leurs utilisations.

A l'université de Tiaret, le laboratoire de recherche d'Agrobiotechnologie et de Nutrition en Zones Semi Arides a lancé de nombreux travaux de recherche sur l'utilisation et la valorisation de la boue résiduaire issue de la Station d'épuration de Tiaret, à travers des mémoires de master et des thèses de doctorat. Un projet de recherche intergouvernemental, avec l'université de Rhodes (Afrique du Sud) a été également lancé sur cette thématique.

1- Projet integouvernemental avec l'université de Rhodes (Afrique du Sud) :

En 2015, le laboratoire de recherche d'Agrobiotechnologie et de nutrition en Zones Semi Arides a signé un projet de recherche, dans le cadre d'une coopération intergouvernementale entre l'Algérie et l'Afrique du Sud. Ce projet a été financé par la direction generale de la recherche scientifique et du deveoppement technologique DGRSDT (Algérie), et la fondation Nationale de la recherche scientifique de l'Afrique du Sud.

➤ Mode de coopération entre les deux équipes : Algérie et Afrique du Sud.

- Echange d'expériences dans le domaine de la valorisation et gestion durable des boues résiduairees entre les deux pays.
- Elaboration d'un guide de terrain sur ce domaine à travers des mémoires de fin d'études et publications des résultats.
- Formation des chercheurs qualifiés (master, doctorants)
- Les dispositions règlementaires portant les valeurs limites de concentration pour les métaux lourds et les composés organiques toxiques, dans les boues résiduairees, devraient être discutés entre les deux pays.

Dans le but de quantifier du triclosan¹ dans les matrices de boues d'épuration de l'Afrique du Sud et de l'Algérie ; des échantillons de boues ont été prélevés dans les lits de boues stockées à la station d'épuration de Tiaret, depuis plus de six mois avant l'échantillonnage. Les échantillons de boues ont été placées dans des sacs en plastique à température ambiante et envoyés à Grahamstown (Université de Rhodes, Afrique du Sud) pour analyse en Afrique du Sud, les échantillons de boues d'épuration de Tiaret ont été stocké à 4 °C.

¹ Le Triclosan, appelé aussi *5-chloro-2-(2,4-dichlorophénoxy)* phénol, est utilisé dans de nombreux biens de consommation, tels que les cosmétiques et les détergents, pour tuer les micro-organismes ou inhiber leur croissance. Il sert de désinfectant, d'agent de conservation et d'antiseptique et est largement utilisé dans les soins de santé et l'élevage.

Au laboratoire, après l'extraction des boues pendant 30 min, les extraits des échantillons ont été placés quantitativement dans une ampoule 250 ml pour décantage et séparation. La détermination des concentrations de Triclosan a été obtenue par un GC-MS, sur un extrait de boues mélangé avec l'hexane/acétone de 20 ml.

Les résultats obtenus ont montré que la concentration moyenne de Triclosan dans les boues d'épuration obtenues à Grahamstown étaient égales à $140 \pm 33 \mu\text{g/g}$. En revanche, la concentration de Triclosan dans les boues d'épuration provenant de Tiaret (Algérie) variait de 0 à $12 \mu\text{g/g}$. Cette différence des concentrations de triclosan, entre les boues d'épuration en Afrique du Sud et en Algérie, sont probablement dues à la taille de population des deux villes où des échantillons de boues ont été prélevés, ainsi qu'à des différents taux d'utilisation des produits contenant du triclosan au niveau du ménage. Des études complémentaires devront être menées sur les taux d'utilisation des produits contenant du Triclosan dans les deux pays, ainsi que sur la caractérisation plus large des concentrations de Triclosan dans les boues d'épuration.

2- Theses de doctorat

a). Pour des plantations sylvicoles

Soudani (2017) souligne que les solutions traditionnelles de l'élimination des boues résiduelles issues de la station d'épuration de Tiaret, telles que la mise en décharge et l'incinération, présentent plusieurs inconvénients, à savoir : le risque de contamination des eaux souterraines, la combustion qui est la source de la pollution atmosphérique, etc... dans ces cas, l'épandage sylvicole des boues d'épuration peut apparaître dans, certaines situations, une alternative aux solutions actuelles. Des plants d'*Eucalyptus camaldulensis* ont été cultivés dans des mélanges de boue et de sol où la teneur en boues était de 20%, 40% et 60%. Les mesures physico-chimiques des substrats et les teneurs en métaux lourds ont été effectuées au cours des six mois suivant la plantation. Les résultats trouvés sont empilés dans le Tableau N°8 :

Tableau N8. Caractéristiques physicochimiques du substrat de différents types de mélange (Soudani, 2017)

Variables	Sol témoin		Substrat20%		Substrat 40%		Substrat 60%	
	N	Moy±ET	N	Moy±ET	N	Moy±ET	N	Moy±ET
pH	12	7,37±0,03	40	7,30±0,07	40	7,17±0,11	40	7,02±0,01
CE	12	1,57±0,32	40	4,09±0,10	40	4,38±0,33	40	4,40±4,71
CEC (cmol/kg)	12	26,27±0,18	40	20,06±0,05	40	33,51±1,93	40	35,26±5,20
CaTot(%)	12	25,15±0,04	40	23,65±2,92	40	20,03±0,049	40	17,09±0,05
MO (%)	12	0,86±0,35	40	13,38±0,18	40	25,98±4,72	40	27,15±2,59
C(%)	12	0,19±0,10	40	1,10±0,05	40	14,82±0,28	40	15,98±0,55
N(%)	12	0,32±0,23	40	12,18±0,69	40	1,13±0,06	40	1,22±0,06
C/N	12	1,17±0,14	40	37,74±6,58	40	13,12±0,75	40	13,09±1,00
P (mg/kg)	12	21,83±21,64	40	62,37±7,34	40	42,58±4,86	40	45,70±1,00
K (ppm)	12	46,53±40,98	40	210,45±28,95	40	71,58±1,63	40	84,84±3,37
Cr (ppb)	12	136,03±122,7	40	812,89±36,16	40	254,96±21,51	40	264,09±52,48
Mn (ppb)	12	185,91±169,0	40	650,30±152,	40	827,56±20,18	40	856,55±22,60
Fe (ppb)	12	470,33±121,00	40	46,61±8,79	40	780,74±94,06	40	786,95±792,18
Cu (ppb)	12	34,07±29,05	40	558,52±22,09	40	48,20±7,33	40	55,82±10,22
Zn (ppb)	12	23,25±22,41	40	0,14±0,08	40	597,23±93,98	40	617,35±139,72
Cd (ppb)	12	0,02±0,01	40	13,86±0,45	40	0,19±0,03	40	1,05±0,06
Pb (ppb)	12	1,48±1,38	40	7,30±40	40	13,94±2,19	40	14,49±2,55

Les Eucalyptus cultivées sur le substrat de 60 % de boue avaient une hauteur finale moyenne de $49,4 \pm 24,1$ cm et un nombre moyen de feuilles de $68,81 \pm 6,2$. Pour les plantes cultivées sur le sol, des résultats moyens beaucoup plus faibles ont été enregistrés $34,3 \pm 12,80$ cm, pour la hauteur et $40 \pm 3,8$ pour le nombre de feuilles. Les mesures de diamètre ont également démontré une certaine différence dans le développement des plantes au cours de la période de croissance expérimentale. Les valeurs de diamètre à mi-hauteur pour les plantes sur les mélanges de boues avec une part de boues de 20 %, 40 % et 60 % étaient respectivement de $2,2 \pm 1,3$, $1,8 \pm 1,2$ et $1,9 \pm 1,2$ m. Pour les plantes cultivées sur le sol, la valeur moyenne du diamètre à mi-hauteur était de $1,3 \pm 0,7$ mm. Les valeurs moyennes du diamètre de base étaient respectivement de $3,2 \pm 2,0$, $3,2 \pm 1,8$ et $3,2 \pm 1,9$ mm (Fig. 2B) pour les plantes sur des mélanges contenant des boues, et de $2,4 \pm 1,0$ mm pour les plantes cultivées sur un sol pur (Soudani et al, 2017).

b). Pour des la culture de la Tomate et la qualité des huiles essentielles *d'Eucalyptus camaldulensis*

Une étude a été réalisée à la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Université de Tiaret par Belhachemi (2021), sur l'effet de l'épandage boue sur des paramètres biométriques (hauteur, tige, nombre des feuilles) de deux variétés de tomate et la qualité des huiles essentielles *d'Eucalyptus camaldulensis*, cultivées sous trois types de serre agricole (classées selon la couche du plastique), afin de valorisation d'un mélange sol-boue utilisé dans de cette expérimentation (fraction de 60% boues).

Les variétés de tomates ont montré deux tendances d'évolution, une rapide et progressive de la première semaine à la troisième, et une lente à partir de la troisième à la neuvième semaine, avec une légère différence pour la variété *Marmande*. En fait, cette dernière a atteint une valeur de 47 ± 17.1 cm au cours de la huitième semaine en Juin. Cependant, au cours de la dernière semaine, une régression de longueur a été constatée pour la variété *Marmande* atteignant une valeur moyenne de 46.25 ± 17.4 cm. De plus, la variété *ACE 55 VF* a montré le même type de régression mais avec une moyenne de 50.3 ± 6.42 cm au cours de la dernière semaine.

Les résultats ont montré également que la croissance *d'Eucalyptus camaldulensis* était remarquablement plus importante sous serre ordinaire en termes de nombre de feuilles et de diamètre de tige. De plus, en ce qui concerne la hauteur des plantes d'Eucalyptus en fonction du temps, les conditions de serre à trois couches étaient plus pratiques. Des résultats inférieurs ont été observés pour le développement de l'Eucalyptus sous serre monocouche. De plus, le rendement moyen des huiles essentielles extraites des feuilles *d'Eucalyptus camaldulensis* par rapport à leur serre de culture, était assez similaire.

Ces données expérimentaux ont montré que les boues de stations d'épurations peuvent être utilisées comme amendements ou fertilisants pour augmenter la production végétale. Mais il est nécessaire de poursuivre les investigations en termes de recherche et d'observation à long terme qui permettra d'établir des références techniques et des guides de bonne conduite validés par des expérimentations sur le terrain.

Conclusion générale

Conclusion

Les avantages précieux de l'application agricole des boues d'épuration sont importants, en particulier lorsqu'ils sont ajoutés à des sols pauvres en matière organique, tels que ceux de Tiaret, (Algérie). La présente étude a examiné les effets de différents taux d'application de boues d'épuration (0, 20, 40 et 60 %) sur certaines propriétés du sol et la croissance des plants de tomates.

Les résultats des analyses physico-chimique montre que l'ajout de boues résiduelles a également contribué à l'amélioration des valeurs maximales en matière organique, qui sont passées de $1,09 \pm 0,09$ % en T(100%sol) à $3,96 \pm 0,12$ %, $10,12 \pm 0,13$ % et $15,76 \pm 0,17$ % dans B1, B2 et B3 respectivement.

Les résultats de l'étude actuelle prouvent que l'utilisation agricole des boues d'épuration pourrait considérablement améliorer les propriétés/fertilité du sol, fournir des éléments nutritifs essentiels aux plantes et augmenter la production végétale. L'épandage de boues d'épuration sur un sol agricole dans cette étude a entraîné une augmentation considérable de la teneur en matière organique du sol et, finalement, de la production végétale. Les taux d'application de 40 % de boues sont efficaces pour améliorer les propriétés et la fertilité du sol. Les plants de tomates fertilisés avec de la boue ont eu une croissance supérieure et un nombre élevé de feuilles dans le mélange à 40 %. Alors que la boue a amélioré le développement des plantes, aucun effet négatif sur la qualité des plantes n'a été observé.

Les analyses statistiques des paramètres biométriques de la tomate ont montrés que les plantes cultivées sur le substrat à 40 % de boue avaient une hauteur finale maximale de 78,50 cm, un nombre maximal de feuilles de 32,00 et un diamètre de tige maximal de 6,00 cm. Pour les plantes cultivées sur le sol témoin, des résultats maximaux beaucoup plus faibles ont été enregistrés. 36,20 cm pour la hauteur, 12,00 pour le nombre de feuilles et 2,30 cm pour le diamètre de la tige.

Cependant, l'analyse statistique de la variation des métaux lourds Pb, Zn, Cu en fonction des différentes fractions de substrat, a montré une évolution de concentration en zinc par apport à celles du cuivre et plomb, ces valeurs ont été fortement augmentées et sont maintenant enregistrées comme avec des valeurs non toxiques

L'ACC a permis de définir l'aspect bénéfique de l'épandage des boues résiduelles issues de stations d'épuration urbaines pour la tomate. Une augmentation de la croissance en hauteur, en diamètre des plants est remarquable dans la fraction 40% de boue, comparativement aux plants cultivés dans le sol ordinaire et le sol de 20% boues. Cela signifie que l'apport de boues constitue une fertilisation satisfaisante en azote et en matière organique. Cependant, la charge résiduelle en azote et en métaux lourds peut présenter un risque de contamination de la nappe par les nitrates et également un risque de pollution du sol en métaux lourds. La culture des plantes bio-accumulatrices de ces polluants est fortement recommandée avant toute utilisation de ces sols pour d'autres cultures.

L'épandage agricole des boues d'épuration serait une solution écologique aux problèmes d'élimination traditionnels, réduirait le besoin d'engrais commerciaux et protégerait finalement notre environnement. Les avantages des eaux usées pour la fertilité des sols et l'épandage des boues peuvent être maintenus par une gestion appropriée de la protection de l'environnement, en se concentrant sur les risques potentiels de contamination par les métaux lourds. D'autres études sont nécessaires pour surveiller l'accumulation de métaux lourds dans le sol et d'étudier les aspects du prétraitement des boues d'épuration avant l'épandage agricole. De plus, les recherches futures devraient étudier l'utilisation de taux (40 %) d'épandage de boues pour maintenir une meilleure fertilité des sols tout en réduisant le risque d'accumulation des métaux lourds. De plus, une surveillance attentive des métaux traces dans les fruits et légumes est nécessaire.

Des études expérimentales, réalisées par les équipes de recherche du laboratoire d'Agro biotechnologie et de Nutrition en Zones Semi Arides (université de Tiaret), ont montré l'importance d'utiliser des substrats de mélange Boue-Sol comme épandage agricole et sylvicole.

Il paraît important d'analyser les variations temporelles affectant la composition organique des boues d'épuration en réalisant une étude dans une station donnée et en effectuant des prélèvements réguliers à l'échelle d'une année de façon à mieux comprendre les variations saisonnières.

Cependant, il est nécessaire de poursuivre ce travail afin de mettre en place un schéma réactionnel plus élaboré de telles variations pourraient être imputées à des proportions différentes de matière organique réfractaire et non réfractaire et donc directement liée à la

nature même de la boue, soit être liées à la présence de métaux lourds dans la boue ou à la présence de matière minérale, l'ensemble pouvant inhiber l'activité bactérienne.

Pour préciser ce schéma réactionnel, il est donc essentiel de réaliser tout d'abord des expérimentations avec des fractions plus simples (boues pré extraites, fractions extractibles seules), puis en compliquant le système en ajoutant des mélanges de minéraux, de métaux lourds, jusqu'à poursuivre vers l'étude de mélanges complexes (sol-boues).

A l'issue de ce travail, il apparaît une perspective fondamentale vise à, mieux comprendre l'évolution des boues dans un contexte d'épandage en proposant des bilans quantitatifs et à terme un modèle de dégradation de la matière organique des boues.

Actuellement, la production de boue augmente dans des proportions significatives en raison de l'application de réglementations plus contraignantes et du taux de conformité des performances des stations d'épuration qui s'améliore.

En Algérie, on recense 165 stations d'épuration qui produisent actuellement environ 250 000 tonnes de boues annuellement, devrait atteindre 500 000 tonnes d'ici 2030, selon les données du Ministère des Ressources en Eau Algérie. Bien que les boues d'épuration soient aujourd'hui considérées comme des déchets par la nouvelle réglementation, elles présentent un intérêt agronomique réel du fait de la présence de matière organique, d'azote et de phosphore et d'un rapport carbone/azote favorable.

Il est à noter que l'élimination et le traitement des boues résiduelles importe jusqu'à 50% des coûts de fonctionnement d'une usine d'épuration des eaux, et représente l'un des plus grands problèmes auxquels les ingénieurs sanitaires doivent faire face aujourd'hui. Face à ça, les grands enjeux pour les traiters d'eau sont alors : de réduire les volumes de boues, hygiénisme et diminuer voire annuler la toxicité. Les solutions traditionnelles d'élimination, telles que la mise en décharge et l'incinération, présentent plusieurs inconvénients environnementaux. Dans l'agriculture, les boues d'épuration sont utilisées comme engrais pour réhabiliter les sols pauvres et remplacer les engrais de synthèse. Ces boues peuvent être utilisées pour améliorer les caractéristiques physico-chimiques du sol, favoriser l'activité microbienne et augmenter la production végétale, là où elles contiennent les nutriments primaires et la matière organique. Cependant pour une utilisation optimale ou pérenne, le produit doit être attractif, le plus homogène possible. Des produits chimiques à caractère industriel peuvent être tirés des boues de la station d'épuration, ce qui ouvre des perspectives

intéressantes pour des pays émergents de valoriser ces produits (on note à titre d'exemple, le Triclosan , le Triclocarban et les parabènes qui sont employés en tant qu'antiseptiques et agents conservateurs dans les produits de soins corporels; développent d'un procédé de traitement biologique du phosphore des eaux usées tout en facilitant la valorisation de ce dernier: à partir de 400 kg de boues déshydratées puis séchées, 12 kg de produit enrichi en phosphore, dépourvus de métaux lourds et pouvant être recyclés de manière sûre comme engrais dans l'agriculture. etc...).

L'élimination des boues d'épuration, un produit primaire des stations d'épuration, est un défi. D'une part, les boues d'épuration sont nocives pour l'environnement, mais d'autre part, elles peuvent être utilisées comme engrais en agriculture surtout. Cependant, les manques de connaissances de la composition des boues et de leurs conditions de mise en œuvre en épandage ou compostage, leurs qualités médiocres, ont conduit à des pratiques qui ont discrédité l'intérêt de ce mode d'élimination des boues.

L'objectif est de définir les conditions des bonnes pratiques de l'épandage sur les sols agricoles. Il permet de réaliser des économies importantes pour les agriculteurs en limitant l'apport d'engrais et en améliorant la teneur en matières organiques des sols. Le traitement et l'élimination des boues représentent environ la moitié des dépenses de fonctionnement des stations d'épuration. Les techniques traditionnelles d'élimination des boues, telles que la mise en décharge, l'incinération et l'élimination en mer, présentent un certain nombre d'inconvénients. La mise en décharge et l'incinération des boues ont toutes deux des conséquences environnementales importantes en raison de la contamination des eaux souterraines et de la création de gaz à effet de serre

Les analyses physico-chimiques et bactériologiques peuvent jouer ce rôle de contrôle et mettre en évidence un plan dépendage défini (par exemple, définir des valeurs limites de concentration en ETM des sols, au-delà desquelles l'épandage de boues de station d'épuration est interdit; en agriculture biologique, une réglementation spécifique s'applique pour le choix des matières organiques autorisées dans cette agriculture);

- Création des micro-entreprises de commercialisation des produits transformés en matières fertilisantes, normalisés et homologués, comme supports de culture.

- Stockage des boues dans les stations d'épuration génère systématiquement des odeurs, nécessitant une solution rationnelle et primordiale, surtout en période estivale et entraînant de gênes ou de nuisances pour le voisinage.

Un stockage correct des boues d'épuration est l'un des facteurs clés de la réussite des opérations d'épandage et de l'élimination de ces odeurs. Cependant, l'épandage sylvicole est une solution alternative d'élimination des boues, pouvant réduire une grande quantité qui ne sont pas valorisée pour l'épandage agricole.

- Réorienter l'agriculture traditionnelle vers une approche "intelligente" face aux changements du climat. En effet, Le passage à l'agriculture intelligente permettra non seulement aux agriculteurs de se prémunir des effets négatifs du changement climatique, il pourra également améliorer les rendements et les revenus des ménages, ce qui offre une grande variété d'aliments tout au long de l'année et maintient les eaux souterraines en bonne santé, entre autres services environnementaux.

Références bibliographiques

Anne, A (1945), Sur le dosage rapide du carbone organique des sols, *Ann. Agro*, 15 année, no 2 (1945) 161–172

A.F.E.E, (1976) .La stabilisation non biologique des boues fraîches d'origine urbaine. Synthèses bibliographique, Paris, 119p

Adams T., Sanders JR., (1984). Release to solution of zinc, metal.loaded sewage sludge. (Series B) 8: 85-99.The effects of pH on the copper and nickel.From *Environmental Pollution*.

Ademe, (1995). Les micropolluants métalliques des boues résiduares des stations d'épuration urbaines. Ed ADEME, Paris, 209p

ADEME, (2001). Les boues d'épuration municipales et leur utilisation en agriculture – dossier documentaire, Angers, France

AFNOR., (1985), Norme Française NU44-041, Matières fertilisantes, Boues des ouvrages des eaux usées urbaines, Détermination et spécification.

Akintola, O. O., Aderounmu, A. F., Abiola, I. O., et al (2019).Remediation potential of Baobab (*Adansonia digitata* L.)Seedlings grown in sewage sludge contaminated by Heavy Metals. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 2019, vol. 23, no 9, p. 1691-1697.DOI:<https://dx.doi.org/10.4314/jasem.v23i9.14>

(Albercht, 2007), Thermophilic aerobic granular biomass for enhanced settleability
Volume 41, issue4 February 2007, Pages 819-825.

Al-Saikhan,MS., El-Sayed, AB and Babeker, & MY., (2021), Study of Sewage Sludge Use for the Cultivation of Plants and its Effects on Soil Properties in Al Ahsa. *The Scientific Journal of King Faisal University*, vol.21, no.2, pp.1-7, Saudi Arabia.

Amadou, H., (2007), Modélisation du séchage solaire sous serre des boues de stations d'épuration urbaines. Thèse de Doctorat. Université Louis Pasteur-Strasbourg 1/ France.

Amir, (2005).Contribution à la valorisation des boues de la station d'épuration par compostage: devenir des micropolluants métalliques et organiques et billon humique du compost. Thèse, doctorat, Maroc, 341p.

Andry R., (2010). Contribution à l'étude comparative des produits d'origines biologique et chimique pour la lutte contre l'alternariose de la tomate. Mem. Magister. « biochimie fondamentale et appliquée ». p 8.

Antolin, M.C., Pascual, I., Garcia, C., Polo, A., & Sanchez-Diaz, M., (2005), Growth, yield and solute content of barley in soils treated with sewage sludge under semi-arid Mediterranean conditions. *Field Crops Research*, vol.94, no. 2, pp. 224–37.

- Atalay A., Blanchar RW, 1984.** Evaluation of methane generator sludge as soil amendment J. Environ. Qual. 13: pp.341-344.
- Bahri, A., Houmane, B., (1987),** Effet de l'épandage des eaux usées traitées et des boues résiduelles sur les caractéristiques d'un sol sableux de Tunisie. Science du sol, vol.25, no. 4, ISSN: 0011-9164, pp. 267-278.
- Bahri, H., Annabi, M., (2011),** Effet des boues urbaines sur la mouillabilité et la stabilité structurale d'un sol cultivé. Étude et Gestion des Sols, vol.18, no. 3, pp. 7-15.
- Baize, D., (1988),** Les formations crayeuses redistribuées du Jovinien et les sols qui en sont issus. Sci. Sol, vol.26, no. 2, pp. 113-116.
- Baumont, S. (2004).** Réutilisation des eaux usées épurées : risques et faisabilité en Ile de France. Rapport de stage, ENSAT (Toulouse).p60-62.
- Belhachemi A. (2021).** Etude du comportement écophysiological de *l'Eucalyptus camaldulensis* et de *Solanum lycopersicum* sous serres de films PE-LD : Productivité et rendement en huiles essentielles. These de doctorat. Fac. SNV. Univ Tiaret. 113p.
- Bhogal A., Nicholson F.A., Chambers BJ., Shepherd MA., (2003).** Effects of past sewage sludge on heavy metal availability in light textured soils: implications for crop yields and metal uptakes. Environmental Pollution, 121: 413-423.
- Bipfubusa M., N'Dayegamiye A., Antoun H., (2006).** Evaluation des effets des boues mixtes fraîches et de leurs composts sur les rendements des cultures et leur nutrition minérale. Agrosols. Vol. 17. n. 1. pp. 65-72
- Blancard D., Laterrot H., Marchoux G. Et Candresse T., (2009).** Les maladies de la tomate: identifier, connaitre, maîtriser. Edition Quae C/O INRA, Versailles, 679 p.
- Callot, M. (1980),** Le calcaire actif des sols et sa signification, Bull. AFES (1980) 17–26.
- Chafaa M., Maatoug M., Roman T., Hellal B., Ait Hammou M., (2015).**Bio-surveillance des métaux lourds (Pb, Zn, Cu) a la sortie de la station d'épuration TIARET (ALGERIE) au moyen des végétaux aquatiques : plante Lemna Minor, algue Spyrogyra Link Sp et bryophyte Fontinalis Antipyretica .European Scientific Journal.11 : 1857 – 7881, 1857- 7431.
- Chang AC., WarnekeJE., Page AL., Lund LJ., (1984).** Accumulation of heavy metals in sewage sludge-treated soils.J. Environ. Qual. 13: 87-91.
- Chaux, C Et Foury, Cl. (1994).** Productions légumières. Tome 3 : Légumineuses potagères, légumes fruits. Ed : Lavoisier, Paris, 477p.

- Debba MB, (1998).** Contribution à l'étude des boues résiduaires : intérêt agronomique et effet des polluants dans le sol et le végétal. Mémoire de magistère en science agronomique univ de mostaghanem. p180.
- Derouiche Fatma, (2012),** Contribution a l'étude des boues résiduaires comme amendement organiques pour les cultures maraichères
- Dominguez NF, Losada MRM., Rodriguez AR., (2012).** Residual effects of lime and sewage sludge inputs on soil fertility and tree and pasture production in a Pinus radiata D. Don silvo- pastoral system established in a very acidic soil J. Agric. Ecosystème. Environ. 161 :12.pp. 165-173.
- Dridi B., Toumi C., 1999.** Influence d'amendements organiques et d'apport de boues sur les propriétés d'un sol cultivé. Etude et gestion des sols. Vol. 1. n. 6. pp. 7-14.
- Duchene., 1990.** Les systèmes de traitement des boues de stations d'épuration des petites collectivités. TEC et DOC, 1^{ère} éd, CEMAGREF. Paris, 30p.
- Eid, E.M., Alrumman, S.A., El Bebany, A.F., Hesham, A., Taher, M.A., & Fawy, K.F., (2017),** The effects of different sewage sludge amendment rates on the heavy metal bioaccumulation, growth and biomass of cucumbers (*Cucumis sativus* L.). Environmental Science and Pollution Research, vol.24, no. 19, pp.16371-82.
- Epstein, E., Taylor, JM., & Chaney RL., (1976),** Effects of sewage sludge and sludge compost applied to soil on some soil physical and chemical properties. Journal of Environmental Quality, Vol.5, no.1, pp. 422-426.
- Fahd-Rachid, A., (1993),** Effet à long terme d'apports continus de déchets urbains sur les caractéristiques du sol. Conséquences sur les propriétés de la matière organique en relation avec sa teneur en lipides. Thèse de Doctorat en Sciences agronomiques. Montpellier, ENSA/France.
- Gallardo-Laraa, F., Nogales, R., (1987),** Effect of the application of town refuse compost on the soil-plant system : A review. *Biological Wastes*, vol.19, no. 1, pp. 35-62.
- Gattullo, C.E., Mininni, C., Parente, A., Montesano, F.F., Allegretta, I., & Terzano, R., (2017),** Effects of municipal solid waste- and sewage sludge-compost-based growing media on the yield and heavy metal content of four lettuce cultivars. *Environmental Science and Pollution Research*, vol.24, no. 32, pp. 25406–25415.
- Guerrero FD., Davey RB., Miller RJ.(2001),** Use of an allele-specific polymerase chain reaction assay to genotype pyrethroid resistant strains of *Boophilus microplus* (Acari: Ixodidae) J. Med. Entomol.2001;38:44–50.

- Glemas P, (1980).** Fertilisation boue, gadoue, composts définition, fabrication et caractéristique. Revue cultivar n° 132: 44-51 .
- Houot S., Cambier P., Benoit P., (2009).** Effet d'apports de composts sur la disponibilité de micropolluants métalliques et organiques dans un sol cultivé. Étude et Gestion des Sols. Vol. 16. ¾.pp. 255-274.
- Hussein, A.H.A., (2009),** Impact of sewage sludge as organic manure on some soil properties, growth, yield and nutrient contents of cucumber crop. Journal of Applied Sciences, vol.9, no. 8, pp. 1401– 11.
- Jarde, E., Mansuy, L., Faure P., (2003).** Characterization of the macromolecular organic content of sewage sludges by thermally assisted hydrolysis and methylation-gas chromatography-mass spectrometer (THM-GC/MS). J. Anal. Appl. Pyrol., 68-69, 331-350.
- Jarde, E., Mansuy, L., Faure P.,(2005).** Organic markers in the lipidic fraction of sewage sludges volume 39,issue7 April 2005, Pages 1215-1232
- Joseph et al. (2002).** Station d'épuration : Disposition constructives pour améliorer leur Fonctionnement et faciliter leur exploitions.
- Kid, Timothy, Miller, Thomas, Chou, M, Chiang, Tingchia (2002)** Reply:- 88DO - 10.1103/PhysRevLett.88.189702, JO - Physical Review Letters ER -
- Kiemnec, GL., Hemphill M., Hickey TL. Jackson., Volk VV., (1990).** Sweet corn yield and tissue metal concentration after seven years of sewage sludge applications. J. Agric. Prod., 3: 232-237
- Koller E, (2004).** Traitement des pollutions industrielles .Ed, Dunod. Paris PP59-90. 55-116.
- Korboulewsky N., Masson G., Bonin G., Massiani C., Prone A., (2001),** Effets d'un apport de compost de boues de station d'épuration dans un sol
- Larab Salim (2019),** La réutilisation des eaux usées traités en agriculture à partir de la station d'épuration (Ain Bouchekif) de la wilaya de Tiaret
- Laumonnier, R. (1979).** Cultures légumières et maraichères. Tome 3, Ed: J-B
- Lester JN., Sterritt RM., Kirk PWW., (1983).** Significance and behavior of heavy metals in waste water treatment processes: 11: Sludge treatment and disposal. The Science of the Total Environment. 30: 45-83. Baillièrè, Paris, 240p.
- Martin Hilmi et al (2020),** La culture de la tomate production, transformation et commercialisation
- Mathieu C., Pieltain F., (2003).**Analyse chimique des sols : Méthodes choisies. Lavoisier 386p.

Mazen, A., Faheed, F.A., & Ahmed, A.F., (2010), Study of potential impacts of using sewage sludge in the amendment of desert reclaimed soil on wheat and Jews mallow plants. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, vol.53, no. 4, pp. 917–30.

Mendoza, J., Garrido, T., Castillo, G., & Martin, N.S., (2006), Metal availability and uptake by sorghum plants grown in soils amended with sludge from different treatments. *Chemosphere*, vol.65, no. 11, pp. 2304 –12.

Mbila.et al.2000; Pegogenesis of heavy metals polluted soils.Thèse non publiée 2000,Iowastate University.

Moffett BF, Nicholson FA., Uwakwe NC., Chambers BJ., Harris JA., Hill TCJ., (2003). Zinc 13-19contamination decreases the bacterial diversity of agricultural soil. *FEMS Microbiology Ecology*, 43:

Mok HF., Majumder R., Laidlaw WS., Gregory D., Baker AJM., Arndt SK., (2012). Native Australian species are effective in extracting multiple heavy metals from biosolids. *Int J Phytoremediation*. 15: 615–632.

Morel J L, 1977. Contribution à l'étude de l'évolution des boues résiduares dans le sol. These de Docteur Ingénieur, Université de Nancy 1, France. p 117.

Nogueira, T.A.R., Franco, A., He, Z., Braga, V.S., Firme, L.P., & Abreu-Junior, C.H., (2013), Short-term usage of sewage sludge as organic fertilizer to sugarcane in a tropical soil bears little threat of heavy metal contamination. *Journal of Environmental Management*. 114:168–77.

ONA, 2018.Office National d'Assainissement .La station d'épuration de la ville de Tiaret.13 p +Annexes.

Pagliai M., Antisari L., 1993. Influence of waste organic matter on soil micro and macrostructure. *Bioresource Technology*.43:205-213.

Parkpain, P., Sreesai, S., & Delaune, R.D., (2000), Bioavailability of heavy metals in sewage sludge-amended Thai soils. *Water, Air and Soil Pollution*, vol.122, pp. 163-182.

Petit KMB, 2007.Actulisation des connaissances sur les éléments biologiques et minéraux

Philouze J., 1993. Les tomates. INRA, station d'Amélioration des plantes maraichères. Sauve qui peut ! n°6-7, INRA, 84143, Montfavet 4 p.

Schalscha E.B., Morales M., Vergara I., Chang AC., (1982). Chemical. Fractionation of heavy metals in wastewater affected soils. *J. Water Pollution Control Fed*. 54: 175-180.

Shankara Naika et al ; (2005), la culture de la tomate

Scholz, Miklas. 2016. “Chapter 21 - Sludge Treatment and Disposal.” In *Wetlands for Water Pollution Control* (Second Edition), 157–68. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63607-2.00021-6>.

Sommers LE., Nelson DW., 1977. Analyses and their interpretation for sludge application
Soudani L., Maatoug M., Hermann, H., Mykola, K., Oliver, W., Christin, M., ... & Nadia, B. (2016). Fertilization value of municipal sewage sludge for *Eucalyptus camaldulensis* plants. *Biotechnology Reports*, 13, 8-12. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.btre.2016.12.001>

Soudani L., (2017). Fertilisation du sol de plantation d'*Eucalyptus camaldulensis*. Dehnh par les boues résiduaires issues de la station d'épuration de Tiaret (Algérie). Thèse de doctorat. Fac SNV. Univ Tiaret. 114p

Saruhan V., Gul I., Aydin I (2010). The effects of sewage sludge used as fertilizer on agronomic and chemical features of bird's foot trefoil (*Lotus corniculatus* L.) and soil pollution. *Scientific Research and Essays*. 5: 2567-2573.

St-Yves A, 1984. La valorisation agricole des boues de stations d'épuration. Assises annuelles 1984 de l'Association Québécoise des Techniques de l'Eau, Québec, le 8 mars 1984. 15 p

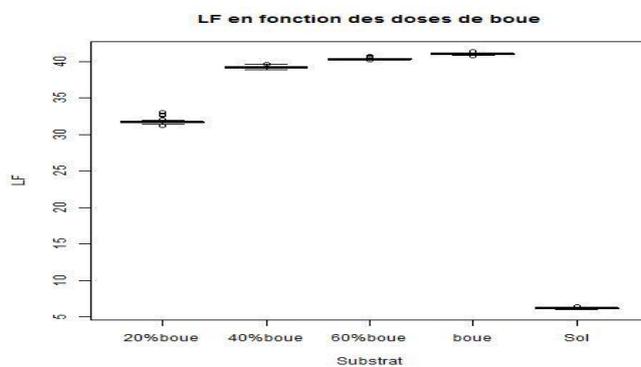
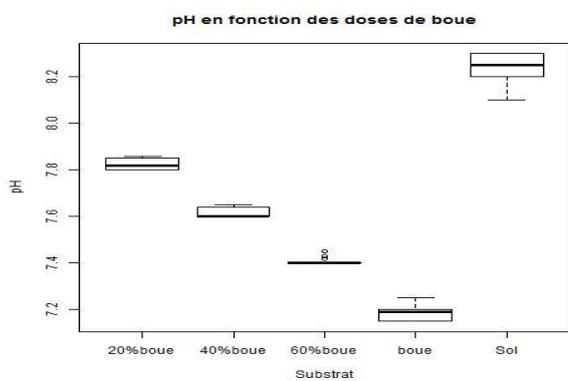
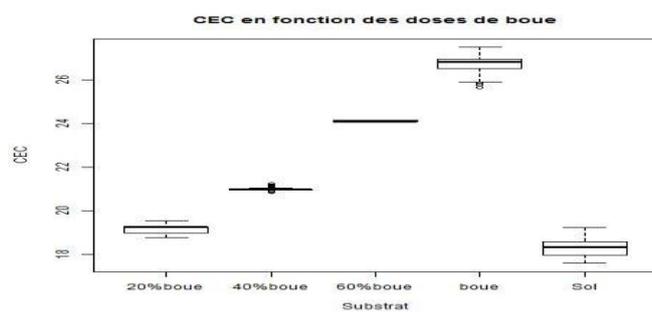
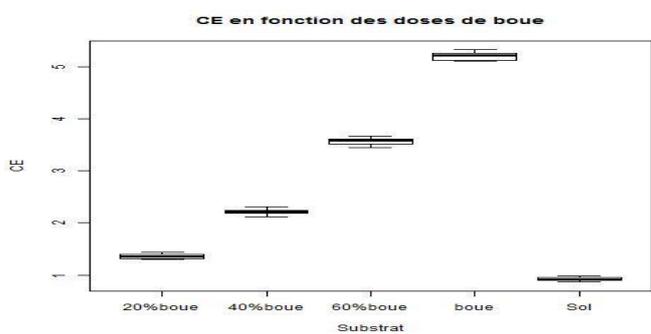
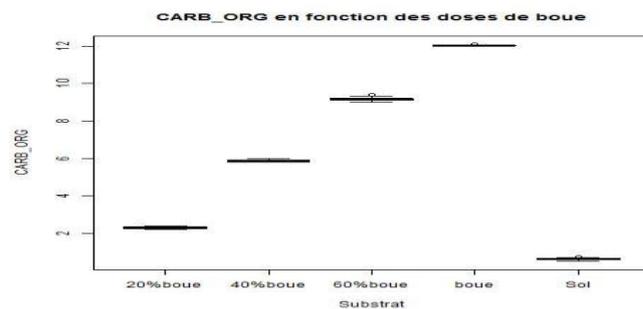
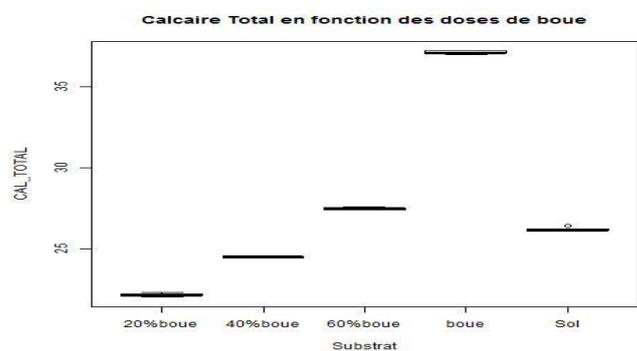
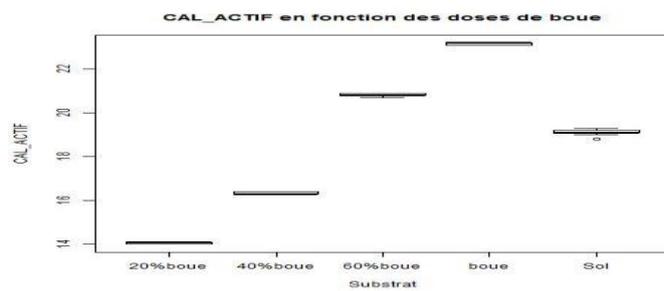
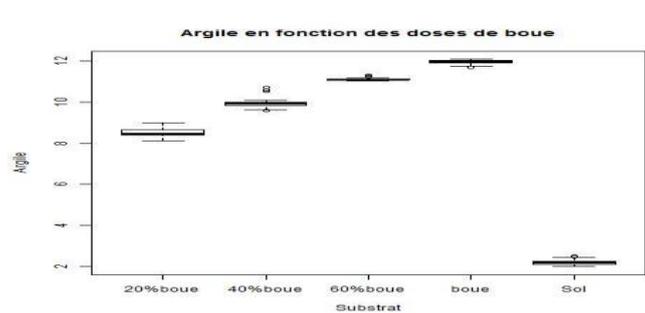
Tejada P, González-Dugo M. V, Fereres E (2016). Seasonal stability of chlorophyll fluorescence quantified from airborne hyperspectral imagery as an indicator of net photosynthesis in the context of precision agriculture *Environmental Science*

Wiche O., Kummer NA., Heilmeier H., (2016). Interspecific root interactions between white lupin and barley enhance the uptake of rare earth elements (REEs) and nutrients in shoots of barley. *J. Plant Soil*, 402 pp. 235-245.

Annexes

Annexes I

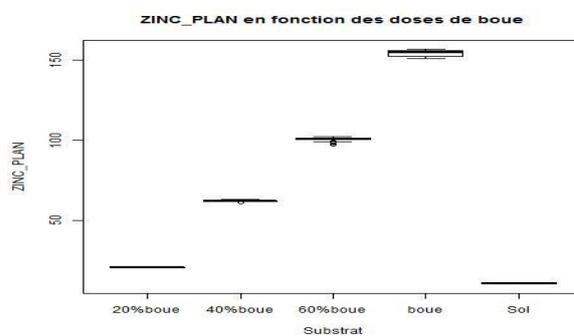
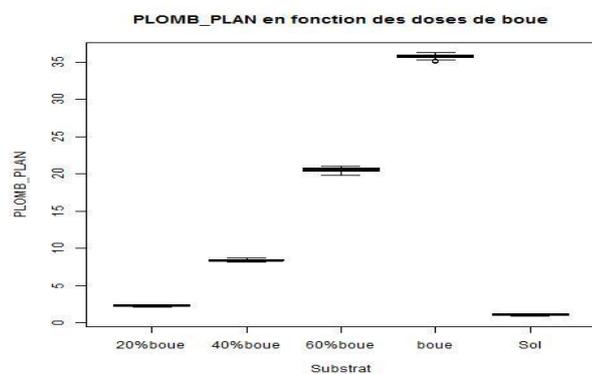
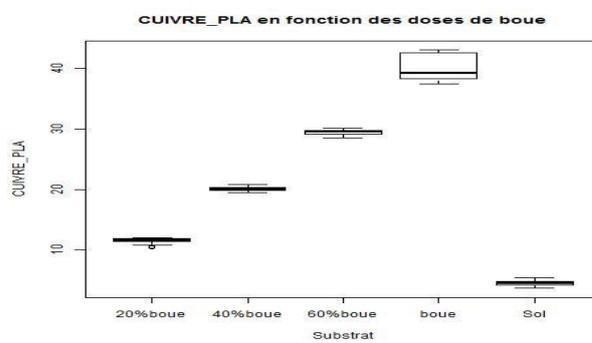
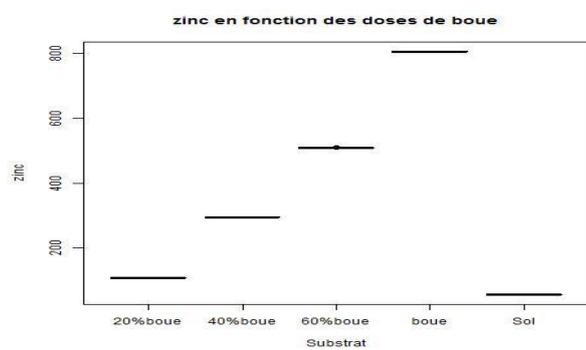
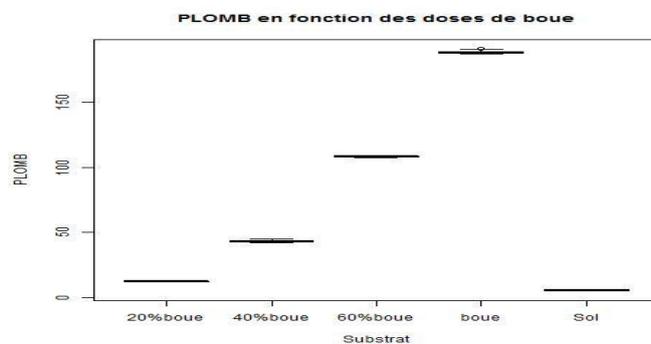
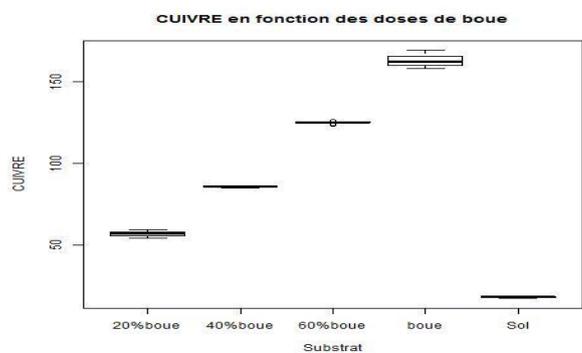
Propriétés physico-chimiques de différentes fractions sol/boue²



² Courbes réalisées par le logiciel R (Benaichata, 2020)

Annexe II

Concentrations du Pb, Cu et du Zn dans différentes fractions sol/boue



Annexe III

Paramètres biométriques de la Tomate mesurés dans différentes fractions sol/boue

