

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ibn Khaldoun -Tiaret

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie



## THESE de DOCTORAT en SCIENCES

Spécialité : Sciences de la Nature et de la Vie  
Option : Sciences de l'Environnement et Ecologie

Présentée par

**SOUDANI Leila**

**Thème :**

**Fertilisation du sol de plantation d'*Eucalyptus camaldulensis*.  
Dehnh par les boues résiduaires issues de la station d'épuration  
de Tiaret (Algérie).**

Soutenu le :19/10/2017 devant le jury composé de :

M. DELLAL Abdelakader.....Professeur,...U. Ibn Khaldoun Tiaret .....*Président*  
M.MAATOUG Mhamed.....Professeur,...U. Ibn Khaldoun Tiaret .....*Directeur de thèse*  
M.HEILMEIR Heilmeier .....Professeur,...TU. Freiberg Allemagne .....*Co-directeur de thèse à l'étranger*  
M. LATIGUI Ahmad.....Professeur, Centre Universitaire de Tissimsilt ...*Examineur* M.  
Mme. OULBACHIR Karima,...MCA, U. Ibn Khaldoun Tiaret ..... *Examineur*  
M. CHAIBI Rachid,.....MCA, Université. Laghouat..... *Examineur*

Année Universitaire: 2016/2017

# **Remerciements**

*Une thèse, bien entendu, c'est un travail de longue haleine, un défi que l'on se donne à soi-même. Mais c'est surtout une formidable histoire de relations, de rencontres et d'amitié. La pratique de la recherche scientifique vous place souvent face des questionnements intellectuels et des obstacles techniques. Les solutions, rarement simples et linéaires, ne se sont jamais trouvées sur mon tabouret de bench! Non, elles se sont imposées par le fruit des nombreux contacts que j'ai eu l'occasion de créer avec nombre de personnes passionnées dans leur projet et dans leurs spécialités. Cette période de doctorat aura été probablement l'un des plus beaux chapitres de ma vie. J'aimerais remercier ceux et celles qui d'une manière ou d'une autre ont participé à son écriture ...*

*En premier lieu, je tiens à remercier mon directeur de thèse, monsieur MAATOUG Mhamed, pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant d'encadrer ce travail doctoral, pour ses multiples conseils et pour toutes les heures qu'il a consacrées à diriger cette recherche. J'aimerais également lui dire à quel point j'ai apprécié sa grande disponibilité et son respect sans faille des délais serrés de relecture des documents que je lui ai adressés. Au cours de ce travail, il a souvent attiré mon attention sur certains problèmes de conception et m'a consacré beaucoup de temps, entre-autres pour s'occuper de l'organisation du jury de thèse. Enfin, j'ai été extrêmement sensible à ses qualités humaines d'écoute et de compréhension tout au long de ce travail doctoral.*

*Ce travail de recherche a été réalisé au Laboratoire du sol de au sein de Institut für Biowissenschaften, Freiberg, Allemagne, Je remercie Monsieur le Professeur Hermann Heilmeier d'avoir co-encadré ce travail de thèse. Je lui remercie de m'avoir fait confiance et accueilli dans son laboratoire au sein d'une équipe enthousiaste et passionnée. Grâce à vous, j'ai pu réaliser mon travail de doctorat dans d'excellentes conditions.*

*Je tiens à remercier tout particulièrement Monsieur DELLAL Abdelkader, Professeur à la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de Tiaret de m'avoir fait l'honneur de présider le jury.*

*J'exprime toute ma gratitude à Monsieur LATIGUI Ahmed, Professeur au Centre Universitaire de Tissimilt, Madame Oulbachir Karima, MCA à la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et Monsieur Chaibi Rachid, MCA à l'Université Laghouat qui ont accepté d'examiner ce travail et m'ont fait l'honneur d'en être rapporteurs.*

*Je remercie également le directeur d'ONA Tiaret et les responsables de la pépinière d'Ain Tzarit pour m'aider d'obtenir les échantillons nécessaires de la réalisation de ce travail.*

*Mes remerciements vont aussi à ma famille et mes Amis qui, avec cette question récurrente, « Quand est-ce que tu la soutiens cette thèse? », bien qu'angoissante en période fréquente de doutes, m'ont permis de ne jamais dévier de mon objectif final.*

## *Dedicace*

*Les mots les plus simples étant les plus forts, j'adresse toute Mon affection à ma mère qui n'a pas vu l'aboutissement de Mon travail, mais je sais que tu en aurais été très fier de ta fille!! ! Maman m'a fait comprendre que la vie n'est pas faite que de problèmes qu'on pourrait résoudre grâce à des formules mathématiques et des algorithmes. Malgré son décès son amour me Porte et me guide tous les jours. Merci pour avoir fait de moi ce que je suis aujourd'hui. Est-ce un bon endroit pour dire ce genre de choses? Je n'en connais en tous cas pas de mauvais. Je vous aime. !repose en paix ma chérie*

## Liste Des Abreviations, Sigles Et Des Acronymes

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
Cd:	Cadmium
CDER:	Centre de Développement des Energies Renouvelables
CE:	Conductivité Electrique
CEC:	Capacité d'Echange Cationique
CEN:	Le Comité Européen de Normalisation
Cr:	Chrome
CTO:	Composés trace organiques
Cu:	Cuivre
DGF:	Direction générale des forêts
DJA :	Dose Journalière Admissible
EH :	équivalents habitants
ETM:	Eléments traces métalliques
FAO:	Food and agriculture organization
Fe:	Fer
H2SO4:	Acide sulfurique
Ha:	Hectare
HAP:	Hydrocarbure aromatique polycyclique
HF:	Acide fluorhydrique
Hg:	Mercure
HNO3:	Acide nitrique
ICP-MS:	Spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif
J:	Jour
K:	Potassium
MCEF:	Maison Commune Emploi Formation
Meq:	Milliéquivalent
MES:	Matière en suspensions

MF:	Matière fraîche
mmhos:	Millimhos
Mn:	Manganèse
MO:	Matière organique
MS:	Matière sèche
MST :	Matière sèche totale
N:	Azote total.
Ni:	Nickel
NOEC:	Concentration sans effet observé
NPP:	Nombre le Plus Probable
NPPUC :	Nombre le Plus Probable d'Unités Cytopathiques
ONA:	Office Nationale d'Assainissement
OTV :	Traiter et valoriser les boues
P:	Phosphore
Pb :	plomb
PCB:	PolyChloro Biphényles
ppb :	partie pour billion
ppm:	Partie pour mille
S:	Coefficient de compressibilité
STEP:	Station traitement des eaux polluées
Zn:	Zinc

# *Liste des tableaux*

## **- Chapitre I -**

<b>Tableau 1 :</b> Caractéristiques des boues primaires et secondaires.....	7
<b>Tableau 2:</b> Classification des boues.....	13
<b>Tableau 3 :</b> Siccité moyenne des boues épaissies.....	15
<b>Tableau 4 :</b> Efficacité comparée boues/engrais.....	17
<b>Tableau 5:</b> Caractéristiques agronomiques des boues résiduaires urbaines (primaires + activées en % sur les matières sèches).....	18
<b>Tableau 6 :</b> Propriétés et rôle des micros organisme du sol dans la biodégradation de la matière organique.....	21

## **- Chapitre II -**

<b>Tableau 1 :</b> Principales règles d'épandage des boues.....	28
---	----

## **- Chapitre III -**

<b>Tableau 1:</b> Origine probable des éléments traces contenue dans certaines boues.....	35
<b>Tableau 2:</b> Effets de quelques éléments métalliques sur les végétaux .....	37
<b>Tableau 3:</b> Principaux effets de quelques métaux lourds sur la biomasse microbienne du sol. .....	38
<b>Tableau 4 :</b> Les ETM pouvant présenter une toxicité chez les animaux. ....	39
<b>Tableau 5:</b> Effets de quelques éléments Traces Métalliques sur l'homme.....	40
<b>Tableau 6 :</b> Teneurs limites réglementaires en éléments-traces métalliques des sols et des boues d'épuration municipales dans l'Union Européenne et en France .....	42

## **- Chapitre V -**

<b>Tableau 1 :</b> Caractéristiques du sol et des boues utilisées dans l'expérimentation .....	54
<b>Tableau 2 :</b> Teneurs en éléments traces métalliques dans les plantes d'eucalyptus utilisés avant la transplantation.....	56
<b>Tableau 3 :</b> Caractéristiques physico-chimiques du substrat (T). ....	56
<b>Tableau 4 :</b> Caractéristiques physicochimiques du substrat (B1). ....	58
<b>Tableau 5 :</b> Caractéristiques physicochimiques du substrat (B2).....	58

<b>Tableau 6 :</b> Caractéristiques physicochimiques du substrat (B3).....	59
<b>Tableau 7 :</b> Teneurs en ETM dans la plante transplantées dans les différents substrats (T, B1, B2, B3) Après six mois de transplantation.....	64
<b>Tableau 8:</b> Effet de date de prélèvement sur les paramètres biométriques étudiés.....	700

# *Liste des figures*

## - Chapitre IV -

<b>Figure 1:</b> Situation géographique et principaux collecteurs de la ville de Tiaret vert la station d'épuration .....	44
<b>Figure 2:</b> Vue générale de la station d'épuration de Tiaret. ....	45
<b>Figure 3:</b> lits de séchage des boues primaires et secondaires de la STEP.....	46
<b>Figure 4:</b> Méthode de transplantation des plants d'E.camaldulensis dans les pots .....	49

## - Chapitre V -

<b>Figure 1 :</b> AFC entre les 04 fractions paramètres physico chimiques et concentrations en éléments nutritifs après six mois de transplantation d'Eucalyptus.....	60
<b>Figure 2 :</b> Analyse canonique des correspondances (ACC) entre les différentes fractions de boues et les paramètres physicochimique. ....	63
<b>Figure 3:</b> Effet des fractions de boues sur la croissance d'Eucalyptus camaldulensis .....	66
<b>Figure 4:</b> Effet de la fraction de boues sur la croissance en hauteur d'Eucalyptus camaldulensis.....	68
<b>Figure 5:</b> Effet de la fraction de boues sur le nombre de feuilles d'Eucalyptus camaldulensis .....	69
<b>Figure 6:</b> Effet de la fraction de boues sur la croissance en diamètre d'Eucalyptus camaldulensis.....	69
<b>Figure 7:</b> comparaison des paramètres biométriques d'Eucalyptus camaldulensis transplantés dans différentes fractions à ceux obtenus dans le sol témoin. ....	70
<b>Figure 8:</b> Evolution des paramètres biométriques en fonction des différentes fractions de boues / sols. (A: Effet des concentrations de boues, B: Effet de la date de mesure, C: Date de mesure de l'interaction des effets et concentrations de boues). ....	71

# Table de Matière

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

## *Partie Bibliographique*

### *Chapitre I : Les boues de station d'épuration : composition et principes de traitement*

1. Etapes de production d'une boue de station d'épuration .....	6
1. 1. Production des boues .....	6
1.1.1. Le traitement primaire : .....	7
1.1.2. Les traitements secondaires : .....	7
1.2. Traitement des boues en vue de leur utilisation .....	8
1.2.1. Réduction du volume.....	9
1.2.1.1. Epaissement des boues .....	9
a). Epaissement par décantation .....	9
b). Epaissement par flottation.....	10
c). Epaissement par centrifugation .....	10
d). Epaissement par drainage .....	10
1.2.1.2. Déshydratation des boues.....	10
1.2.1.3. Séchage thermique des boues.....	11
1.2.2. Réduction du pouvoir fermentescible .....	11
a). La stabilisation aérobie .....	11
b). La digestion anaérobie .....	11
c). La stabilisation chimique .....	12
d). Le compostage.....	12
2. Composition d'une boue .....	14
2.1. Siccité .....	15
2.2. Matière organique et éléments fertilisants .....	15
2.2.1. Matière organique .....	15

2.2.2. Eléments fertilisants .....	16
Teneur en Azote.....	16
Teneur en Phosphore (P).....	16
Teneur en Potassium (K) .....	16
Teneur en Calcium et Magnésium (Ca, Mg).....	17
Teneur en Sodium (Na).....	17
2.2.2.1. Comparaison des boues résiduaires avec les fertilisants commerciaux .....	18
2.3. Micropolluants minéraux, organiques et biologiques.....	19
2.3.1. Eléments traces métalliques.....	19
2.3.2 Micropolluants organiques .....	20
2.3.3. Micropolluants biologiques .....	20
3. Propriétés physiques des boues.....	21
3.1. La teneur en matière sèche .....	22
3.2. La teneur en matières volatiles.....	22
3.3. La teneur en eau interstitielle .....	22
3.4. La viscosité.....	22
3.5. La charge spécifique .....	22
3.6. La résistance spécifique .....	22
3.7. La compressibilité.....	23
3.8. Les pouvoirs calorifiques .....	23

## ***Chapitre II : Devenir des boues***

1. La mise en décharge contrôlée.....	25
2. L'incinération.....	26
3. Epandage .....	26
3.1. Le mode d'épandage.....	26
3.2. Epandage des boues d'épuration urbaine sur des terres agricoles .....	27
3.3. Epandage en forêt.....	27

3.4. Règles d'épandage .....	28
4. Voies d'avenir pour réduire le volume des boues .....	30
4.1. La pyrolyse (thermolyse) .....	30
4.2. La gazéification .....	31
4.3. L'oxydation par voie humide.....	31

### ***Chapitre III : Effet des boues sur le sol, plantes: toxicité potentiel***

1. Effet sur le sol .....	33
1.1. Effet sur les propriétés physiques.....	33
1.2. Effet sur la matière organique .....	33
1.3. Effet sur la vie du sol .....	33
1.4. Effet sur les éléments fertilisants.....	33
1.5. Effet sur les éléments trace métalliques.....	34
2.Effets surle végétal. ....	34
3. Toxicité potentielle .....	35
3.1. Métaux lourds .....	35
3.1.1. Effet sur les micro-organismes .....	37
3.1.2. Effetsurl'animal .....	38
3.1.3. Effetsurl'homme .....	39
3.2. Teneurs limites en éléments traces dans les boues et les sols .....	41

### ***Partie Expérimentale***

#### ***Chapitre IV : Matériel et Méthodes***

1. Origine du matériel expérimentale .....	44
1. 1. Boues résiduaires de station d'épuration .....	44
1. 1. 1. Présentation de la station d'épuration de Tiaret .....	44
1. 1. 2. Production de boue .....	45
1.2. Sol.....	46
1.3. Matériel végétal.....	47
2. Protocole expérimentale .....	47

3. Analyses physico chimiques et mesures biométriques .....	48
3. 1. Cas du sol et de boue.....	49
Granulométrie.....	50
Matière organique .....	50
Carbone organique .....	50
Calcaire total.....	50
Calcaire actif.....	51
Conductivité électrique .....	51
Capacité d'échange cationique .....	51
Azote total .....	51
Rapport C/N .....	51
Phosphore .....	51
Potassium .....	52
Eléments traces métalliques .....	52
3. 2. Cas de la plante .....	52
3. 2. 1. Paramètres biometriques mesurés .....	52

### ***Chapitre IV : Résultats et discussions***

1. Caractérisation physicochimiques du sol et des boues résiduaires utilisés .....	54
2. Teneurs en éléments traces métalliques dans la plante .....	55
3. Analyses physico-chimiques des substrats et et des plantes après amendement.....	56
3.1. Analyses des substrats .....	56
3.1.1. Substrat (T) .....	56
3.1.2. Substrat (B1).....	57
3.1.3. Substrat (B2).....	58
3.1.4. Substrat (B3).....	59
3.1.5. Teneurs en ETM dans la plante transplantées dans les différents substrats.....	64
4. Effet de différentes concentrations de boues sur la croissance d'Eucalyptus .....	66
4. 1. Effet sur la croissance en hauteur .....	68

4.2. Effet sur le nombre de feuilles .....	68
3.1 Effet sur la croissance en diamètre .....	69
Conclusion.....	72
Conclusion générale.....	74
Référence bibliographique .....	77

# *Introduction*

---

L'amplification sans cesse croissante des activités humaines s'accompagne inévitablement d'une consommation d'eau qui se traduit par des rejets accrus de quantités d'eaux usées. Cette ressource en eau douce étant épuisable, les eaux usées subissent avant leur rejet dans le milieu naturel un traitement d'épuration dont la forme actuelle repose notamment sur un traitement biologique conduisant à la production des boues résiduelles. 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. Ainsi, le traitement d'un mètre cube d'eau usée domestique conduit à 350 à 400 grammes de matières sèches. C'est pourquoi, une usine de 50 000 équivalents habitants (EH) produit environ 3 tonnes de matières sèches par jour (soit au minimum 10 tonnes de boue en envisageant une étape de concentration portant à 30 % la siccité des boues avant évacuation). Face au problème de la gestion des volumes de boue produits, les grands enjeux pour les traiteurs d'eau sont alors : de réduire les volumes et les masses de boues, de maîtriser la siccité, d'hygiénisme, diminuer voire annuler la toxicité.

Quelle solution pour éliminer ces résidus dans les conditions les plus économiques tout en respectant les contraintes liées à la protection de l'environnement et l'hygiène publique.

Dans certains pays quelques solutions qui peuvent être qualifiées de finales pour éliminer les boues d'épuration sont rapportées. Par exemple, au royaume Uni, 67% des boues produites sont épandues sur les terres (2/3 en valorisation agricole et 1/3 en revalorisation des cités et en remplissage), 29% sont larguées en mer et 4% incinérées (Grenier, 1989).

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 (Laster et al, 1989), et représente l'un des plus grands problèmes auxquels les ingénieurs sanitaires doivent faire face aujourd'hui (Grenier, 1989 ; Koller 2004).

Les solutions traditionnelles, telles que la mise en décharge et l'incinération, présentent plusieurs inconvénients: la décharge peut représenter le risque de contamination des eaux souterraines, tout comme la combustion qui est la source de la pollution atmosphérique. Le largage en mer représente à la fois un déplacement des problèmes de pollution, et une perte de matériel potentiellement réutilisable ou recyclé (Cameron et al., 1997; Belmonte, 2003). L'application en agriculture est considérée comme l'un des modes de valorisations acceptables à moyen et à long terme dans l'Union européenne (Düring et Gath, 2002). En effet, la présence de métaux toxiques dans les boues peut limiter son application en raison du risque de contamination

du sol et du transfert de substances toxiques dans la chaîne alimentaire (Nogueira et al., 2009). Le risque d'application des boues d'épuration a favorisé l'utilisation de ce résidu dans les terres forestières (Horswell et al., 2006), principalement parce que la plupart des produits forestiers n'entrent pas directement dans la chaîne alimentaire humaine (Denaix et al., 2011).

Dans ce contexte La valorisation sylvicole des boues d'épuration peut apparaître dans certaines situations comme une alternative aux solutions actuelles, pour à la fois améliorer la qualité des eaux et optimiser la dégradation et le recyclage des éléments organiques et minéraux.

En Algérie, il y a 165 stations d'épuration qui produisent actuellement environ 250 000 tonnes de boues annuellement, devrait atteindre 400 000 tonnes d'ici 2020, selon les données du Ministère des Ressources en Eau Algérie (CDER,2014).

L'élimination des boues d'épuration de la station de traitement des eaux usées de Tiaret est un problème grave pour le Bureau national de l'assainissement (ONA). La station produit environ 10 000 tonnes par an de matière sèche. Nous supposons que les boues urbaines, quel que soit leur type, peuvent être utilisées dans les plantations forestières pour améliorer la matière organique dans le sol, augmentant la croissance des plantes et réduisant le volume de boues produites par les eaux usées (Kozlov et al., 2012; Belyaeva et Korotkova, 2013).L'étude que nous présentons est une contribution à l'étude des boues résiduelles de la station D'épuration de la ville de Tiaret comme étant un amendement organique du sol et pour la croissance, le Développement et le rendement d'une plantation d'eucalyptus.

Le travail à trois objectifs:

- Evaluer les caractéristiques physico-chimiques et biologiques de boues de la station d'épuration d'Ain- Bouchekif de Tiaret.
- Etudier l'effet de la boue sur les paramètres physico-chimiques du sol après l'amendement
- Etudier le comportement morphologique de la plante à savoir la croissance en longueur, en diamètres et on nombre de feuilles après l'amendement par les boues résiduelles.

Ce travail s'articule en deux parties, la première est une synthèse bibliographique rassemblant les données concernant les boues de station d'épuration à savoir sa composition et principe de traitement, devenir des boues d'épuration et l'effet de compost de boues sur le

sol et plantes. la seconde partie décrit les matériels et méthodes suivis dans l'étude englobe une identification de la zone d'étude et les méthodes d'analyses adoptées et la mise en place du protocole expérimental. , les résultats obtenus et leurs interprétations et discussions.

## *Partie Bibliographie*

---

***Chapitre I : Les boues de station d'épuration :  
composition et principes de traitement***

---

L'épuration des eaux usées consiste en une succession d'opérations unitaires qui permet l'élimination des matières polluantes (d'origine minérale, organique ou encore bactérienne) via des processus physico-chimiques et biologiques. 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. Sa composition varie en fonction du type d'effluent à traiter (eaux usées domestiques, agro-alimentaires ou industrielles) et des performances des procédés épuratoires utilisés (Werther et Ogada, 1999 ; Jarde et al., 2003 ; Singh et al., 2004).

### **1. Etapes de production d'une boue de station d'épuration**

L'épuration des eaux usées, qu'elles soient d'origine domestique, pluviale, industrielle ou qu'elles correspondent à des matières de vidange, aboutit à la production de boues. Ces dernières sont ensuite traitées en fonction de leur destination finale.

Il convient de distinguer les eaux usées urbaines qui sont formées par les rejets des eaux domestiques auxquelles peuvent s'ajouter les eaux usées d'ensembles collectifs (hôpitaux, aéroports, écoles, campings, parkings) et celles d'activités artisanales et commerciales (cabinets médicaux, cabinets dentaires, ateliers photo etc.)

Les eaux usées industrielles ont des compositions très variables selon le type d'industrie (agro-alimentaire, chimique, métallurgique, etc.), selon le degré de recyclage des produits et de l'eau, et selon le cycle de fabrication. (Murillo, 2004).

#### **1. 1. Production des boues**

Avant l'arrivée dans la station d'épuration, les collecteurs des eaux usées charrient des matières très hétérogènes, et souvent grossières. Les eaux qui arrivent à la station d'épuration vont subir en premier lieu des traitements de dégrossissage nommés pré-traitements. Ceux-ci vont permettre d'extraire la plus grande quantité des éléments dont la taille (détritus grossiers), le pouvoir abrasif (sables, argiles) et la masse spécifique (graisses flottantes) risquent de perturber le fonctionnement des étapes ultérieures. Ces pré-traitements constituent une première étape très importante pour assurer un traitement efficace des eaux usées (Koller, 2004).

Après les pré-traitements, 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 pré-traitements, finement dispersées ou à l'état colloïdal) et la densité de ces particules sont très variables.

### 1.1.1. Le traitement primaire

Correspond à une étape gravitaire qui permet d'isoler par décantation les particules décantables. Les eaux vont traverser les bassins décanteurs à faible vitesse pour que les matières en suspension puissent sédimenter. Les décanteurs primaires sont équipés d'un pont tournant qui concentre les matières décantées vers le centre du bassin. Elles sont alors prélevées par des pompes qui les refoulent jusqu'aux installations de traitement des boues (Duchene, 1990).

### 1.1.2. Les traitements secondaires

La décantation permet l'élimination des particules de grandes tailles (supérieures à 50 microns). 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 détritiques 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 colloïdes sont donc des particules impossibles à décanter naturellement. Il est alors nécessaire de faire appel à des traitements secondaires. Ceux-ci permettent d'éliminer les particules non décantables et les matières dissoutes. Ils font généralement appel à des procédés physico-chimiques ou biologiques. (Morel, 1977 ; Duchene, 1990 ; Debba, 1998 ; ADEME, 2001 ; Albercht, 2007).

Les boues primaires, issues de la décantation primaire, et les boues secondaires, constituent les boues fraîches. Leur composition est rassemblée dans le tableau 1.

**Tableau 1 :** Caractéristiques des boues primaires et secondaires (Weemaes et Verstraete, 1998).

	Boues primaires	Boues secondaires
Matière sèche totale (% MST)	2 – 8	0,83 – 1,16
Matières volatiles (% MST )	60 – 80	59 – 88
Huiles et Graisses (lipides) (%MST )	13 – 65	5 -12
Protéines( % of MST )	20 – 30	32 – 41
Azote ( N, % MST )	1,5 – 4	2,4 – 5,0

Phosphore ( P, % MST )	0,17 – 0,6	0,6 – 2,3
Potassium ( K, % MST )	0– 0,41	0,2 – 0,29
Cellulose (% MST)	8 – 15	-
pH	5 – 8	6,5 – 8,0
Alcalinité (mgdm-3 comme CaCO <sub>3</sub> )	500 –	580 – 1100
Acides organiques (mg dm-3 )	1500	1100 – 1700
	200 –	18,6 – 23,2
	2000	
	23,2 - 29	

Les boues ainsi obtenues vont ensuite être traitées en vue de leur utilisation :

- par un traitement tertiaire comprenant des étapes de filtration, désinfection etc.
- par des traitements complémentaires modifiant les caractéristiques des boues, permettant une désodorisation etc.

### 1.2. Traitement des boues en vue de leur utilisation

Ces traitements doivent répondre à au moins l'un des deux objectifs suivants :

- réduction du volume (facilité de transport) ;
- réduction du pouvoir fermentescible (élimination des mauvaises odeurs). (Petit, 2007).

Par le respect des conditions de temps et de température ces procédés participent à la réduction des germes pathogènes, même si ce n'était pas le but initial poursuivi. On parlera de boues hygiénisées lorsque le traitement a permis de réduire à un niveau non détectable les agents pathogènes présents dans la boue. Les exigences sanitaires d'une boue hygiénisée sont établies comme suit :

- Salmonelles : < 8NPP/10gMS
- Entérovirus : < 3NPPUC/10gMS
- Œufs d'helminthes pathogènes viables : < 3/10gMS.

### **1.2.1. Réduction du volume**

Les stations d'épuration disposent de plusieurs techniques permettant une réduction du volume des boues par:

- Un épaissement, après lequel la boue demeure fluide,
- Une déshydratation, obtenue par séchage naturel, drainage, ou par séparation mécanique,
- Séchage thermique ou incinération, réalisés après une étape de déshydratation. (Guy, 2003 ; Koller, 2004).

#### **1.2.1.1. Epaissement des boues**

Premier stade de traitement des boues collectées, leur épaissement consiste à augmenter leur concentration, tout en évitant d'atteindre une déshydratation incompatible avec leur pompage. Ce stade va permettre une augmentation du rendement et de la fiabilité de l'ensemble de la chaîne de traitement des eaux. Les boues ainsi épaissies pourront être extraites très liquides des décanteurs, ce qui permet de ne pas détériorer la qualité de l'eau issue de cette décantation. Cette étape permet également une amélioration de la production des dispositifs de déshydratation, et une réduction de l'importance des ouvrages de conditionnement thermique.

Par contre, l'épaissement induit un investissement supplémentaire souvent compensé sur la suite de la chaîne et il induit aussi d'éventuelles nuisances olfactives dans le cas de boues organiques. Ce dernier problème est résolu par la couverture des ouvrages et la désodorisation de l'air vicié des enceintes. Le chaulage des boues permet aussi un contrôle du phénomène. On distingue différentes techniques d'épaissement : par décantation, flottation, centrifugation ou drainage. (Guy, 2003 ; Koller, 2004).

##### **a). Epaissement par décantation**

Les boues sont introduites dans une cuve (appelée épaisseur), où le temps de séjour est élevé. Cette étape provoque le tassement des boues : leur évacuation se fait par le fond tandis que le liquide surnageant est évacué en surface.

Ce procédé présente cependant des performances très limitées sur les boues fortement organiques très fermentescibles et sur les boues colloïdales. Dans ces cas-là, on a recours à l'épaissement par flottation. (Kormanik, 1977).

**b). Epaissement par flottation**

Par opposition à la décantation, la flottation est un procédé de séparation solide-liquide ou liquide-liquide qui s'applique à des particules dont la masse volumique est inférieure à celle du liquide qui les contient. Elle est provoquée en utilisant des bulles d'air très fines ou "microbulles" de 40 à 70 microns de diamètre, semblables à celles présentes dans "l'eau blanche" débitée par le robinet d'un réseau d'eau sous forte pression.(Petit , 2007).

**c). Epaissement par centrifugation**

Ce traitement donne des boues d'une siccité de 4 % à 8 %. La siccité mesure le degré de dessiccation d'une boue .(Petit, 2007).

**d). Epaissement par drainage**

Il s'agit d'épandre une boue préalablement floculée sur un champ horizontal de grilles fines, raclé en permanence par des lames en caoutchouc. Ainsi, la concentration de la boue augmente progressivement en avançant sur le champ des grilles. On obtient une siccité de 2,5 à 9 %.(Petit, 2007).

**1.2.1.2. Déshydratation des boues**

Ce traitement permet de faciliter le transport ou l'utilisation ultérieure des boues. Il est précédé d'un conditionnement préalable qui facilitera la déshydratation.(Gamrasni, 1981).

Cette déshydratation peut être obtenue par différents procédés :

- Filtration : c'est la méthode la plus courante, elle est réalisée soit par drainage sur lit de sable, soit par filtration sous vide ou sous forte ou moyenne pression. .

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

- Filtration sous pression en chambres étanches : elle permet d'obtenir une siccité des gâteaux généralement supérieure à 30 %, par application de pressions très élevées.

- Filtres à bandes presseuses, très répandus, qui fonctionnent en trois temps: floculation avec des polyélectrolytes, drainage de la boue floculée (qui provoque un épaissement rapide de la boue), et pressage de la boue drainée. Ce traitement permet d'obtenir des résultats satisfaisants sur la grande majorité des boues organiques

- Sur lits de séchage : lits de sable drainés (méthode en régression actuellement).

- Par centrifugation : cette technique permet une bonne séparation des solides sur des boues très difficiles (boues très organiques), avec un travail en continu et une surveillance réduite des machines.(Jamonet, 1987 ; Ecknefder, 1982).

### **1.2.1.3. Séchage thermique des boues**

Le principe du séchage thermique est basé sur l'évaporation de l'eau interstitielle contenue dans les boues, et donc sur son élimination. Il conduit à des boues semi déshydratées (10 à 30 % d'eau résiduelle), ou déshydratées (5 à 10 % d'eau résiduelle (Jarde, 2002).

### **1.2.2. Réduction du pouvoir fermentescible**

Stabilisation aérobie, digestion anaérobie et compostage sont des traitements biologiques s'appuyant sur l'activité d'une microflore saprophyte qui dégrade la matière organique des boues. On distingue deux types de microflore :

- Une microflore aérobie (se développant en présence d'oxygène), que l'on rencontre dans la stabilisation aérobie et le compostage.

- Une microflore anaérobie (capable de se développer sans oxygène), dans le cas de la digestion. Ces traitements assurent la stabilisation de la boue, c'est-à-dire la réduction de son pouvoir fermentescible, tout en dégradant la matière organique de manière partielle et contrôlée. (Guy, 2003 ; Koller, 2004).

#### **a). La stabilisation aérobie**

Elle est mise en œuvre dans des ouvrages à l'air libre avec un système d'injection d'air ou d'oxygène dans les boues liquides. La microflore y dégrade la matière organique et produit de la chaleur sous trois types de températures : thermophile (53 à 55°C), mésophile (35°C) et psychrophile (20°C). De ces trois traitements, seule la stabilisation psychrophile est parfois utilisée. (Petit, 2007).

#### **b).La digestion anaérobie**

Aussi appelée fermentation méthanique, elle produit du biogaz : essentiellement du méthane (65 à 70 %), et du dioxyde de carbone (25 à 30 %). Le méthane pourra être utilisé pour sa valeur énergétique.

La digestion mésophile (qui a lieu à 35°C) est la plus couramment réalisée en France. Il existe également des digestions thermophiles (53 à 55°C), et psychrophiles (10 à 20°C) rarement

utilisées car plus coûteuses et moins stables. Ces trois types de digestion s'appuient sur les mêmes phénomènes biochimiques, mais les microflores varient avec les températures de fonctionnement. (Koller, 2004).

### **c). La stabilisation chimique**

C'est une méthode peu onéreuse qui permet une diminution du pouvoir fermentescible de la boue, au moins temporairement, par l'adjonction d'agents chimiques à des doses bactériostatiques. Cette technique entraîne une inactivation importante des germes pathogènes sans modifier la quantité de matières organiques biodégradables contenue dans la boue.

Le chaulage est une intervention courante, du fait de son faible coût, de son alcalinité et de son effet favorable à un renforcement de la structure physique de la boue. La chaux vive réagit avec l'eau de la boue, entraînant une augmentation de température, et une augmentation de la siccité (par consommation d'eau dans la réaction et par évaporation due à la chaleur de la réaction). Avec les boues liquides, on utilise de la chaux éteinte, et les doses de  $\text{Ca(OH)}_2$  incorporées varient de 10 % à 30 % par rapport à la matière sèche de la boue. La stabilisation est de courte durée, et seule une nouvelle application de chaux pourra empêcher une reprise de la fermentation.

Par contre, sur les boues déshydratées, on utilisera de la chaux vive à la dose de 30 à 40 % par rapport à la teneur en matière sèche du gâteau. La stabilisation y est plus durable et un stockage sur plusieurs mois est possible.

Ce dernier traitement peut avoir des conséquences lors d'épandage agricole. Sans importance sur des sols acides, il rendra la valorisation agricole des boues plus difficile sur d'autres terrains : évolution plus lente des matières organiques dans le sol, complexation des éléments fertilisants qui deviennent plus difficilement disponibles et perte d'azote due au chaulage. (Gamrasni, 1981 ; Koller, 2004 ; Petit, 2007).

### **d). Le compostage**

C'est un procédé thermophile, biologique, qui induit la décomposition de matériaux organiques putrescibles en une matière relativement stable qui ressemble à de l'humus.

Ce procédé entraîne une diminution de poids, de volume et d'humidité de la boue, et il détruit les germes pathogènes grâce à la forte température atteinte. Le compostage peut être anaérobie ou aérobie, mais le compostage aérobie présente plusieurs avantages :

- Obtention d'une température plus élevée (action hygiénisante),

- Génération de moins d'odeur,
- Stabilisation organique plus rapide. Les facteurs limitant le compostage aérobie sont l'oxygène, mais aussi l'humidité, la disponibilité des nutriments et le pH.

La boue est mélangée à un support structurant carboné (sciures, pailles, écorces..) puis traitée selon l'un des procédés suivants :

- Compostage en réacteur (enceinte fermée), avec aération forcée,
- Compostage en andains, avec aération par retournements périodiques,
- Compostage en tas, avec aération forcée par ventilation positive (refoulement), ou négative (aspiration).

Ce traitement facilite l'évacuation des boues résiduaire organiques car il conduit à la fabrication d'un produit sec qui ne nécessite pas une phase préalable de déshydratation poussée. Il permet l'obtention d'un amendement organique humidifié, hygiénisé (c'est-à-dire ayant réduit les agents pathogènes présents dans la boue à un niveau non détectable) et commercialisable pour le maraîchage, les pépinières, la restructuration de sols érodés. (Petit, 2007).

D'après (Dégremont, 1989), (Guiblin, 1999) et(Ouali, 2001), Les boues sont classées, selon leurs caractéristiques en 6 catégories.

**Tableau 2:** Classification des boues (Guiblin, 1999).

Classes	Provenance
Organiques hydrophiles : Très organiques, elles contiennent 40 à 90 % de matières volatiles.	Boues issues du : -des usines d'épuration ; -du traitement des eaux résiduaire des industries agricoles et alimentaires - du traitement des eaux résiduaire des industries textiles
Huileuses hydrophiles : contiennent des huiles minérales ou des hydrocarbures	Boues issues : -du traitement des eaux résiduaire de raffineries - du traitement des eaux résiduaire des

	ateliers mécaniques ;  - du traitement des eaux résiduaires des laminages et de la métallurgie
Huileuses hydrophobes : Elles contiennent des oxydes mélangés à des huiles minérales. Minérales hydrophiles : Elles contiennent une forte proportion d'hydroxydes métalliques.	Boues issues du traitement des eaux résiduaires de laminoir. Boues hydroxydes issues :  -du traitement des eaux résiduaires du traitement de surface des métaux ;  -du traitement des eaux résiduaires du traitement de surface des métaux ;  -du traitement des eaux résiduaires de fonderie
Minérales hydrophobes : Elles contiennent une forte proportion de carbonates  Fibreuses : Elles contiennent de 20 à 80% de fibres	Boues de décarbonatation issues du traitement des eaux de rivière ou de forage.  Boues de sidérurgie.  Boues de lavage des gaz et fumées Boues issues du traitement des eaux résiduaires de papeterie ou cartonnerie

## 2. Composition d'une boue

De par sa nature et son origine, de la période de l'année et du type de traitement et du conditionnement pratiqué dans la station d'épuration, la boue pourra avoir des variations dans sa composition. Aussi, pour caractériser une boue, on tiendra compte des éléments suivants :

- La concentration en matière sèche (MS) aussi appelée siccité ;
- La teneur en matière organique et en éléments fertilisants ;

- La teneur en micropolluants minéraux, organiques et biologiques (Petit, 2007).

### 2.1. Siccité

Selon sa fraîcheur et le traitement qu'elle aura subi (décantée, épaissie, déshydratée), la boue aura une siccité croissante marquant les étapes de concentration en matière organique, obtenues lors du passage en station d'épuration.

Ainsi les boues activées lorsqu'elles sont fraîches ont une concentration en matière sèche de 3 à 10g/l. Elles passent ensuite à une concentration en matière sèche de 20 à 30 g/l lorsqu'elles sont épaissies ou digérées par voie anaérobie. La différence est plus flagrante dans le cas des boues primaires urbaines : elles passent d'une concentration en matière sèche de 25 à 50g/l lorsqu'elles sont simplement épaissies à une concentration en matière sèche de 100 à 130g/l lorsqu'elles sont digérées par voie anaérobie.(Kormanik, 1972 ; Petit, 2007).

**Tableau 3** : Siccité moyenne des boues épaissies

TYPE DE BOUE	Concentration en MS (en g/l)
Boues primaires urbaines Epaissies	25 à 50
Boues secondaires (boues activées)	3 à 10
Fraîches	20 à 30
Epaissies	20 à 30
Digérées aérobies	
Mélange de boues primaires et de boues secondaires (boues activées (	40 à 60
Fraîches	50 à 100
Epaissies	60 à 80
Digérées anaérobies à faible charge	30 à 60
Digérées anaérobies à haute charge	

Source : Rapports ADEME 1994 et 1995

## **2.2. Matière organique et éléments fertilisants**

### **2.2.1. Matière organique**

La matière organique des boues est constituée de particules éliminées dans les boues primaires et de la biomasse bactérienne issue des traitements biologiques. On y trouvera principalement des protides, des lipides et des glucides. Cette matière organique représente : 50 % de la Matière Sèche (MS), en boue primaire, 50 à 80 % de la MS, en boue secondaire. Et 35 à 60 % de la MS, en boue tertiaire. (ADEME, 2001 ; Jarde et al., 2003).

### **2.2.2. Eléments fertilisants**

Les boues contiennent beaucoup d'azote, élément qui est la plupart du temps déficient et limitatif dans les sols de forêts (Vézina et Roberge, 1981; Patrick et Smith, 1975). Elles contiennent aussi beaucoup de phosphore et un peu de potassium. Parfois, ces trois éléments représentent jusqu'à 10 % du contenu sol et des boues (Sabey et Hart, 1975). L'épandage de boues de station d'épuration va apporter ces éléments qui seront consommés par les plantes.

#### **➤ Teneur en Azote**

L'Azote est un élément auquel le rendement de la production végétale est le plus sensible tant par excès que par défaut, ce qui fait qu'il est l'un des éléments qui permet de valoriser le plus de boue (Debba, 1998). L'Azote se trouve dans des boues sous différentes formes plus ou moins rapidement assimilables par la plante. L'Azote de la matière en suspension est essentiellement organique, celui contenu dans la phase liquide est souvent sous forme minéral représenté par l'Ammonium (10% de l'Azote total) ou nitrate (Glema, 1980 ; Vademecum, 1990).

Selon Glema (1980), en moyenne une tonne de matière sèche contient de 40 à 60 Kg d'Azote dont la moitié peut être minéralisée la première année et donc utilisée par les plantes le reste diminuée de la quantité d'Azote volatilisée minéralise les années suivantes.

Les doses d'apport seront définies en tenant compte de l'indice d'efficacité de la boue, c'est-à-dire de son aptitude à libérer l'Azote de la première année. Le tableau 02 détermine l'efficacité des différentes boues comparées à celle d'un engrais azoté.

**Tableau 4** : Efficacité comparée boues/engrais (Vademecum, 1990).

Produits	Indice
Ammonitrate	100
Boue du type laiterie, liquide	60 à 90
Boues urbaines liquides stabilisées ou digérées	40 à 50
lisier	40 à 50
Boues urbaines solides stabilisées ou digérées	20 à 25
Fumier de ferme	20 à 25
Compost urbain	5 à 10

**Remarque** : les boues mal digérées dans la station d'épuration, c'est-à-dire qui n'ont pas été suffisamment minéralisés, dont le rapport C/N est supérieur à 20, peuvent provoquer des blocages d'Azote minéral et avoir donc un effet dépressif sur les plantes (Glema, 1980).

➤ **Teneur en Phosphore (P)**

Le Phosphore des boues représente 3 à 8% de matière sèche. Il se trouve pour l'essentiel dans la phase solide des boues sous forme minérale et peut donc être assimilé rapidement par les plantes. Le taux d'assimilabilité est donc de l'ordre de 60 à 80%.

Le Phosphore qui n'est pas utilisé immédiatement le sera ultérieurement, car il est bien fixé par le sol. (Glema, 1980 ; Vademecum, 1990).

➤ **Teneur en Potassium (K)**

En règle générale, les boues sont pauvres en Potassium (en valeurs moyennes de 0.5% des matières sèches) qui n'est pas retenu lors du traitement des eaux résiduaires et même l'épandage de fortes doses de boues ne dispense pas l'agriculteur d'apporter en engrais minéral potassique.

**Tableau 5:** Caractéristiques agronomiques des boues résiduaires urbaines (primaires + activées en % sur les matières sèches) (Boutin, 1982).

Eléments	Azote	phosphore	potassium	Matière organique
<b>Boues fraîches</b>	3.5-2.5	2-3	0.5-1	60-80
<b>Boues digérées</b>	2-2.5	1-2	0.2-0.5	40-65

#### ➤ Teneur en Calcium et Magnésium (Ca, Mg)

Les boues contiennent du Calcium en quantité appréciables : 0.2 à 1.5% de CaO de la matière sèche dans les boues liquides et de 2 à 20% de CaO de la matière sèche dans les boues solides (Debba, 1998 ; Vademecum, 1990).

Les boues contiennent aussi du Magnésium mais à un degré moindre de 0.4 à 1% de la matière sèche.

#### ➤ Teneur en Sodium (Na)

Selon Guicherd (1982) in Debba (1998), le Sodium est présent dans les boues à des quantités faibles (0.4% de la matière sèche en moyenne). cependant, les teneurs apportées en cet élément ne seraient pas de nature à entraîner des effets préjudiciables au niveau de la structure des sols fragiles en cas d'épandage raisonnés (Morel et al., 1977 in Debba, 1998).

#### 2.2.2.1. Comparaison des boues résiduaires avec les fertilisants commerciaux

Parmi les fertilisants chimiques utilisés en foresterie, on trouve le nitrate d'ammonium, l'urée, le superphosphate et le chlorure de potassium (Armson et Sadreika, 1974). Ces fertilisants contiennent trois macroéléments essentiels à la croissance des arbres, soit l'azote, le phosphore et le potassium (Weier et al., 1974). On retrouve aussi à l'état de traces plusieurs microéléments. Cependant, ceux-là sont déjà en quantité suffisante dans le sol de façon naturelle (Patrick et Smith, 1975). Les fertilisants chimiques, comme leur nom l'indique, ne contiennent pas de matière organique. Ils libèrent donc directement les ions nécessaires à la croissance des arbres (exception faite de l'urée qui a une action libératrice plus lente). Les boues résiduaires sont un fertilisant organique. Elles libèrent leurs éléments nutritifs (N, P et K) lentement (Berry et Marx,

1980; Ga gnon, 1972), malgré qu'une certaine partie de leur composition consiste en ions rapidement assimilables par la végétation (Chaussod et al., 1981). Même si les éléments chimiques ne se trouvent pas aussi concentrés dans les boues qu'ils sont dans les fertilisants chimiques, les boues résiduairees sont un engrais organique valable (St-Yves, 1984; Bledsoe et Zasoski, 1981).

Une revue de la littérature permet de constater que les boues sont riches en éléments nutritifs pour la végétation (Riekerk, 1982; Dunigan et Dick, 1980; E.P.A., 1979), mais que leurs concentrations varient selon leur origine. Leur valeur comme amendement du sol est une combinaison de leur teneur en éléments nutritifs et de leurs effets sur les propriétés du sol (Atalay et Blanchar, 1984).

### **2.3. Micropolluants minéraux, organiques et biologiques**

Les concentrations parfois importantes en micropolluants organiques ou minéraux sont accentuées par le traitement imposé aux eaux usées : on estime classiquement que 90 % des éléments présents à l'entrée de la station d'épuration se retrouvent dans les boues, après une réduction du volume qui dépasse généralement un facteur de 30 par rapport au volume de départ. (Petit, 2007).

#### **2.3.1. Eléments traces métalliques**

Sous ce terme sont regroupés les métaux vrais et les métalloïdes. Les métalloïdes se caractérisent lorsqu'ils sont à l'état d'ions par une grande affinité pour l'élément  $H^+$  de l'eau avec lequel ils donnent naissance à un acide (ex : HCL). Les métaux vrais se caractérisent, lorsqu'ils sont à l'état d'ions, par une grande affinité pour le groupement  $OH^-$  de l'eau avec lequel ils donnent naissance à une base (ex : NaOH). On parle de micropolluants métalliques (ou éléments traces métalliques) car la plupart des éléments minéraux retrouvés dans les boues de stations d'épuration urbaines proviennent du groupe des métaux. Les Eléments Traces Métalliques (ETM) proviennent des rejets domestiques, des eaux de pluie et de ruissellement et des eaux usées industrielles et artisanales. Les ETM peuvent être classés en 2 catégories :

-les ETM essentiels à la biologie cellulaire et à l'équilibre physiologique de tout être vivant : ce sont l'arsenic, le chrome, le cuivre, le molybdène, le nickel, le sélénium et le zinc. Un apport nutritionnel est conseillé, mais sans dépasser les doses de limite de sécurité pour le zinc et le sélénium. En effet, ces ETM sont toxiques à doses élevées.

- Les ETM dont la présence est indésirable pour l'organisme des êtres vivants de par leur faible seuil de toxicité et de par leur absence d'intérêt nutritionnel. Il s'agit du plomb, du cadmium et du mercure. Ces ETM que l'on appellera « contaminants » vont s'accumuler tout au long de la chaîne alimentaire par transfert du sol et de l'eau vers les plantes et les animaux, ainsi que par les retombées atmosphériques (Petit, 2007).

### **2.3.2 Micropolluants organiques**

Aussi, dans les boues, une multitude de polluants organiques (HAP, Phthalates, PCB, etc.) peut se trouver en concentrations en général de l'ordre de  $\mu\text{g}/\text{kg}$  MS (Lega et al., 1997; Pérez et al., 2001). La nature et la concentration des eaux usées en polluants organiques et inorganiques sont très dépendantes des activités raccordées au réseau. L'essentiel des contaminations chimiques vient des rejets industriels et dans une moindre mesure des rejets domestiques (utilisation de solvants, déchets de bricolage etc.). Du fait de la décantation lors du traitement, ces contaminants chimiques se retrouvent dans les boues à de très grandes concentrations par rapport aux eaux usées (Klöpffer, 1996).

### **2.3.3. Micropolluants biologiques**

Les boues contiennent également des milliards de microorganismes vivants qui jouent un rôle essentiel dans les processus d'épuration. Seul une infime partie est pathogène (virus, bactéries, protozoaires, champignons, helminthes, etc.) et provient en majorité des excréments humains ou animaux (Sahlström et al., 2004). La concentration d'une eau usée en germes pathogènes dépend du secteur d'activité d'origine: les eaux provenant d'abattoirs ou de toute industrie traitant de produits d'animaux sont très largement contaminées (Ecrin, 2000). Ainsi, par mesure de précaution et afin d'éviter de propager la maladie de la vache folle, il est interdit d'utiliser les boues d'épuration provenant des eaux usées des abattoirs ou des équarrissages pour fabriquer de la fumure ou du compost .D'une façon générale, les boues doivent subir un prétraitement avant leur utilisation en agriculture (Garrec et al., 2003).

**Tableau 6** : Propriétés et rôle des microorganismes du sol dans la biodégradation de la matière organique)

Groupe	Propriétés	Rôle dans le sol
Bactéries	$10^7$ à $10^9$ germe /g de sol -pH optimal 6 à 8 Espèces adaptées à de $t^{\circ}$ 0 à $65^{\circ}$	Minéralisation et réorganisation de la matière organique Importance agronomique
Actinomycètes	$10^5$ à $10^8$ germe /g de sol PH optimal 7 à 8,5 T° optimale 28 à $37^{\circ}$	Rôle non négligeable dans la minéralisation et la réorganisation de la matière organique Proportion importante qui inhibe d'autres microorganismes
Champignons	$10^4$ à $10^6$ germe /g de sol pH optimal 4 à 8 T optimale 20 à $23^{\circ}$	participent activement à la dégradation de la matière organique puissants minéralisateurs réorganisation de la matière organique
Algues	$10^2$ à $10^4$ germe /g de sol pH optimal 6,5 à 8 T optimale de $0^{\circ}$ à $20^{\circ}$	constituent un apport net de matière organique au sol

Source: Pommel, 1979

### 3. Propriétés physiques des boues

Les boues d'origine primaires ou secondaires se présentent sous forme d'un liquide contenant des particules homogènes en suspension. Leur volume représente 0.05 à 0.5 % du volume d'eau traitée pour les boues fraîches alors qu'il est légèrement inférieur pour les boues activées et autres procédés biologiques. La floculation de l'eau augmente le volume des boues surtout leur poids de 10 % environ. La couleur de boues varie entre le brun et le gris et leur odeur est souvent très désagréable car ce sont des produits facilement fermentescibles et il y a un début de décomposition pour leur traitement ultérieur. On a besoin de connaître plusieurs paramètres qui définiront leur aptitude à la déshydratation et à la filtration (Jarosz, 1985).

### **3.1. La teneur en matière sèche**

Il s'agit de mesurer le poids des résidus sec après chauffage à (105°C) jusqu'au poids constant, on l'exprime généralement en pourcentage. Celui ci varie de 3 à 8 % de matière sèche (Jaroz, 1985).

### **3.2. La teneur en matières volatiles**

On mesure cette teneur par la différence entre le poids de boues sèches (105°C) et celui de cette même boue après chauffage jusqu'au poids constant à 550°C. Cette teneur varie de 60 à 85 % des matières sèches. (Djamonet, 1987).

### **3.3. La teneur en eau interstitielle**

L'eau contenue dans la boue se présente sous deux formes :

-Eau libre qui s'élimine facilement par filtration ou décantation.

- Eau liée contenue dans les molécules chimiques, les substances colloïdales et les cellules de matières organiques qui ne peut s'éliminer que par la chaleur. On mesure la proportion entre l'eau liée et l'eau libre par la perte de poids à température constante en fonction du temps. (Degrement, 1972).

### **3.4. La viscosité**

Les boues ne sont pas des liquides newtonien, on mesure leur viscosité en fonction de la contrainte de cisaillement (viscosité de BINGHAM). Cette dernière permet de définir leurs caractères thixotropiques (aptitude à se prendre en masse au repos et devenir fluide après brassage qui est important pour leur transport (A.F.E.E, 1974).

### **3.5. La charge spécifique**

Ce paramètre permet de mesurer l'aptitude à la décantation des boues. Il est exprimé en (Kg / m<sup>2</sup> /j) .C'est la quantité de la matière sèche décantée sur l'unité de surface, cette charge dépend de la teneur en matières volatiles. (A.F.E.E, 1974).

### **3.6. La résistance spécifique**

Il s'agit de mesurer l'aptitude à la filtration des boues sous une pression donnée, selon Mathian(1986), cette résistance s'exprime en m / Kg (A.F.E.E, 1974).

### **3.7. La compressibilité**

Lorsqu'on fait croître la pression au dessus d'un filtre, on obtient un écrasement du gâteau et une augmentation de la résistance à la filtration. La représentation logarithmique de la résistance spécifique en fonction de la pression donne une droite qui permet de déterminer le coefficient (S) de compressibilité. Lorsque la pression augmente et atteint des valeurs de l'ordre de 10 bars, la filtration de l'eau contenue dans les boues est pratiquement bloquée, on atteint alors la siccité limite (Degrement, 1978).

### **3.8. Les pouvoirs calorifiques :**

Les teneurs en matières organiques des boues leur donne une aptitude à la combustion non négligeable qui permet de les incinérer. (A.F.E.E, 1974).

## *Chapitre II : Devenir des boues*

---

La question du devenir des boues d'épuration, loin d'être un problème réglé, est appelée à devenir dans les prochaines années une des préoccupations majeures des collectivités, en raison de plusieurs facteurs de nature différente mais qui conjuguent leurs effets : l'amélioration des performances des STEP, une demande sociale de plus en plus exigeante et une réglementation renforcée. Le traitement des boues issues de l'épuration peut représenter jusqu'à 50% du coût total du traitement de l'eau. Pour les stabiliser et réduire leur volume, elles subissent un épaissement puis une déshydratation plus poussée (séchage, filtre presse, etc.). La production de boues d'épuration urbaine atteignait un volume important dans le monde. En Algérie, il y a 165 stations d'épuration qui produisent actuellement environ 250 000 tonnes de boues annuellement, devrait atteindre 400 000 tonnes d'ici 2020, selon les données du Ministère des Ressources en Eau (CDER, 2014). En effet, les filières d'élimination des boues vont donc connaître une profonde évolution.

Pour la destination finale des boues déshydratées, on pourra (en fonction des propriétés intrinsèques des boues, des possibilités locales d'élimination et de considérations technico-économiques) envisager l'une des trois solutions suivantes : Mise en décharge, Incinération et l'épandage (agricole et forestier). (Koller, 2004 ; Petit, 2007).

### **1. La mise en décharge contrôlée**

La mise en décharge contrôlée consiste en un enfouissement des boues (souvent mélangées avec les ordures ménagères) en tenant compte de certaines conditions : compactage des résidus, site étanche, récupération et traitement des jus de décharges (lixiviats), équipement et gestion du site (El-Fadel et Khoury, 2000 ; Allen, 2001). Les boues doivent être préalablement stabilisées et déshydratées (humidité maximale de 70 %). Cette solution a perdu progressivement de son intérêt et se retrouve actuellement interdite pour des raisons financières (procédure de fermeture) et pour des problèmes environnementaux tels que les odeurs nauséabondes, pullulation de moustiques, entraînement d'éléments fertilisants (nitrates, phosphates) et de produits toxiques par les eaux superficielles et contamination des nappes d'eaux souterraines (Looser et al., 1999; Kjeldsen et al., 2002; Marttinen et al., 2003). Les décharges ne doivent plus accepter que des déchets qui ne peuvent plus être raisonnablement valorisés ou à caractère non dépolluables ou dangereux appelés aussi déchets ultimes. La directive européenne du 26 avril 1999 impose une diminution d'au moins 65 % de la quantité de déchets organiques mis en décharge d'ici 2015. (Petit ; 2007).

## **2. L'incinération**

Elle réalise la destruction de la matière organique des déchets par combustion à haute température (+ de 500 °C) produisant des fumées et des matières minérales résiduelles nommées cendres. Dans l'objectif d'une valorisation énergétique des déchets, la chaleur produite est récupérée sous forme de vapeur ou d'électricité pour le fonctionnement du four lui même, pour le chauffage urbain ou industriel (Prevot, 2000). Les résidus de l'incinération (mâchefer) sont utilisables pour les travaux publics (Werther et Ogada, 1999). En France, 14 à 16 % des boues urbaines sont incinérées. En Europe, le pourcentage varie de 0 à 55 % selon les pays. En Algérie, un traitement par incinération n'a pas encore été effectué. Cependant, malgré l'intérêt de ce procédé pour une réduction importante des volumes de déchets, il présente des contraintes principalement liées à un investissement très coûteux. Les boues seules ne sont pas auto combustibles. Elles nécessitent des fours spéciaux et un mélange avec d'autres déchets tels les déchets ménagers. L'élimination des cendres et des mâchefers exigent une décharge contrôlée de classe 1 ou une unité d'inertage. Cette technique reste aussi néfaste du point de vue écologique et environnemental puisqu'elle contribue en plus du gaspillage de matières organiques utiles pour le sol à la diffusion de gaz très toxiques (NO, NO<sub>2</sub>, CO, SO, dioxine, etc) (Mininni et al., 2004 ; Nammari et al., 2004) qui ont fait l'objet de réglementations spécifiques. En 1995, l'incinération des déchets était à l'origine de 45 % de la dioxine produite et rejetée dans l'air en France. La directive européenne du 4 décembre 2000 est plus sévère et fixe des concentrations maximales admissibles pour certains produits toxiques dans la fumée (CE, 2000/76/EC). Depuis, les incinérateurs sont modernisés ou fermés, entraînant un coût supplémentaire d'une dizaine d'euros par tonne de déchets incinérés.

## **3. Epannage**

L'épandage implique la dispersion et la diffusion d'un élément sur une surface relativement étendue dans un but de fertilisation du sol. Ces produits peuvent être des produits chimiques comme des herbicides, ou des pesticides, ou bien des engrais chimiques, des produits naturels, comme des excréments animaux ou des boues d'épuration urbaines ou bien des effluents liquides ou des boues d'origine industrielle. (Bouriou, 2014).

### **3.1. Le mode d'épandage**

Les techniques agricoles classiques permettent avec un minimum de mise au point l'épandage des boues. S'il s'agit de boues liquides, un canon d'arrosage rotatif ou une tonne à

lisier permettent de répartir assez régulièrement la boue sur le terrain.

### **3.2. Epandage des boues d'épuration urbaine sur des terres agricoles**

L'épandage de boues de stations d'épuration en agriculture est une pratique largement répandue dans le monde. Tel qu'il est pratiqué actuellement, il s'inscrit dans la longue histoire des techniques d'épuration des eaux usées et de valorisation agricole des résidus produits. Cette histoire montre aussi la permanence des conflits, qui engendrent des décisions politiques traduites en textes, menant à la conception de techniques nouvelles comme à des règles d'usage des résidus. Les boues ont été considérées comme un « intrant agricole » jusqu'aux années 1980. Au début des années 1990, cet intrant est transformé en « risque ». Cependant, en 1997, ces boues acquièrent un nouveau statut, celui de « déchets » avec la mise en place du décret de décembre 1997 et de son arrêté de son application de janvier 1998 (Tercé, 2003). Chaque débat engagé autour des boues et leur devenir, la question sanitaire et les inquiétudes environnementales sont évoqués. Pourtant, l'épandage des boues en agriculture s'avère un moyen de recycler des éléments nutritifs en vue de fertiliser le sol. Toutefois leur emploi peut poser des problèmes de qualité des sols si les éléments indésirables (ETM, CTO et pathogènes) qu'elles contiennent ne sont pas contrôlées et maîtrisées (Juste et al., 1995).

### **3.3. Epandage en forêt**

L'alternative sylvicole aux épandages agricoles des boues de stations d'épuration a été bien explorée dans certaines situations forestières. Malgré un manque de connaissances sur une telle pratique, des chercheurs soulignent ses avantages. Ainsi, les produits forestiers ne sont généralement pas comestibles, ce qui diminue les risques de l'exposition humaine aux composantes néfastes des boues qui pourraient entrer dans la chaîne alimentaire. De plus, l'utilisation intensive de la biomasse forestière par de courtes rotations peut conduire à une baisse de fertilité des sols. Le recours à l'épandage des boues en forêt constitue non seulement une solution d'élimination mais aussi une voie à leur valorisation comme fertilisant (Roy et Couillard, 1997) permettant de restructurer ces sols dégradés par la forte exploitation.

Dans le cadre de la problématique des incendies de forêt méditerranéenne, Les boues ont été épandues pour protéger ce milieu souvent dénaturé par les incendies. Une fertilisation, obligatoire face aux exigences zootechniques et agronomiques du maintien des troupeaux sur cet espace agroforestier, par épandage de boues permet leur valorisation et l'entretien et la protection de l'environnement en créant de véritables pâturages (Bascoul, 2000).

Cependant, cette pratique peut induire des risques de contamination du milieu hydrique superficiel par ruissellement ou du milieu hydrique souterrain par lessivage car le pouvoir de rétention du sol a ses limites et nécessite une gestion très rigoureuse. D'autres parts ces épandages ne concerneraient que les parcelles exploitées intensivement pour la production de bois de biomasse (Thomas et al., 2004).

### 3.4. Règles d'épandage

Elles visent à protéger les eaux souterraines et superficielles, le voisinage, les consommateurs de produits végétaux, les animaux domestiques herbivores, les agriculteurs et leur entourage, les promeneurs et utilisateurs de parcs de loisirs et la faune sauvage. Elles sont présentées de manière synthétique dans le tableau 1.

Cette protection est assurée par l'application de règles concernant : des distances minimales à respecter vis-à-vis des zones sensibles (points d'eau, habitations etc.) et des interdictions d'épandages dans des zones à risques (terrain à forte pente, sols gelés ne permettant pas une bonne incorporation des boues etc.).

Cependant, des problèmes et des obstacles économiques ou techniques à l'application des règles d'épandage surgissent. Ceux-ci comprennent les possibilités de stockage et de transport, l'insuffisance ou l'inadéquation des techniques de stabilisation et de déshydratation. D'autre part, du point de vue hygiénisation, la capacité d'épuration des sols est limitée dans certaines conditions. Ainsi, l'utilisation des boues sans hygiénisation préalable constitue en quelque sorte un retour à la pratique ancestrale de l'épandage des eaux usées brutes (Bengtsson et al., 2004).

**Tableau 1** : Principales règles d'épandage des boues. (Smith, 1976; Petit, 2007).

Conditions	Règles d'épandage
Zones d'épandage interdites	Dans les zones d'infiltration avec des ressources en eau potable <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sur terres autres que régulièrement exploitées (terres travaillées, prairies, forêt, revégétalisation)</li> <li>• Sur terrain à forte pente (avec risque de ruissellement)</li> </ul>
Distances à respecter	Vis-à-vis des eaux superficielles : <ul style="list-style-type: none"> <li>• &gt; 5 m si boues stabilisées, pente &lt; 7% et enfouissement immédiat</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• &gt; 35 m des berges des cours et des plans d'eau</li> <li>• &gt; 100 m si pente &gt; 7% et boues solides et stabilisées</li> <li>• &gt; 200 m si pente &gt; 7% et boues non stabilisées ou non solides</li> <li>• &gt; 200 m si lieu de baignade</li> </ul> <p>Vis-à-vis des eaux souterraines : si terrain affecté par des phénomènes karstiques</p> <p>Vis-à-vis des eaux destinées à la consommation humaine (points de prélèvement d'eau, aqueducs, installations souterraines ou semi enterrées de stockage des eaux ou d'irrigation des cultures maraîchères) :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• &gt; 35 m si pente &lt; 7%</li> <li>• &gt; 100 m si pente &gt; 7%</li> </ul> <p>Vis-à-vis de sites aquacoles (piscicultures, zones conchylicoles) &gt; 500 m (sauf s'il s'agit de boues hygiénisées)</p> <p>Vis-à-vis des habitations et espaces recevant des visiteurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• pas de distance si boues hygiénisées ou boues stabilisées et enfouies dans le sol immédiatement après épandage</li> <li>• &gt; 100 m dans les autrescas</li> </ul>
<p>Conditions météorologiques</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Epdandage interdit sur sol gelé ou enneigé (sauf si boues solides)</li> <li>• Epdandage interdit pendant les périodes de forte pluviosité</li> </ul>
<p>Modalitésd'épdandage</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Aéroaspersion interdite si production de brouillards fins</li> <li>• Enfouissement obligatoire sous 48h si boues non stabilisées sur sol nu</li> <li>• Quantité maximale pouvant être épandue : 3kg MS/m2</li> </ul>

	en 10 ans (l'épandage doit en outre répondre aux besoins des cultures, et respecter les limites en nitrates) • Epandage interdit si pH du sol < 6 (sauf si pH >5 et boues chaulées(
Délais d'attente	<p>Lors d'exploitation de parcelle (pâturage ou récolte) :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 6 semaines en général</li> <li>• 3 semaines si boues hygiénisées</li> </ul> <p>Interdiction d'épandre Lors de récolte de produits consommés crus en contact avec le sol :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 18 mois si boues non hygiénisées</li> <li>• 10 mois si boues hygiénisées</li> <li>• Pendant la période de végétation des cultures maraîchères et fruitières (sauf s'il s'agit d'arbres fruitiers).</li> </ul>

#### 4. Voies d'avenir pour réduire le volume des boues

Ces procédés dits «d'avenir» sont généralement de types thermochimiques et regroupent notamment la pyrolyse, la gazéification, l'oxydation par voie humide et la combustion (Petit, 2007).

##### 4.1. La pyrolyse (thermolyse)

Ce procédé repose sur la décomposition de la matière organique grâce à la chaleur (~ 500 à 900°C) en absence d'oxygène (Rumphorst et Ringel, 1994). Contrairement à l'incinération et à la gazéification, il n'y a pas de réaction d'oxydation (combustion) de la matière, mais seulement une décomposition de celle-ci, ce qui permet de réduire notablement le volume de fumées engendrées et de produire moins d'éléments volatils nuisibles. Cette décomposition thermique génère deux sous-produits dans des proportions qui varient avec les conditions opératoires du procédé et la composition du déchet à traiter :

- un résidu carboné, appelé «char», qui contient la matière minérale du déchet traité ainsi qu'une partie du carbone, appelé carbone fixe. Dans ce résidu vont se concentrer les métaux lourds (sauf le mercure et le cadmium). Ce résidu sera ensuite déposé en décharge ou utilisé comme remblai (Caballero et al., 1997).

- un gaz de thermolyse, constitué d'une fraction condensable (vapeur d'eau et goudron volatil) et d'une fraction non condensable composée principalement de CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub>. Ce

gaz est combustible et permet de valoriser l'énergie contenue dans les boues .(Petit, 2007).

#### **4.2. La gazéification**

La gazéification se différencie de la pyrolyse par le fait que le carbone est totalement converti en gaz, à des températures pouvant aller de 800 à 2000°C sans production de phases liquides ou solides, et seulement la genèse de cendres comme sous-produits. La gazéification est un procédé endothermique et nécessite donc un apport de chaleur important. Celui-ci est en général apporté par combustion partielle du matériau initial avec de l'air ou de l'oxygène. (Petit, 2007).

#### **4.3. L'oxydation par voie humide**

Ce procédé est apparu dès les années 60 aux USA, et est développé en France par la société Degremont et Granit Technologies ainsi que par OTV. Il s'agit, comme pour l'incinération, d'une oxydation de la matière organique, mais réalisée en milieu liquide, avec de l'air ou de l'oxygène pur. Un résidu minéral est obtenu (30 à 50 % de la matière sèche entrante) ainsi que du CO<sub>2</sub> et un effluent qui est traité ultérieurement en station d'épuration. Le résidu solide quant à lui est éliminé en décharge. (Petit, 2007).

Malgré de nouvelles avancées dans le domaine du recyclage des boues (gazéification, oxydation par voie humide, pyrolyse), l'épandage agricole reste la voie privilégiée. Les apports de boues vont en effet permettre d'enrichir le sol en azote, en carbone organique, mais également d'améliorer certaines propriétés des sols telles que la porosité ou la structure (Sommers, 1977; Piccolo et al., 1992; Navas et al., 1998).

***Chapitre III : Effet des boues sur le sol,  
plantes : toxicité potentielle***

---

## **1. Effet sur le sol**

### **1.1. Effet sur les propriétés physiques**

Le mélange du compost de boue avec le sol, riche en matière organique améliore la structure du sol, augmente sa porosité totale et diminue sa densité apparente (Pagliali et al., 1981). En effet, il se forme de nouveaux agrégats stables par adhésion des particules du sol aux molécules organiques (notamment les acides humiques) (Pagliali et Antisari, 1993). Ainsi, le développement des racines des plantes est amélioré (aération et espace), la vie du sol optimisée (microorganismes, macro et microfaune du sol) et l'érosion par ruissellement est limitée par une meilleure pénétration de l'eau dans le sol. D'autre part, la capacité de rétention en eau du sol augmente, ce qui présente un intérêt certain en région méditerranéenne où le stress hydrique est le premier facteur limitant de la croissance des végétaux.

### **1.2. Effet sur la matière organique**

Les composts à base de boues contiennent de 20 à 30 % d'humus, dont les acides humiques se différencient de ceux du sol par leur stabilité, leur taille et leur acidité plus faibles, et leur teneur moins importante en composés phénoliques. Les apports de boues d'épuration vont permettre d'accroître les sources en matière organiques dans le sol et donc enrichir ce dernier en carbone organique. (Garcia et al. 1991).

### **1.3. Effet sur la vie du sol**

L'activité enzymatique est considérée comme un indicateur de la fertilité des sols. Les enzymes, synthétisées par les micro-organismes et les racines des plantes, catalysent d'importantes réactions jouant un rôle clé dans le processus de minéralisation de la matière organique (Reddy et al., 1987; Singh et al., 2008). L'apport des boues augmente la densité et l'activité microbienne (i.e. bactéries et champignons) (Nèble et al., 2007), la respiration (Carbonell et al., 2009) et l'activité enzymatique du sol (Banerjee et al., 1997). Toutefois, cette activité est réduite ou même inhibée dans des sols ayant reçu des boues riches en ETM (Fließbach et al., 1994, Singh et al., 2008)..

### **1.4. Effet sur les éléments fertilisants**

Dans le cas d'un épandage de boues compostées, la minéralisation de l'azote apporté est très lente et proche de celle d'un sol sans amendement (Epstein et al. 1978). Moins de 20 % de l'azote apporté par un compost de boues est minéralisé, et donc disponible, la première

année après l'épandage. Souvent, les valeurs trouvées sont même inférieures à 20 % (de l'ordre de 10 %). Les boues sont des composés riches en sels. On trouve dans les composts de boues des teneurs moyennes en CaO de 4 % de MS, avec une forte variabilité (ajout de chaux ou pas). En ce qui concerne la potasse K<sub>2</sub>O, les quantités moyennes dans les composts de boues sont de l'ordre de 0,5 % de MS.

### **1.5. Effet sur les éléments trace métalliques**

Les boues de stations d'épuration contiennent des proportions variables d'éléments trace métalliques en fonction de la taille des stations d'épuration dont elles sont issues (nombre d'équivalents habitants) et de la nature plus ou moins industrielle des activités urbaines de la zone desservie. Préalablement à l'amendement, les sols peuvent contenir des ETM en plus ou moins grande quantité selon d'une part la nature de la roche mère, et d'autre part l'intensité des pollutions anthropiques diffuses auxquelles ils sont soumis. Tout cela en relation avec leur capacité intrinsèque à retenir les éléments métalliques (teneur en argiles, CEC). La mobilité d'un élément donné est en relation avec sa spéciation, c'est à dire sa distribution entre les différentes formes ou espèces chimiques sous lesquelles il peut exister dans le milieu. Les réactions d'hydrolyse et de complexation dissoute augmentent la solubilité des métaux et donc leur mobilité, alors que les réactions de précipitation, d'adsorption et d'absorption par les êtres vivants (bioaccumulation) diminuent leur solubilité et leur transport. Certains paramètres du système biogéochimique sol déplacent l'équilibre de ces réactions chimiques et contrôlent donc le comportement des ETM dans le sol. Le facteur principal est le pH du sol, dont la diminution provoque la mobilisation des métaux par échange protonique, la solubilisation de sels insolubles (précipités), et la destruction de la phase de rétention des cations métalliques (diminution de la CEC) (ADEME, 1995).

### **2. Effet sur le végétal.**

Les effets d'un amendement organique de boue sur les plantes sont bien documentés, dans des contextes de sylviculture, d'horticulture ou agricoles. L'application de compost a un effet bénéfique sur la nutrition, la croissance et le rendement des végétaux en général, pour des doses d'apport raisonnables et des composts peu contaminés par des substances toxiques telles les métaux traces (Gouin et Walker 1977 ; Brockway 1983 ; Planquart et al., 1999).

### 3. Toxicité potentielle

Malgré que les boues résiduelles puissent avantageusement servir comme fertilisant, elles ne sont pas exemptes de contaminants. Ainsi, on s'est interrogé sur les effets négatifs de la présence de métaux lourds, car ces substances toxiques peuvent avoir des effets tragiques (Benjamin et al., 1982).

#### 3.1. Métaux lourds

La présence des métaux lourds dans les boues est inquiétante et de nombreux chercheurs se sont penchés sur la question. Parmi les métaux lourds, certains sont des microéléments essentiels à la croissance des plantes et leur présence dans les boues est bénéfique (Schneider et al., 1981; E.P.A., 1977). Ce sont le zinc, le cuivre, le bore, le fer, le molybdène et le manganèse (Weier et al., 1974). Le tableau ci-dessous montre les origines probables des éléments traces contenue dans certaines boues.

**Tableau 1:** Origine probable des éléments traces contenue dans certaines boues

Cuivre	Canalisation d'eau Fabrication de fils électrique ; radiateur bain marie appareil de cuisson
Plomb	Canalisation d'eau Fabrication bacs de batterie, peinture, additifs
Zinc	Produits pharmaceutiques ; cosmétiques ; conduits de l'eau lavage de toits (eau de pluie ; réseau unitaire)
Bore	Détergents ; lessivage ; industrie du verre, ciment, faïences, porcelaine et émaux lubrifiants
Mercure	Produits pharmaceutiques, production et utilisation anti fongique, fabrication d'appareils électriques, production électrolyte du cl et NaOH Peintures fabrication de pâtes à papier

Cadmium	Traitements de surface des métaux et stabilisation des déchets matières plastiques, fabrication d'accumulateurs, fabrication de caoutchouc
Nickel	Fabrication d'acier et alliage, hydrogénation des huiles et substances organiques, fabrication de peinture laquée, produits cosmétiques.
Chrome	Tannerie; fabrication d'alliage spéciaux; industrie de traitement de surface.

Source : Pommel (1979)

Cependant, ils ne doivent pas dépasser certaines concentrations, car alors ils deviennent toxiques (St-Yves, 1984) et risquent de diminuer les rendements (Atalay et Blanchar, 1984; Sommers, 1977) en inhibant la croissance des arbres (Mcintosh et al., 1984). Cette inhibition peut se produire si la concentration d'un métal empêche la plante de puiser un autre élément. La baisse du rendement est liée à des déficiences en macronutriments dans le sol causées par :

- Le déplacement des cations basiques et métalliques,
- Le retard dans la décomposition et la minéralisation de la litière (effets toxiques sur les microorganismes) ;
- La diminution de l'absorption des nutriments liée aux perturbations du fonctionnement des racines fines et des mycorhizes (Mälkönen et al. 1999). A l'intérieur des tissus, les métaux provoquent des phénomènes oxydatifs (formation de radicaux libres induisant des mutations des acides nucléiques, des dysfonctionnements enzymatiques et la peroxydation des lipides) et génotoxiques (carcinogénèse) (Briat et Lebrun 1999).

D'autres métaux lourds se retrouvent dans les boues, mais ils sont tout à fait inutiles dans le métabolisme des plantes, par exemple le plomb, le nickel, le cadmium, le mercure et le chrome. D'autre part, ce sont justement ces métaux qui commandent la prudence dans la valorisation des boues. La toxicité des métaux lourds dépend de leur quantité, mais surtout de leur spéciation (Chang et al., 1984; Schalscha et al. , 1982) . La forme ionique libre est

reconnue comme la plus dangereuse (Adams et Sanders, 1984; Lester et al., 1983) car, étant soluble, elle est directement assimilée par les plantes. A ce titre inductif, les conséquences de la contamination par les métaux lourds sont illustrées dans le tableau 2.

**Tableau 2:** Effets de quelques éléments métalliques sur les végétaux (Meinck et al, 1977).

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.

Le fait le plus inquiétant est le passage des métaux lourds dans la chaîne alimentaire. Du point de vue agricole, ce fait est très important car on consomme directement les plantes qui auraient été fertilisées avec les boues résiduaires ou on les consomme indirectement à travers les animaux qui ont pâturé dans les champs ainsi fertilisés.

Selon Petit en 2007, jusqu'à maintenant la plupart des études sur la dynamique des éléments traces métallique apportées par épandage des boues dans les sols, avait pour objectif les transferts sol/ plante et pour finalité les risque de contamination de la chaîne alimentaire. C'est pourquoi en dispose de peu des données publiées.

Pour estimer les conséquences des polluants dans les sols à moyen et long terme. Il est importants de connaître les différentes voies de dispersion de ces contaminants et de pouvoir quantifier leur transfert d'un compartiment à l'autre (boue, sol ; micro-organisme du sol ; animal domestique etc.).

### 3.1.1. Effet sur les micro-organismes

L'effet des métaux lourds sur les micro-organismes du sol a fait l'objet de nombreux travaux (Cornfield ,1977) ressortent que la présence de certains métaux dans les sols peut se

traduire par une diminution de la biomasse microbienne, une réduction de l'activité respirométrique, ou du taux d'adénosine triphosphate (ATP). Certains micro-organismes anaérobies présents dans le sol et les boues sont capables de réduire certains éléments traces métalliques (sélénium, mercure) en des formes volatiles qui peuvent être directement fixés par la partie aérienne des végétaux couvrant le sol. (Petit, 2007).

Les principaux effets des métaux lourds sur la microflore peuvent être résumés dans le tableau 3 :

**Tableau 3:** Principaux effets de quelques métaux lourds sur la biomasse microbienne du sol.

Elements	Effet sur la biomasse microbienne du sol	Auteurs
Cuivre et Zinc	-sont des éléments qui provoquent plus la perturbation au niveau de la biomasse -à 300 ppm, le Zn perturbe nettement la respiration -à 1500 et 3000 ppm il a un effet net sur la respiration et la flore fongique -diminution du nombre de bactérie et d'actinomycète de la déshydrogénase et la phosphatase	- (Chaney et al., 1978; Cornfield, 1977).
Cadmium	-à pH <5, et à la dose de 10 ppm, le Cd provoque une diminution notable de la respiration	Chaney et al (1978)
Mercure	-à une dose 10ppm, il réduit significativement la biomasse microbienne	Cornfield (1977)

### 3.1.2. Effet sur l'animal

L'accumulation à la surface du sol d'éléments résultants de l'application de boue peut présenter un risque de contamination directe de la chaîne alimentaire lors du pâturage. Les animaux absorbent souvent un mélange de terre et déchets. On peut toutefois s'inquiéter des produits de la chasse qui pourraient être contaminés par des métaux toxiques. Anderson (1983) relate que des cerfs à queue noire de l'État de Washington ayant brouté du fourrage qui avait été fertilisé avec des boues contenant du zinc et du cadmium, n'ont pas montré plus d'accumulation de ces métaux dans le poil, le foie ou les reins que leurs congénères (cerfs témoins) ayant brouté sur les parcelles non fertilisées.

**Tableau 4** : Les ETM pouvant présenter une toxicité chez les animaux.

Eléments Trace Métalliques	Effettoxique	Doses Toxiques	Espèces
Arsenic	Vomissement, diarrhée hémorragique, chute de tension	40mg/kg (dose létale)	Bovins, Chevaux
Chrome	Dermatose, irritations des voies respiratoires, cancer des poumons.	700mg/kg (dose létale)	Bovins
Fer	Retard de croissance, anorexie, diarrhée.	> 000mg/kg/j	Bovins
Manganèse	Retard de croissance, anémie, lésions intestinales, parfois troubles nerveux.	2000mg/kg de matière brute de la ration	Porcs
Molybdène	Diarrhée, anorexie, dépigmentation des poils et troubles neurologiques.	-	Bovins
Sélénium	Atteintes musculaires avec pertes d'équilibre, atteinte de la peau et des sabots.	-	Bovins
Zinc	Faible croissance, anémie, défaut de minéralisation des os, atteinte pancréatique et intestinale	-	Bovins

Source: CSHPF (1997), Montcharmont (1999), France (2001)

### 3.1.3. Effet sur l'homme

Pour évaluer correctement les risques des ETM pour l'homme, il convient de tenir compte de leurs apports par l'intermédiaire des boues. Mais si l'accumulation en ETM du sol se fait sur quelques dizaines d'années, le temps nécessaire pour l'épuration de ce même

sol va s'étaler sur plusieurs milliers d'années. Les apports réalisés aujourd'hui préparent les éventuels risques pour demain.

La contamination éventuelle de l'homme aura lieu principalement par ingestion d'eau ou d'aliments contaminés (fruits, céréales, viandes d'animaux ayant été préalablement contaminés). L'estimation de l'exposition à un contaminant va tenir compte du niveau de contamination des aliments et de leur niveau de consommation par l'homme (Petit, 2007). Le tableau 6 présente les données concernant les effets toxiques de quelques éléments traces métalliques.

**Tableau 5:** Effets de quelques éléments Traces Métalliques sur l'homme

Eléments Traces Métalliques	Effetstoxiques
Plomb	Inhibition de la biosynthèse de l'hème et accélération de la destruction des érythrocytes. Atteinte rénale (néphropathie et altération progressive de la fonction rénale). Encéphalopathie et troubles neurologiques.
Cadmium	Lors d'intoxication chronique: atteinte irréversible tubulaire, éventuellement glomérulaire ; déminéralisation de l'os et perturbation du métabolisme du calcium des tissus osseux.
Mercure	Lors d'intoxication chronique: atteintes neurotoxiques (paresthésie, dysarthrie).
Cuivre	Intoxications chroniques rares
Arsenic	Intoxication aiguë : vomissements, diarrhée hémorragique, chute de tension. Intoxication chronique : encéphalopathie, défaillance cardiaque, atteintes rénales et hépatiques, dépilations.

Molybdène	Augmentation de la quantité d'acide urique dans le sang et les urines ; symptômes de gouttes.
-----------	---

Source: Rapport IARC (International Agency on Research on Cancer), (1987)

### 3.2. Teneurs limites en éléments traces dans les boues et les sols

Les contraintes liées à l'utilisation des boues pour une valorisation agricole découlent principalement de la présence de micropolluants. La réglementation fixe des seuils d'épandage des boues sur les sols, à des fins agricoles, en fonction de la teneur en micropolluants métalliques de la boue et du sol.

En cas de dépassement de la teneur limite en un ou plusieurs éléments cités dans le tableau 4, les boues doivent obtenir une autorisation provisoire de vente précisant les conditions de leur utilisation afin de pouvoir être épandues

En France, les apports de boues sont calculés sur une période de 10 ans. Ces derniers sont limités dès que la teneur en un ou plusieurs des éléments métalliques est comprise entre les valeurs de référence et les valeurs plafonds. En effet, les valeurs de référence correspondent à la moitié des teneurs maximales autorisées. Ces valeurs ont été obtenues en tenant compte des teneurs des sols en éléments métalliques et la quantité totale de boues que peut recevoir une parcelle considérée comme soumise à une bonne pratique agricole, à savoir 3 tonnes /ha/an sur une période de 50 ans (soit 150 tonnes/ha sur 50 ans). Ainsi les valeurs de référence sont celles d'une boue dont l'apport équivaut soit à:

- Doubler la teneur moyenne en éléments métalliques habituellement rencontrés dans les sols,
- Augmenter la teneur limite fixée par la norme dans les sols d'un pourcentage ne dépassant pas 50%.

Dans ce cas, les doses apportées sur une période de 10 ans seront comprises entre 15 et 30 tonnes de MS/ha. (Petit, 2007).

**Tableau 6** : Teneurs limites réglementaires en éléments-traces métalliques des sols et des boues d'épuration municipales dans l'Union Européenne et en France (en mg kg<sup>-1</sup> de MS)

(Dousset et al.1999, ORDIF, 2003) (Brouzes et Chauvière, 2009)

Eléments Traces Métalliques (mg kg <sup>-1</sup> MS)	Réglementation française Arrêté 08/01/1998		Réglementation européenne Projet future Directive		
	Teneurs limites dans les sols	Teneurs limites dans les boues	2005	2015	202
					5
Cadmium	2	15 et 10 à partir	10	5	2
Chrome	150	1000	1000	800	600
Cuivre	100	1000	1000	800	600
Mercure	1	10	10	5	2
Nickel	50	200	300	200	100
Plomb	100	800	750	500	200
Zinc	300	3000	2500	2000	150
Cu+Cr+Ni+Z		4000	-	-	-

L'utilisation sylvicole des boues issues des usines de traitement des eaux usées a donc un avantage indéniable par rapport à l'utilisation agricole, parce que les forêts ne font pas directement (McIntosh et al. partie 1984; de la E. P. A., chaîne alimentaire humaine 1983; Fiskell et al., 1982; Riekerk, 1982; Le Tacon et al., 1979; Pommel, 1979; Sidle et Kardos, 1977).

## *Partie Expérimentale*

---

## *Chapitre IV : Matériel et Méthodes*

---

## 1. Origine du matériel expérimentale

### 1. 1. Boues résiduaires de station d'épuration

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

La Station de Traitement des Eaux usées (STEP) de Tiaret est localisée dans la commune

D'Ain Bouchekif, à 6 km au sud de la ville de Tiaret. (fig.1).

Les eaux usées arrivent à la station d'épuration gravitairement, grâce à un réseau des différents collecteurs. Cette station d'épuration s'étale sur une superficie de 9,47 hectares, elle est destinée au traitement des eaux usées provenant des communes de Tiaret, Sougueur, Dahmouni et Ain Bouchekif (Chafaa et al., 2015).



**Figure 1:** Situation géographique et principaux collecteurs de la ville de Tiaret vert la station d'épuration (Chafaa et al., 2015).

Lancement officiel du traitement des eaux usées était en Mai 2008. La station d'épuration est fonctionnelle avec le traitement de 38.000 mètres cubes / jour avec un suivi rigoureux, d'interventions préventives et curatives encadré par une équipe soudée expérimentée dans le domaine. (ONA, 2008).



**Figure 2:** Vue générale de la station d'épuration de Tiaret. (Cliché SOUDANI.L, 2015).

Selon l'Office national d'assainissement (ONA), les capacités de réutilisation des eaux usées traitées dans l'irrigation agricole ont été portées de 45 millions m<sup>3</sup> en 2012 à quelque 325 millions m<sup>3</sup> en 2014, à l'échelle nationale ; Le bilan relève 382.000 m<sup>3</sup> traités au cours de l'année 2014 pour la station d'Ain Bouchekif. Ces eaux sont destinées à l'irrigation de 4000 hectares de cultures en amont et en aval du barrage Dahmouni à Tiaret. (Chafaa et al., 2015).

### **1.1.2. Production de boue**

La production de boue passe par plusieurs phases de traitements :

- Phase de prétraitement : elle permet d'éliminer les éléments solides les plus grossiers par des procédés physiques tels que la sédimentation, la flottaison, 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.

-Les traitements primaires : ils vont permettre la décantation des matières en suspension, par des processus de décantation simple, des traitements physicochimiques ajoutant des agents coagulants ou flocculant etc.

Les boues ainsi obtenues sont des boues fraîches, non stabilisées elles sont fermentescibles et sont donc instables.

- Les traitements secondaires : il s'agit de traitement de clarification de traitements biologiques. Ils consistent à extraire les matières organiques dissoutes dans les eaux usées. On utilise des micro-organismes qui vont se nourrir de ces substances dissoutes. 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 soumises à une déshydratation dans des lits de séchage (ONA ,2008).



**Figure 3:** lits de séchage des boues primaires et secondaires de la STEP (Cliché, SOUDANI, 2015).

### **1.1.3. Objectifs de la STEP**

- Réduction importante des matières organiques (94.4%) ;
- Economie en consommation d'énergie ;
- Réduction importante des odeurs ;
- Dépollution d'Oued Nahr Ouassel, et réduction de l'eutrophisation de Barrage Bakhadda et barrage Dahmouni ;
- Revalorisation des eaux usées traitées pour les besoins de l'agriculture notamment céréaliculture et arboriculture ;
- Revalorisation des boues séchées pour amendements des terrains agricoles avoisinant.

Pour la valorisation agricole des boues, on enregistre une quantité importante avec un stock de 18.800m<sup>3</sup> destinés à la conservation des forêts, afin de les utiliser dans la fertilisation du sol en reboisement. D'autres quantités ont été utilisées par les agriculteurs comme des engrais biologiques.

La boue utilisée, dans cette expérimentation, a été produite en Avril 2015, de couleur noire foncée, sans odeur désagréable. La boue a été prélevée d'une façon aléatoire sur des lits de séchage (aussi bien sur les extrémités des lits qu'au centre).

Cette boue est stable, desséchée, sec, à l'état solide de particules d'une taille moyenne d'environ 6 mm.

### 1. 2. Sol

Un sol agricole a été utilisé dans cette expérience, prélevé à quelques mètres du campus universitaire de Karman, sachant que cette zone est considérée comme non contaminée par les polluants provenant de trafic routier.

### 1. 3. Matériel végétal

Des plants d'*Eucalyptus camaldulensis* cultivées dans la pépinière d'Ain Tzarit, âgés d'un an, ont été utilisées dans cette étude, en raison de ses bonnes caractéristiques de croissance, de sa haute plasticité et de sa valeur économique, et en raison de leurs taux modérés à bas d'accumulation de métaux lourds dans la biomasse aérienne, réduisant ainsi le risque de transmission de contaminants dans la chaîne alimentaire (Arriagada et al., 2007, King et al., 2008). Cependant, certains eucalyptus pourraient accumuler, dans des conditions expérimentales, une certaine quantité de métaux lourds dans leurs pousses (Arriagada et al., 2007 ; Mok et al., 2012 ; Fine et al., 2013).

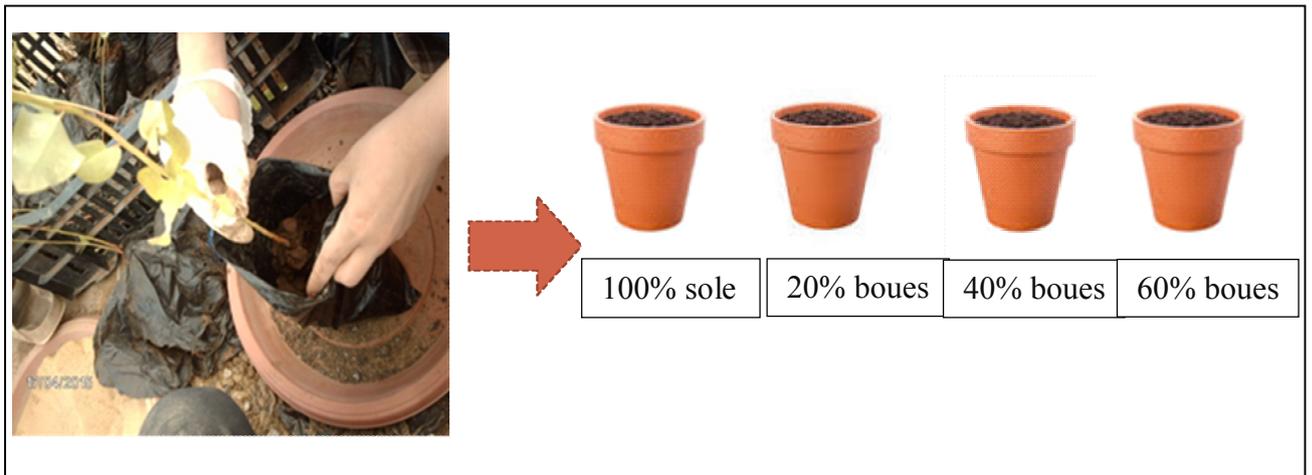
*En effet, L'Eucalyptus camaldulensis Dehnh.* (Gomme rouge de la rivière) est un arbre originaire d'Australie qui a été largement planté dans le monde entier. Il appartient à un genre, dans la famille *Myrtaceae*, avec environ 800 espèces, toutes limitées à l'Australasie. L'eucalyptus est l'une des principales espèces forestières les plus largement plantées dans le monde, couvrant plus de 15 millions d'hectares dans 100 pays (Davidson, 1993 ; Myburg 2014). Sa forte croissance et sa rusticité permettant d'établir rapidement une ressource et de répondre à des besoins divers, industriels (bois et trituration) ou domestiques (bois de chauffe, poteau,...).

Le développement rapide et important de l'eucalyptus dans le monde a suscité des controverses sur l'impact de ces plantations sur leur milieu. Leur faible tolérance aux températures froides a limité les plantations d'*E. camaldulensis* dans les environnements tempérés. Par exemple, en Europe, ils ont été plantés principalement dans les pays du sud, comme le Portugal, l'Espagne, l'Italie et la Grèce. Environ 633 000 ha plantés en Espagne, produisent annuellement plus de 4 millions de m<sup>3</sup> de bois (SECF, 2010).

L'espèce a une bonne croissance en Afrique sous une pluviosité comprise entre 700 et 1200 mm Elle préfère les sols sablonneux profonds humides (Boily et Vapuyvelde, 1986 ; Burren, 1995; Maydell, 1990 ; Poupon, 1972). L'eucalyptus est l'arbre le plus utilisé en reboisement en Afrique du Nord, grâce à sa plasticité écologique et à la rapidité de sa croissance. Les eucalyptus introduits dans le Nord et surtout l'Est du pays occupent 43000Ha Ces essences constituent le premier groupe de forêts dites économiques qui totalisent 1249000 ha dont 424 000 ha de peuplements artificiels. Les produits ligneux fournis par les eucalyptus sont très diversifiés et répondent aux nombreux besoins exprimés par l'économie nationale. En effet, l'eucalyptus répond bien aux cahiers de charges des industriels, que ce soit pour la fabrication des panneaux de particules, des poteaux, de la pâte à papier,.... Les rondins d'eucalyptus sont également utilisés dans le soutènement des mines de charbon en complément des poteaux de résineux importés. Il en est de même en agriculture, où les perches et les piquets constituent l'essentiel de l'ossature des serres et de tuteurs. (DGF, 1997).

## **2. Protocole expérimentale**

Les plantes ont été dénudées de son sol initial, avant la transplantation dans des pots qui contient des mélanges composés du sol et de boues résiduaire, avec trois proportions différentes de boues (20%, 40% et 60%). Le mélange sol-boues a été tamisé à 2mm, afin d'éliminer les résidus non broyés et avoir un matériau homogène.



**Figure 4:** Méthode de transplantation des plants d'*E.camaldulensis* dans les pots  
(Cliché, SOUDANI, 2015)

Le but de ce travail est d'étudier les caractéristiques physico-chimiques de la boue, afin de déterminer son effet sur le sol et les paramètres biométriques des plantes transplantées (la hauteur, le diamètre de la tige à la base, le diamètre à mi hauteur, le nombre de feuilles). Il faut noter que l'expérimentation a été installée en plein champs, de durée de six mois, à compter du mois de Mai 2015.

Le dispositif expérimental comprend 40 répétitions à deux modalités : T et B. La modalité B comprend également 3 sous modalités : B1, B2 et B3. La dose effective moyenne appliquée aux substrats B est de 144 kg de boues. Nous avons donc :

T : Le substrat utilisé est 100% sol (témoin).

B1 : Le substrat est composé de 20% de boues et 80% du sol.

B2 : Le substrat est composé de 40% de boues et 60% du sol.

B3 : Le substrat est composé de 60% de boues et 40% du sol.

### 3. Analyses physico chimiques et mesures biométriques

Les analyses du sol, des boues et la partie aérienne des plantes ont été effectués au sein du laboratoire de la faculté des biosciences, université de Freiberg (Allemagne).

### 3. 1. Cas du sol et de boue

#### ➤ Granulométrie

L'analyse granulométrique d'un sol, consiste à déterminer la proportion des diverses classes de grosseur des particules. On sépare par les analyses de sol, les particules en trois classes distinctes : soit sable (de 2 à 0,05 mm), le limon (de 0,05 à 0,02 mm) et l'argile (inférieure à 0,002 mm).

La granulométrie est effectuée selon la méthode internationale à l'aide de la pipette Robinson, (Damay et Julien, 1995).

#### ➤ pH

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. Il existe plusieurs méthodes de mesure du pH (Dajoz, 1985). La lecture du pH eau se fait sur le pH mètre lorsque l'aiguille est stabilisée et après un repos au moins d'une heure de la suspension.

#### ➤ Matière organique

Elle est réalisée par incinération après passage au four à moufle à 450°C pendant 4h, elle est exprimée en pourcentage du poids sec de la terre.

#### ➤ 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 va être oxydé par le sel de Mhor.

#### ➤ Calcaire total

La valeur du calcaire total est déterminée par le Calcimètre de « BERNARD ». Le principe de dosage est fondé sur la réaction caractéristique 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.

➤ **Calcaire actif**

La chaux active a été déterminée selon la méthode de Drouineau; La procédure implique 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 (Callot et Dupuis, 1980).

➤ **Conductivité électrique**

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

➤ **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).

➤ **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 d'1 g de sel de sélénium et de 15 ml d'acide sulfurique à 96 %. L'ensemble est chauffé 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 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (N/25) en présence d'un indicateur coloré (vert debromocrésol).

➤ **Rapport C/N**

Le rapport C/N donne une idée sur la vie biologique des substrats. Il est déterminé à partir du

Carbone organique et l'azote total.

➤ **Phosphore**

La détermination de phosphore a été effectuée par une méthode de coloration standard avec un réactif combiné d'acide ascorbique et une mesure de l'absorbance dans un spectrophotomètre. (Wiche et al., 2016).

➤ **Potassium**

Le potassium a été déterminé par spectrométrie d'absorption atomique par aspiration directe de l'échantillon filtré ou digéré et filtré dans une flamme air-acétylène (Wiche et al., 2016).

➤ **Eléments traces métalliques**

Les échantillons du sol et boues ont été séchés à 60°C, puis tamisés à 2 mm avant d'être minéralisés à l'aide d'un four à micro-ondes avec un mélange d'HF, HCl et HNO<sub>3</sub>. L'analyse des éléments de traces ont été effectués par Spectrométrie de masse par plasma couplée inductivement (Wiche et al., 2016).

### **3. 2. Cas de la plante**

Pour déterminer quelques éléments traces métalliques dans la plante, des échantillons, de la partie aérienne ont été séchés à 60°C et broyés au broyeur planétaire dans des cylindres et billes en zirconium. Les échantillons ont été minéralisés sous champ micro-ondes à l'aide d'un mélange de 6 ml HNO<sub>3</sub> et 2 ml H<sub>2</sub>O. Les éléments minéraux et les éléments trace métalliques ont été déterminés par ICP-MS. (Wiche et al., 2016).

#### **3. 2. 1. Paramètres biometriques mesurés**

La hauteur de la tige a été mesurée depuis le ras du sol jusqu'à l'apex, à l'aide d'un mètre ruban. Le Diamètre à la base et le diamètre à mi-hauteur sont mesurés à l'aide d'un pied à coulisse digitale d'une précision de 1/100mm. Par contre, le nombre de feuilles, qui est un bon indicateur des capacités assimilatrices de la plante et de sa production en biomasse (Fischesser, 1996), a été mesuré par comptation de feuilles.

## *Chapitre IV : Résultats et discussions*

---

### 1. Caractérisation physicochimiques du sol et des boues résiduaires utilisés.

Les résultats trouvés montrent que le sol utilisé a une texture de limono argileuse, un pH alcalin et une faible teneur en matière organique. La conductivité électrique est de l'ordre de 1 mmhos/cm, ce qui explique que ce sol n'est pas salé (Diehl, 1975). (Tableau 1).

**Tableau 1.** Caractéristiques du sol et des boues utilisées dans l'expérimentation

parameters Physicochimiques	Boue ( N=20)	Sol (N=5)
pH	7.1±0.3	8.1±0.11
CE (mmhos/cm)	4.7±0.1	1±0
CEC (cmol/kg)	30.6±0.2	26.5±1.3
CaT (%)	18.5±2.7	26.1±0.03
Ca act (%)	13.9±0.9	20±0.02
H (%)	3.9±1.7	12.3±0.17
MO (%)	44.8±16.4	1.4±0.01
C (%)	19.1±4.1	0.6±0.04
Argile (%)	11.3±0.3	2±0.01
Limon grossier (%)	17.6±0.2	59.3±0.16
Limon fin (%)	40.5±0.1	6±0
Sable grossier (%)	10.5±0.1	25.9±0.12
Sable fin (%)	19.3±0.4	6.4±0.13
N (%)	2±0.2	0.9±0.01
P (mg/kg)	44.8±3.5	26.2±7.60
K (mg/kg)	1.2±0.1	59.4±4.6
C/N	9.5±2.7	0.6±0.3
Cr (µg/kg)	341.9±86.9	189.3±18.11
Mn (µg/kg)	156.64±38.48	804.8±59.72
Fe (µg/kg)	136.9±30.06	559.8±538.7
Cu (µg/kg)	59.6±15.7	44.9±4.05
Zn (µg/kg)	2786±724.2	62.7±4.75
Cd (µg/kg)	4.6±1.3	0.06±0.01
Pb (µg/kg)	72.07±	5.7±0.67

Cependant, les boues de la STEP ont un pH sensiblement neutre, avec une texture limoneuse, classé dans la texture moyenne. Les textures moyennes ne provoquent pas l'asphyxie des systèmes racinaires et permettent un bon développement des racines, par contre, une texture lourde peut entraîner des phénomènes d'asphyxie radriculaire. (Henin, 1969).

La teneur élevée en matière organique dans les boues indique son origine urbaine, tout comme l'azote, contribuant certainement à la valeur fertilisante des boues, qui est également identifiée dans l'étude d'Ona et Osorio (2005).

La détermination du contenu total des éléments majeurs a révélé des valeurs élevées pour P et de faibles valeurs pour le K. Nogueira et al (2010), ont également déterminé que les valeurs pour P sont très importantes que les valeurs de K dans leur boue ce qui peut s'expliquer par des taux élevés de conservateur de potassium dans l'eau pendant le traitement, en raison de sa grande solubilité.

Le ratio C / N, proche de 10, indique que les processus de minéralisation ont déjà eu lieu avec la libération d'azote (Dommergue et Monogenot, 1970). Cependant, Chaussod et al (1981) ont montré que les boues urbaines les plus courantes (boues stabilisées aérobies ou anaérobies), dont la teneur en N Kjeldahl est comprise entre 2 et 5 % et C/N variant de 6 à 12, libèrent 30 à 40 % de leur azote total assez rapidement.

En règle générale, la boue est considérée comme un substrat toxique pour l'environnement et la production agricole due à une teneur élevée en métaux lourds, ce qui limite son application comme engrais (Maksimova et al., 2015). Cependant, dans les boues de la station de traitement des eaux usées de Tiaret, les métaux lourds étaient présents à de faibles concentrations, ne dépassant pas les niveaux autorisés selon la norme AFNOR (1985). Des résultats similaires ont été obtenus par Maksimova et al., 2015.

## **2. Teneurs en éléments traces métalliques dans la plante.**

Nous rappelons que l'*Eucalyptus camaldulensis*, utilisé dans cette étude, a été cultivé dans la pépinière d'Ain Tzarit, et que toutes les doses des éléments traces métalliques ne dépassent pas le seuil des teneurs normales pour les plantes (Kabata-Pendias et Pendias, 2000; Prasad et al. 2003). Le Tableau 2 montre les résultats trouvés :

**Tableau 2 :** Teneurs en éléments traces métalliques dans les plantes d'eucalyptus utilisés avant la transplantation.

Variables	N	Moy	Min	Max	1 <sup>ère</sup> Quartile	2 <sup>ème</sup> Quartile	Ecart type	Coef.Var.
Cr (ppb)	5	0,051	0,013	0,100	0,024	0,063	0,034	67,250
Mn (ppb)	5	24,864	20,356	32,094	22,836	24,743	4,389	17,652
Fe (ppb)	5	26,493	21,342	31,108	23,986	30,854	4,326	16,330
Cu (ppb)	5	0,316	0,210	0,398	0,273	0,356	0,074	23,571
Zn (ppb)	5	15,69	11,52	22,900	11,830	17,460	4,696	29,918
Cd (ppb)	5	0,01	0,009	0,020	0,011	0,012	0,004	33,951
Pb (ppb)	5	0,06	0,021	0,101	0,035	0,096	0,037	54,910

### 3. Analyses physico-chimiques des substrats et et des plantes après amendement

#### 3.1. Analyses des substrats

##### 3.1.1. Substrat (T)

L'un des principaux objectifs recherché, à travers cette étude, est de déterminer l'effet de l'apport des boues résiduaires sur les propriétés physico-chimiques du sol.

Les résultats obtenus (ils sont représentés dans les tableaux 3, 4, 5,6), après six mois d'expérimentation, ont montré un déséquilibre nutritionnel entre l'azote, le phosphore et le potassium. Ce déséquilibre est marqué par une teneur faible d'azote, une quantité appréciable en phosphore et une teneur élevée en potassium dans le substrat témoin (100% sol).

**Tableau 3 :** Caractéristiques physico-chimiques du substrat (T).

##### 3.1.2. Substrat (B1)

Les résultats obtenus pour le substrat B1 sont enregistrés dans le tableau 4.

**Tableau 4 :** Caractéristiques physicochimiques du substrat (B1).

Le pH de cette fraction, qui est de 20% de boues, est basique avec un apport en matière organique et en éléments nutritifs un peu élevé, comparativement au sol témoin (substrat T).

### 3.1.3. Substrat (B2)

L'examen de tableau N° 3 montre que le taux de la matière organique moyen de substrat (B2) est de  $25,98 \pm 4,72$  ; l'azote total est de  $1,13 \pm 0,0$  ; les valeurs enregistrées pour le fer et le zinc sont respectivement  $780,74 \pm 94,06$ ppb et  $597,23 \pm 93,98$ ppb (Tableau 5).

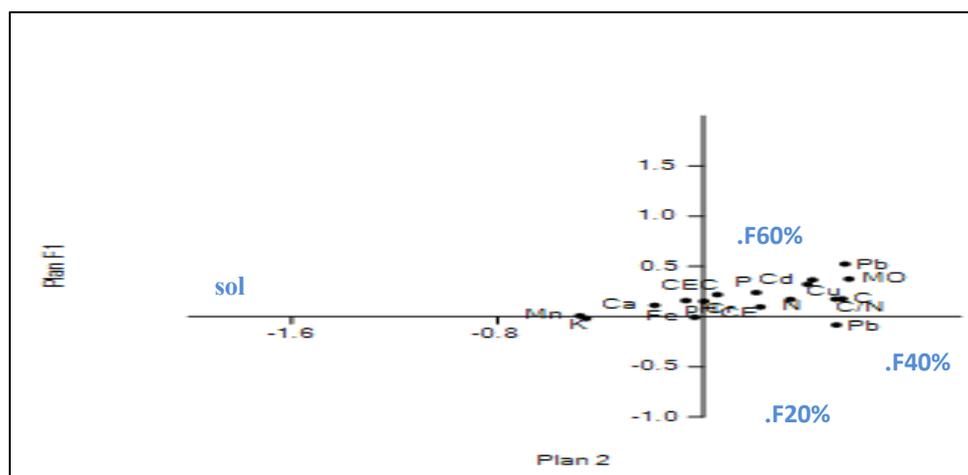
**Tableau 5** : Caractéristiques physicochimiques du substrat (B2)

### 3.1.4. Substrat (B3)

Pour ce substrat (60% de boues), les taux de la matière organique, d'azote total, de phosphore et de potassium sont importants, ils ont des moyennes de  $27,15 \pm 2,59$ , de  $1,22 \pm 0,06$ ,  $45,70 \pm 1,00$  et  $84,84 \pm 3,37$  respectivement (tableau 6). Ces valeurs dépassent largement les taux présentés en substrat témoin (T). Cependant, les teneurs en éléments traces métalliques sont aussi élevées mais ne dépassent pas les valeurs limite d'AFNOR (1985).

**Tableau 6** : Caractéristiques physicochimiques du substrat (B3).

Afin de confirmer que la fraction 60% boues est riche, nous avons réalisé une analyse des correspondances, reliant les quatre fractions aux différents paramètres physico chimiques et concentrations en éléments nutritifs (fig.1



**Figure 1** : AFC entre les 04 fractions paramètres physico chimiques et concentrations en éléments nutritifs après six mois de transplantation d'Eucalyptus.

L'AFC a montré que l'apport de la boue au sol a augmenté significativement les paramètres étudiés comparativement au sol témoin (T). L'apport de boues se révèle dans l'ensemble, bénéfique pour le sol. Cet avantage de l'incorporation des boues résiduelles se répercute sur ses caractéristiques physicochimiques. (McKayMoffat, 2001;Caravaca et al, 2002).Ainsi, l'amélioration de la fertilité des sols après la modification du compost a été largement observée (Guerrero et al., 2001, Korboulewsky et al., 2002, Martinez et al., 2003).

Les résultats des statistiques élémentaires des propriétés physico-chimiques, obtenus pour les substrats (B1, B2 et B3), montrent que la valeur du pH est identique. Dans ce contexte, une étude de Parkpain et al. (2000) a montré une augmentation du pH aux sols acides alors qu'aucun changement n'a été observé pour les sols neutres après l'apport des boues.

La conductivité électrique augmente avec la dose apportée, conformément aux résultats d'autres auteurs (Dridi et Toumi, 1999 ; Pisson, 2000 ; Korboulewsky et al. 2001;Boutmedjet, 2004 ; Bipfubusa et al, 2006 ; Amadou, 2007 ; Bahri et Annabi, 2011 ; Guerfi, 2012).

La CEC semble augmenter dans les substrats modifiés. Une étude d'Epstein et al. (1976) a montré que l'apport de compost de boue augmente la CEC et que cette augmentation est proportionnelle à la dose apportée. Une augmentation de la CEC du sol augmente le pool de nutriments potentiellement disponibles pour les végétaux (cations) et diminue le lessivage des ETM, qui sont préférentiellement fixés sur le complexe adsorbant plutôt que transférés vers la solution du sol.

L'apport des boues résiduelles a également contribué à l'amélioration de la teneur maximale en matière organique allant de 1,16% en T jusqu'à 24, 10%, 26,98% et 28,76% respectivement en B1, B2 et B3 (tableaux 3, 4, 5,6), et par conséquent en carbone organique, il en est de même pour le taux d'azote total. Ce résultat avait également été obtenu par plusieurs auteurs qui ont constaté que la boue a significativement enrichi le sol en carbone organique et en azote. (Dridi et Toumi, 1998 ; Korboulewsky et al, 2001, Bipfubusa et al., 2006 ; Bahri et Annabi, 2011 ; Guerfi, 2012).

Selon la classification de Baize, (1988), le substrat B3 avec 60% de boues est très riche en matière organique. Le compost a considérablement augmenté la teneur en matière organique du sol et la capacité d'échange cationique. De même, Guerrero et al. (2001) ont

révélés que le carbone organique total du sol a augmenté après la modification par la boue résiduaire.

La matière organique est une source de nutriments végétaux et sa minéralisation progressive fournit des ions biodisponibles aux plantes. Dans toutes les substrats le rapport C/N est inférieur à 20, ce facteur agit directement sur la biologie du sol donc ne provoque pas des blocages d'azote minéral et avoir donc un effet non dépressif sur les plantes (Glemas, 1980).

Le rapport C/N indique ici une bonne activité biologique, ce résultat a été constaté par Bipfubusa (2004), Houot (2009), Annabi et Bahri (2011).

En ce qui concerne la fertilité phosphorique potassique des substrats, les traitements (B1, B2, B3) entraînent une augmentation de taux de phosphore assimilable, et du potassium par rapport à la composition initiale du sol. Les teneurs, les plus élevées, sont enregistrées dans les substrats qui reçoivent des apports de boue 60% et 40%. L'effet fertilisant est souvent proportionnel à la dose d'apport (Dutch et Wolstenholme, 1994 ; Luo et Christie 1995). De même, Martinez et al. (2003) ont signalé une augmentation de dix fois du P extractible et du K dans les sols 1 an après l'épandage de boue. De même, Korboulewsky et al. (2002) a révélé que P augmentait significativement dans le sol et le sous-sol supérieurs d'un vignoble après la modification du compost de boue et a conclu que cet élément était le facteur limitant pour l'utilisation du compost des boues d'épuration.

Le Compost a globalement augmenté les concentrations d'éléments nutritifs et d'oligoéléments et la disponibilité dans les sols modifiés. Imai et al. (2010) ont démontré que les boues compostées conduisent à une augmentation des teneurs du sol en éléments minéraux. De même, plusieurs auteurs ont signalés une augmentation des sels totaux et échangeables dans les sols modifiés (Guerrero et al., 2001; Brockway, 1983; Martinez et al., 2003).

L'apport des boues tend à accroître la concentration des éléments traces, mais elles étaient présents à des faibles concentrations dans les différents substrats et ne dépassent pas les niveaux autorisés selon la norme AFNOR (1985). Les concentrations mesurées dans les substrats amendés notamment pour le zinc, le plomb et le cuivre sont en rapport avec celles trouvées dans les boues et dénote un pouvoir fixateur important du sol. Ces résultats sont



**Figure 2 :** Analyse canonique des correspondances (ACC) entre les différentes fractions de boues et les paramètres physicochimique.

La mobilité d'un élément correspond à son aptitude à passer d'un compartiment du sol à un autre, la solution du sol étant le compartiment à partir duquel s'effectuent les transferts vers la plante. Elle dépend de nombreux facteurs liés à la nature de l'élément, aux propriétés du sol (pH, CEC, teneur en argile, teneur en matière organique) et au matériau d'apport (type de boue, par exemple). Doussat et al. (1999). Il ressort de la figure 5 que pour le pH, il n'y a aucune influence de ce dernier sur le comportement de la plante vis-à-vis la fraction de boue.

Ces résultats indiquent une correspondance entre les éléments traces métalliques, la matière organique et la capacité d'échange cationique, cela explique que la distribution des éléments traces est fortement liée à ces derniers. (Kabata-Pendias et Pendias, 2000).

L'apport de compost de boue change la distribution des ETM dans le sol. Cela a été mis, en évidence dans de nombreuses expérimentations au moyen de procédés d'extraction chimique séquentielle. En effet, les fractions d'ETM liées aux précipités inorganiques (pour le Pb, le Cr et le Zn surtout) et à la MO (Cu, Ni, Zn) augmentent au détriment de la fraction la moins disponible, dite résiduelle (Sims et Kline, 1991 ; Pitchel et Anderson, 1997 ; ADEME 2000).

Pour le C et le N, ainsi que le rapport C/N, qui indique le processus fertilisation et de minéralisation, nous notons un effet similaire des fractions sur ces paramètres, cela explique que la dégradation de la MO est presque identique dans toutes les fractions (20%, 40% et 60% de boue).

### 3.1.5. Teneurs en ETM dans la plante transplantées dans les différents substrats.

Les teneurs en ETM dans les Eucalyptus transplantées dans les différents substrats (T, B1, B2 et B3), après six mois de plantation sont illustrés dans le tableau 7.

**Tableau 7 :** Teneurs en ETM dans la plante transplantées dans les différents substrats (T, B1, B2, B3) Après six mois de transplantation.

éléments	T	B1	B2	B3
Cr (ppb)	0,11± 0,10	20,48± 0,396	20,490± 0,257	20,532± 0,429
Mn (ppb)	26,08± 18,20	58,52± 39,890	59,318± 36,780	60,266± 35,180

Fe (ppb)	29,25± 22,31	70,31± 62,000	72,894± 50,120	74,938± 67,580
Cu(ppb)	0,69± 0,66	21,68± 1,782	21,976± 1,585	22,464± 1,401
Zn (ppb)	27,89± 15,72	40,44± 27,460	43,736± 17,308	48,088± 13,699
Cd (ppb)	0,09± 0,01	20,28± 0,086	22,246± 0,037	25,231± 0,042
Pb (ppb)	0,38± 0,12	20,63± 0,325	20,793± 0,432	21,505± 0,367

L'examen du tableau N° 7 montre une augmentation de teneurs des éléments métalliques en trace dans les plantes avec l'augmentation de pourcentage de boues utilisées. A cet effet, Lagerwerff et al. (1977), Juste et Solda (1979), Guckert et al. (1982) et Handreck, (1994) ont trouvés des résultats similaires et que les teneurs en ETM dans les plantes étudiés sont proportionnelles à la quantité de boue ajoutée.

Le substrat B3, avec 60% de boues, entraîne une augmentation des teneurs de cadmium, cuivre, zinc et de fer dans la partie aérienne des plantes *d'Eucalyptus camelndulensis*. Morel et al. (1988) et Handreck, (1994) ont montré que les boues apportées à très hautes doses, entraînent un accroissement des teneurs de cadmium, cuivre, zinc et fer dans les feuilles de maïs.

IL est très probable que les concentrations des éléments en traces dans la plante sont liées à la concentration des différent substrats. Planquart et al. (1999) ont montré que la teneur des métaux traces, dans les plantes, est plus influencée par la nature du sol et l'application du compost. Cependant, la concentration foliaire de Cu a augmenté deux fois par rapport au contrôle. D'après Mckenzie (1997) la teneur en Cr des végétaux est principalement contrôlée par la concentration du Cr en solution dans le sol.

Les teneurs des ETM ont des valeurs faibles dans la partie aérienne de la plante, elles ne dépassent pas le seuil des teneurs normales pour les plantes (Kabata-Pendias et Pendias, 2000; Prasad et al., 2003). Kabata-Pendias et Pendias (1992) n'ont trouvés aucune trace de contamination par le métal induite par le compost de boue. Elle n'est apparue dans les parties foliaires des semis après modification. En outre, les concentrations de Cd, Cr, Pb étaient très inférieures aux limites toxiques chez les plantes sensibles.

Dans la plante, les éléments métalliques en trace se distribuent de façon différente selon les organes (Cataldo et al., 1981). Les teneurs faibles des ETM obtenus peuvent être

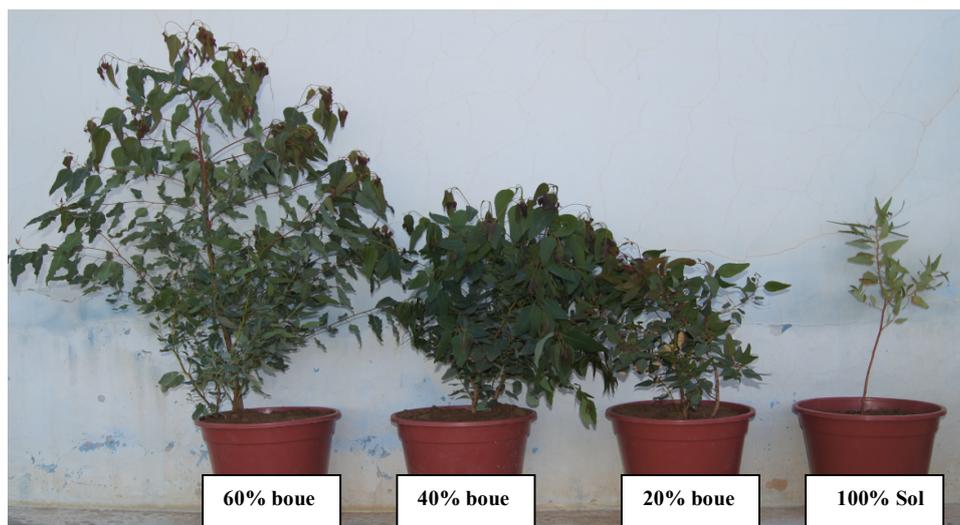
donc interpréter par la préférence d'accumulation de ces derniers. Smith (1994) a abouti dans son étude que la teneur en métaux est plus faible dans les parties comestibles de nombreux végétaux (grains, feuilles, fruits, tubercules) que dans les autres organes. Les concentrations foliaires peuvent ne pas être de bons indicateurs en raison de l'accumulation préférentielle des racines et du transport restreint au feuillage (Wisniewski et Dickinson, 2003). De même, après un apport de boues pendant sept années dans un sol chaulé, Kiemnec et al. (1990) ont montrés également une augmentation de la concentration de Zn, Cd et Mn dans les feuilles de maïs, mais pas dans les grains. Le Zn s'accumule dans la partie racinaire plus que dans la partie aérienne, surtout dans les sols riches en Zn (Kabata-Pendias et Pendias, 2000). Ainsi le cadmium est préférentiellement associé aux racines de la plupart des espèces cultivées, et que aussi le Cu s'accumule de manière préférentielle dans la racine de la plante plutôt que dans les pousses, cet élément est l'un des éléments les plus essentiels pour les plantes. En effet l'organisme ne peut croître complètement en son absence. Il ne peut être remplacé par un autre élément, il a une influence directe sur l'organisme et le bon fonctionnement de son métabolisme. (Kabata-Pendias et Pendias, 2000).

Ces résultats montrent que la plante a absorbé les éléments nécessaires, pour sa croissance, et accumulé certains; cela indique le l'Eucalyptus a un pouvoir accumulatif important relatif aux éléments traces métalliques. Madejón et al. (2017) ont également utilisés des plantes d'*Eucalyptus camaldulensis* pour la phytostabilisation et la biosurveillance des sols contaminés par les ETM.

#### **4. Effet de différentes concentrations de boues sur la croissance d'Eucalyptus**

Cette partie consiste à étudier l'effet d'apport de boues de la STEP sur les paramètres biométriques d'Eucalyptus, en tenant compte essentiellement des teneurs en azote et en phosphore présentes dans le sol (Reed et al., 1991 ; Saruhan et al., 2010).

La croissance d'une plante désigne des changements quantitatifs irréversibles, qui se produisent au cours du temps. La biomasse végétative est considérée comme un critère fondamental pour évaluer la croissance du végétal ; Après six mois de plantation, le taux de survie des plantes d'*Eucalyptus camaldulensis* était de l'ordre de 80%. En général, les paramètres biométriques ont été augmentés avec les différentes fractions des boues (20%, 40% et 60%).



**Figure 3:** Effet des fractions de boues sur la croissance d'*Eucalyptus camaldulensis* (Photos prises en octobre 2015).

Les images de la figure 3 montrent que le l'Eucalyptus croit dans les différents fractions, mais d'une façon importante dans le substrat 60% ; ceux qu'il a été accordé par Henriet (2010) et Dennaka (2011) pour l'orge.

A long terme, l'apport de boues, riche en matière organique, améliore la fertilité du sol (Archie et Smith, 1981), la densité, la porosité et la capacité de rétention d'eau (Singh et Agrawal, 2008) ; il assure la cohésion entre les éléments constitutifs du sol et donc sa stabilité, augmente sa réserve en eau, couvre les besoins de ses organismes hétérotrophes, participe aux échanges en minéraux et permet de résister aux agressions. Cet apport augmente l'activité microbienne (bactéries et champignons) (Nèble et al., 2007), la respiration (Carbonell et al., 2009) et l'activité enzymatique du sol (Banerjee et al., 1997). Toutefois, cette activité est réduite ou même inhibée dans des sols ayant reçu des boues riches en ETM (Fliessbach et al., 1994, Singh et al., 2008). McKayMoffat (2001), Brockway, (1983), Dutch et Wolstenholme (1994) ont signalés que l'amendement des boues d'épuration augmentait la croissance de *Piceasitchensis* ou de *Pinusdensiflora*. D'une part, *Quercus pubescens* peut mal répondre à la fécondation du compost.

La forte croissance de *E. camaldulensis* a pour origine les fertilisants que contiennent les boues, elles constituent une source potentielle de matière organique utilisable, elles contiennent aussi des nutriments essentiels pour la croissance des plantes (Dudkowski, 2000; Nguyen, 2004).

L'apport de la boue permet le recyclage des éléments fertilisants tels que l'azote, le phosphore et de nombreux éléments minéraux pour la plante (Sommers, 1977; Bailly et al.,

2004; Hussein et al., 2010). Les teneurs en macroéléments tels que N, P et K vont assurer une partie des besoins des plantes, ainsi, plusieurs auteurs ont montré que la croissance des plantes a été améliorée sensiblement après application de boues (Reed et al., 1991 ;Saruhanet al., 2010). En effet, une disponibilité élevée en azote pour les plantes stimule le développement et l'activité racinaires, favorisant ainsi l'absorption des autres éléments minéraux (Bipfubusa et al., 2006). L'azote est aussi un élément constitutif de la molécule de chlorophylle et des protéines des systèmes photosynthétiques. Son augmentation induirait une stimulation de l'activité photosynthétique ainsi que celle de la production de biomasse.

D'après Benbrahimet al., (2003), L'épandage de  $3 \text{ t ha}^{-1}$  de matières sèches (boues liquides) correspond à un apport d'environ 200, 200, et 45 unités de N, P et K, respectivement. Sikora et Enkiri (1999) suggèrent que les boues de STEP puissent remplacer un tiers d'engrais azotés sans diminuer le rendement.

Enfin, les boues de stations d'épuration contiennent aussi d'autres éléments minéraux qui sont souvent indispensables au développement des végétaux, même si les besoins des végétaux sont très faibles. (Bailly et al., 2004).

Les résultats obtenus dans les différents substrats montrent que *l'Eucalyptus camaldulensis* est une essence capable de s'adapter à diverses situations édaphiques. Toutefois, sa réussite dans un milieu donné semble être fortement conditionnée par la nature du sol, compte tenu du fait que son alimentation hydrique et sa nutrition minérale en dépendent.

L'analyse des variances des mesures répétées (ANOVAR) a montré un effet hautement significatif ( $p=0.000$ ) sur les paramètres biométriques.

#### **4. 1. Effet sur la croissance en hauteur.**

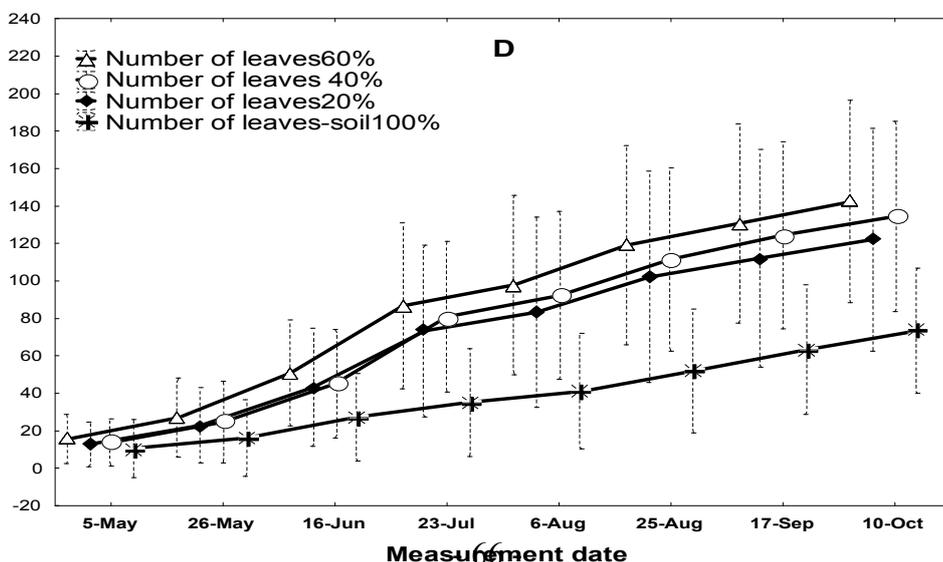
La cinétique de la croissance a été suivie en mesurant la croissance de la tige, après l'apport de la boue. Les résultats obtenus présentés dans la figure 4, montrent un effet positif de l'apport de boues sur la vitesse de croissance, pendant les six mois de transplantation. Ces toutes croissances en hauteur sont variées selon le pourcentage de boues apportées, avec une hauteur moyenne de  $49,4 \pm 24,1$  cm dans le substrat B3. Par contre, cette croissance est de  $34,3 \pm 12,80$  cm dans le sol témoin. Gagnon (1974) a trouvé que la croissance en hauteur des arbres fertilisés par l'application de 560 kg/ha de boue digérée anaérobie (base sèche) dans une plantation d'épinette blanche a dépassé largement

celle des témoins. De même, Berry et Marx (1980) ont épandu des boues digérées sur un site où des pins à d'Elliott avaient été plantés, après trois ans, les arbres fertilisés avaient une hauteur supérieure à celle des arbres témoins. Des études de Fiskell et al.(1982), Brockway(1983), McIntosh et al.(1984) sur l'épandage de boues résiduaires sur des espèces forestières, ont trouvé également que les arbres avaient une hauteur supérieure à celle des arbres témoins.

**Figure 4:** Effet de la fraction de boues sur la croissance en hauteur d'*Eucalyptus camaldulensis*

**4. 2. Effet sur le nombre de feuilles**

Généralement, un grand nombre de feuilles est un bon indicateur d'une bonne alimentation en eau et en éléments nutritifs pour la plante (Fischesser et Dupuistate, 2007). La figure 5 représente le nombre de feuilles des plantes d'eucalyptus pour les différentes doses appliquées.

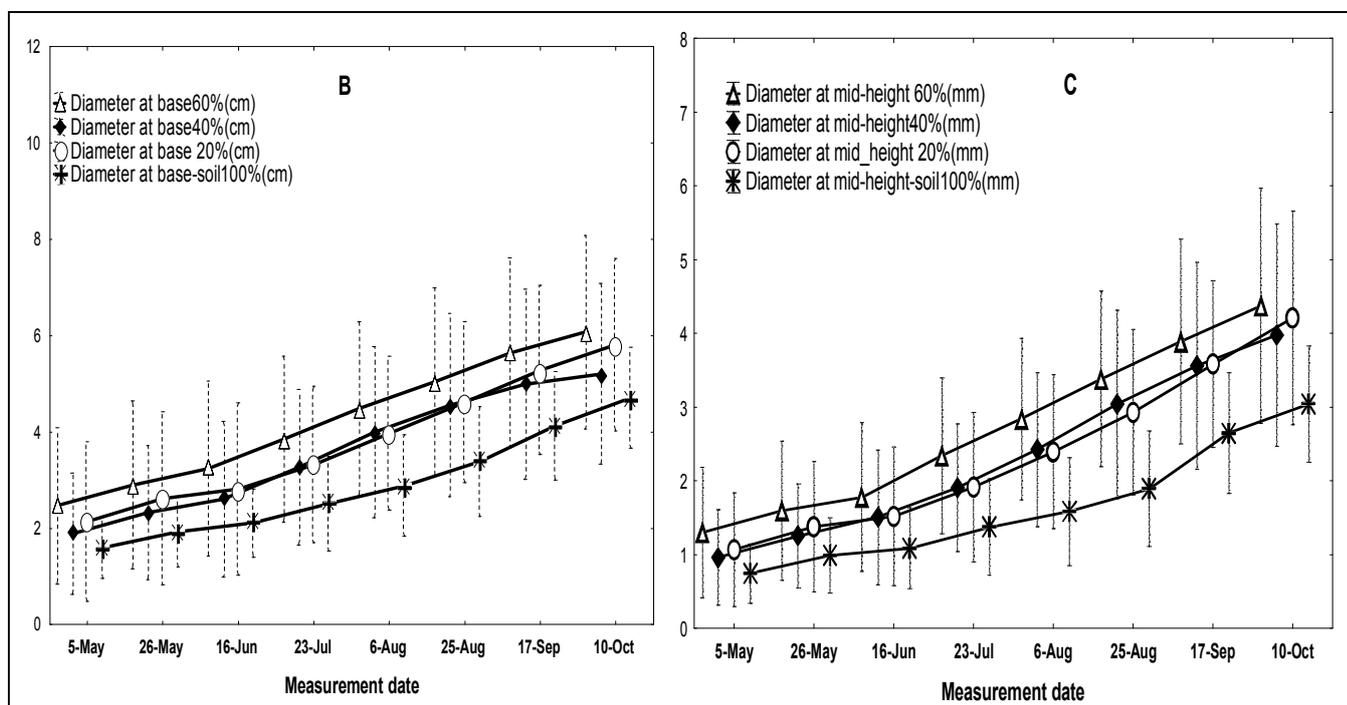


**Figure 5:** Effet de la fraction de boues sur le nombre de feuilles d'*Eucalyptus camaldulensis*

D'après la figure 5, on peut constater que le nombre de feuilles est proportionnel à l'apport des doses de boues appliquées, cependant le nombre de feuilles le plus élevé est enregistré chez les plants du substrat (B3).

#### 4.3 Effet sur la croissance en diamètre

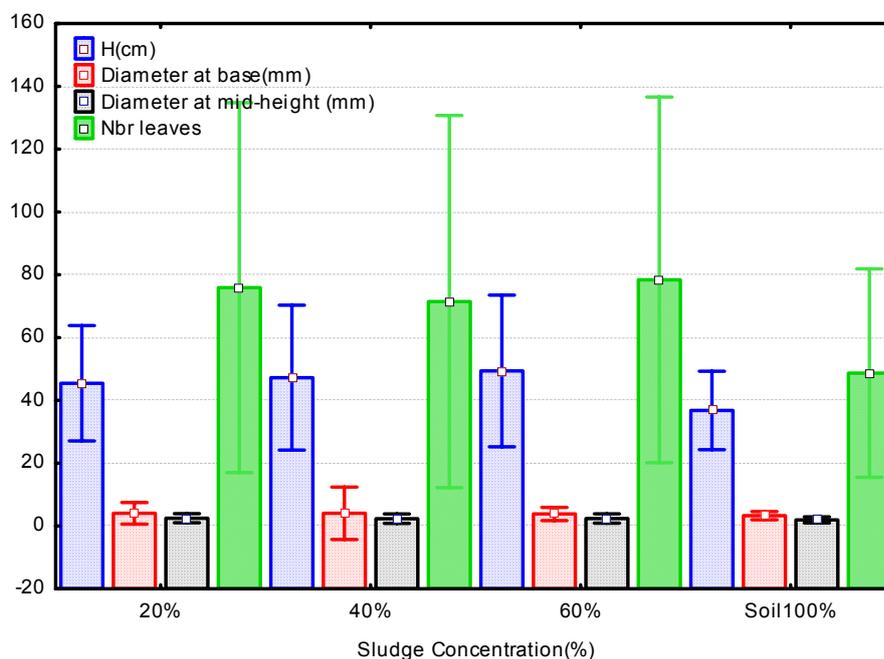
La croissance en diamètre a également varié significativement selon les différentes fractions des boues. (fig.6).

**Figure 6:** Effet de la fraction de boues sur la croissance en diamètre d'*Eucalyptus camaldulensis*

Les valeurs enregistrées, pour le cas du diamètre, sont respectivement de  $1,8 \pm 1,2$  mm,  $1,9 \pm 1,2$  et  $2,2 \pm 1,3$  mm pour les fractions de 20%, 40% et 60 % (figure 2C). La valeur moyenne du diamètre témoin est de  $1,3 \pm 0,7$  mm. Par contre, les valeurs moyennes du diamètre de base sont :  $3,2 \pm 1,8$  mm,  $3,2 \pm 1,9$  mm et  $3,2 \pm 2,0$  mm pour les trois fractions respectivement, cependant, elle est de  $2,4 \pm 1,0$  mm pour les plantes cultivées sur un sol non amendé (figure 2B).

La figure ci dessous affirme également que les plantes transplantées dans la fraction de 60% ont les meilleurs résultats biométriques étudiés. L'examen de la figure 6, montre une

légère augmentation du diamètre et une augmentation importante de la hauteur et nombre de feuilles, en fonction de la fraction de boues apportée, par rapport au témoin.



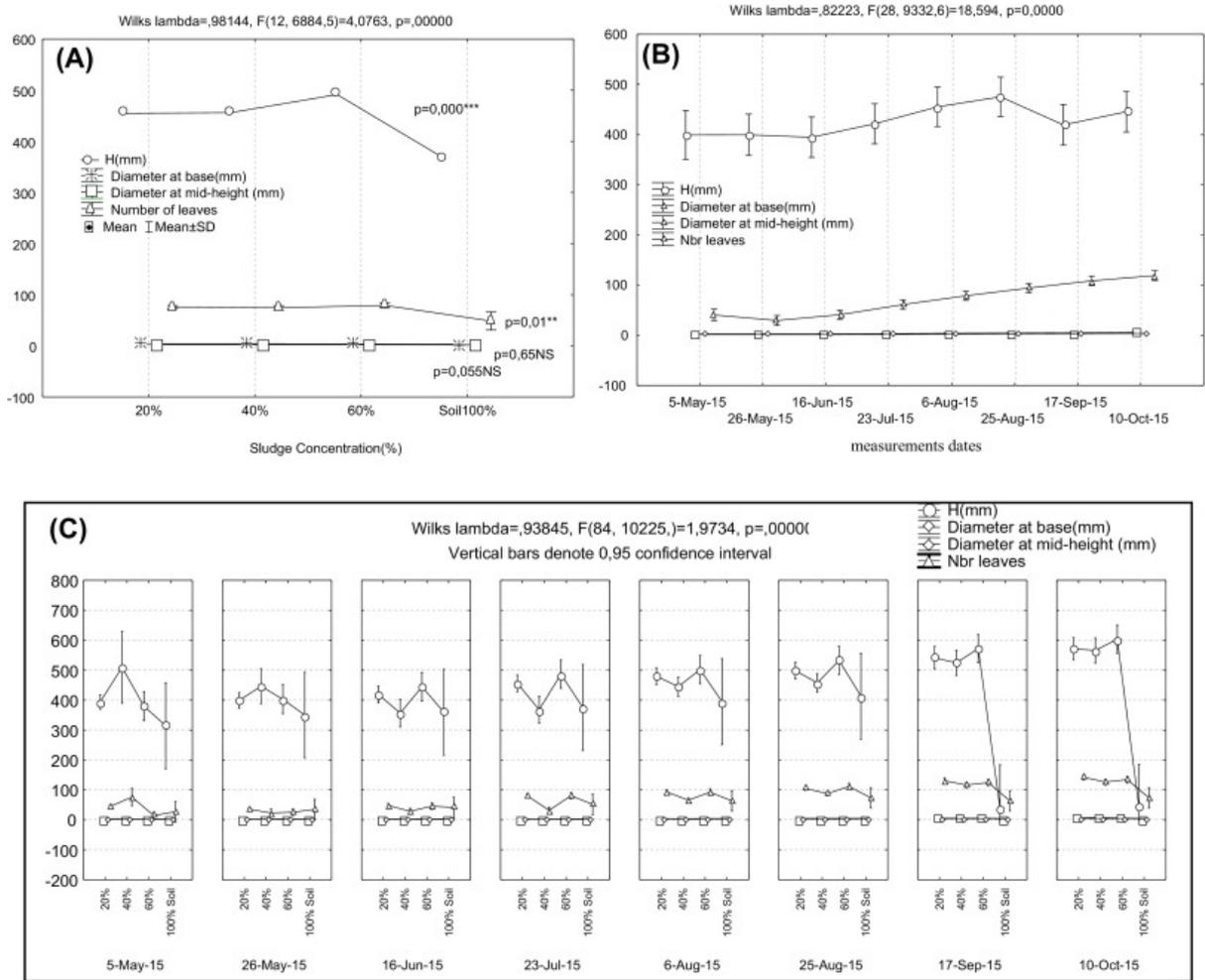
**Figure 7:** comparaison des paramètres biométriques *d'Eucalyptus camaldulensis* transplantés dans différentes fractions à ceux obtenus dans le sol témoin.

La concentration de boue effectuée et la date de prélèvement ont un affect significatif sur les paramètres biométriques des plantes d'Eucalyptus étudiés (tableau 8).

**Tableau 8:** Effet de date de prélèvement sur les paramètres biométriques étudiés.

	Test	Value	F	Effet - df	Error - df	p
Concentration de boue (%)	Wilks	0,942423	12,934	12	6847,50	0,000000
date de prélèvement	Wilks	0,822233	18,594	28	9332,59	0,000000
Concentration de boue (%)*date de prélèvement	Wilks	0,938452	1,973	84	10224,81	0,000000

L'ANOVAR a constaté un effet de date de prélèvement hautement significatif de la fraction de boues sur la hauteur, le diamètre et le nombre de feuilles ( $P < 0,001$  \*\*\*). Une croissance assez rapide a été remarquée, en fonction du temps de lecture des résultats, comparativement aux plantes cultivées dans le sol témoin (tableau 8). Les différences de croissance ont été les plus évidentes au cours des deux derniers mois (septembre et octobre). Ces résultats démontrent une bonne fertilisation et des qualités d'amélioration des sols pour les stations d'épuration de Tiaret. En effet, le compost a augmenté la croissance de hauteur, de nombre de feuilles et la croissance radiale.



**Figure 8:** Evolution des paramètres biométriques en fonction des différentes fractions de boues / sols. (A: Effet des concentrations de boues, B: Effet de la date de mesure, C: Date de mesure de l'interaction des effets et concentrations de boues).

### **Conclusion**

Les analyses physico-chimiques des boues de la station d'épuration d'Ain Bouhekif de Tiaret nous ont permis en premier lieu de s'assurer que ces dernières ne sont pas toxiques pour les plantes et le sol car elles renferment une quantité très minime en éléments trace métalliques, qui est largement inférieure aux normes AFNOR.

En deuxième lieu, les boues sont riches en matière organique et en éléments fertilisants, à savoir l'azote et le phosphore. Les analyses ont démontré que l'apport des boues fait augmenter la matière organique du sol et les principaux éléments fertilisants. Cette richesse a apporté un plus pour le sol. Les forêts croissant sur les sols les plus pauvres sont les plus susceptibles de réagir positivement à la fertilisation (Roberge et al., 1980). Le facteur important à considérer est l'écart qui existe entre le capital en éléments nutritifs présents et assimilables dans le sol et ce qui est ajouté artificiellement en fertilisants chimiques ou organiques. Par conséquent, dans l'état climatique similaire, les effets de l'application des boues dans les sols forestiers devraient être encore plus élevés en raison de l'amélioration des propriétés physiques et chimiques des sols (Losada et al., 2012). Et donc par la suite peut être bénéfique pour les plantes. Tous ces résultats sont satisfaisants vis-à-vis les plantes, ainsi nous pouvons affirmer que cet apport en boues est bénéfique quelque soit la dose de ces dernières. L'étude sur l'effet des différentes doses de boue sur le développement de la plante confirme notre hypothèse.

## *Conclusion*

---

L'objectif de ce travail est d'étudier les caractéristiques et de valoriser les boues résiduelles de la station d'épuration de Tiaret utilisant des plantations forestières.

Les résultats obtenus à l'issue de l'étude, montrent que les boues résiduelles de la station d'épuration de la ville de Tiaret peuvent être valorisées. Leurs caractéristiques physico-chimiques leur acquièrent un potentiel d'utilisation, comme un substrat organique afin d'enrichir le sol. Son utilisation, en mélange avec du sol nous a permis d'avoir des substrats riches en éléments fertilisants et en matières organiques. De plus les boues utilisées ne contiennent qu'une faible proportion de éléments traces métalliques qui sont largement inférieurs aux normes AFNOR, par conséquent elles ne présentent aucun risque de toxicité.

Les résultats obtenus pour les caractéristiques physico-chimiques des substrats avec les différents pourcentages des boues, après six mois de transplantation, montrent que les teneurs de ces derniers sont proportionnelles à la dose de boue apportée. Les teneurs maximales sont enregistrées dans le substrat B3 avec 60% de boue avec des taux de la matière organique, d'azote total, de phosphore et de potassium sont importants, ils ont des moyennes de  $27,15 \pm 2,59$ , de  $1,22 \pm 0,06$ ,  $45,70 \pm 1,00$  et  $14,84 \pm 3,37$  respectivement. Cette richesse a apporté un plus pour le sol étudié et affirme que cet apport en boues est bénéfique quelque soit la dose la plante. Les résultats de l'expérimentation ainsi menée vont dans le même sens que les essais rapportés en bibliographie, où l'apport des boues a favorisé la croissance des plantes. L'eucalyptus a absorbé et utilisé les éléments nécessaires pour sa croissance et accumuler certains ce qui indique le potentiel d'accumulation des éléments traces métalliques de l'espèce étudiée.

Concernant les paramètres biométriques exprimés statistiquement, nous avons trouvés que le substrat à base de 60% de boues, présente un support fertilisant permettant d'obtenir des caractères de croissance à savoir, la croissance la hauteur, le diamètre à mi-hauteur et à base et le nombre de feuille, comparativement supérieurs au témoin. La croissance en hauteur est de  $49,4 \pm 24,1$  cm dans le substrat B3. Par contre, cette croissance est de  $34,3 \pm 12,80$  cm dans le sol témoin.

Au terme de ces résultats, l'utilisation des boues résiduelles reste un moyen d'élimination de ces déchets par voie de transformation secondaire afin de préserver un environnement fragile.

Les sols de la région sont pauvres en matière organique et un apport en boue ne fait qu'améliorer les propriétés physico chimiques en premier lieu et nous sommes loin des risques de pollution.

La valorisation sylvicole des boues d'épuration est une alternative aux solutions actuelles, elle présente un risque moins élevé de contamination de la chaîne alimentaire humaine que leur utilisation en agriculture. Dans ce contexte, l'utilisation de plantations forestières peut offrir de nombreux avantages par rapport à des systèmes de valorisation purement agricole:

le bois, principal produit, ne fait pas partie de la chaîne alimentaire ; les plantations forestières offrent des conditions favorables à la rétention des aérosols et des odeurs, et à la réduction des risques sanitaires ; les interventions sur plantations forestières sont relativement peu fréquentes et ne gênent pas les opérations d'épandage ; la maintenance des systèmes d'épandage en forêt est réduite ; les sols forestiers et les systèmes racinaires des arbres ne présentent généralement pas de caractéristiques défavorables à l'infiltration des effluents, ainsi qu'à l'adsorption et à l'assimilation des éléments nutritifs, contrairement à la plupart des sols agricoles ; les quantités d'eau évapotranspirées par une plantation forestière sont importantes ; l'utilisation des eaux usées et des boues d'épuration peut être couplée à des régimes forestiers intensifs (taillis à courte rotation) ; il est possible d'utiliser des terrains peu fertiles ou en déprise agricole.

Ces données expérimentales 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 sur le long terme qui permettra d'établir des références techniques et des guides de bonne conduite validés par des expérimentations sur le terrain.

# *Référence Bibliographique*

---

- A.F.E.E, 1974. Assainissement industriel et stations d'épuration des eaux usées urbaines, Paris, 122p.
- 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 organiques dans les boues résiduaires des stations d'épuration urbaines Dossier documentaire – Collection « Connaître pour agir » Guides et cahiers techniques. 209p.
- ADEME, 2001. Les boues d'épuration municipales et leur utilisation en agriculture - dossier documentaire, Angers, France.
- Albrecht R., Joffre R., Gros R., Le Petit J., Terrom G., Périsol C., 2007. Efficiency of near-infrared reflectance spectroscopy to assess and predict the stage of transformation of organic matter in the composting process. Bioresource Technology.
- Allen A, 2001. Containment landfills: the myth of sustainability. Engineering Geology, 60, 1-4, 3-19.
- Amadou H, 2007. Modélisation du séchage solaire sous serre des boues de stations d'épuration urbaines. Thèse de Doctorat : Université louis pasteur-Strasbourg 1. 222 p.
- Anderson DA, 1983. Response of the Columbian black-tailed deer to -Fertilization of Douglas Fir Forests with municipal. Sewage sludge. University of Washington, College of Forest Resources. In Forestry Abstracts 44(11): 691.
- Anne A, 1945. ANXE (P). Sur le dosage rapide du carbone organique des sols. Ann. agron. 15<sup>e</sup> année, no 2, Pp 161-172
- Archie SG., Smith M., 1981. Survival and growth of plantations in sewage sludge treated soil and older forest growth studies. Municipal Sludge Application to Pacific North- West forest lands. 41: 105-113. Edited by C.B. Bledose. University of Washington, College of Forest Resources.
- Armson KA., Sadreika V., 1974. Forest tree nursery soil. Management and related practices. Ontario Ministry of Natural Resources, Forest Management Branch. 177 p.
- Arriagada CA., Herrera MA., Ocampo JA., Beneficial., 2007. effect of saprobe and arbuscular mycorrhizal fungi on growth of Eucalyptus globulus co-cultured with Glycine max in soil contaminated with heavy metals. J Environ Manage. 84(1): 93–99.
- AtalayA., Blanchar RW, 1984. Evaluation o-F methane generator sludge as soil amendment. J. Environ. Qual13: 341-344.
- 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. n.3. pp. 7-15 .
- Bailly C., Leymarie J., Lehner A., Rousseau S., Côme D., Corbineau F., 2004. Catalase activity and expression in developing sunflower seeds as related to drying. J. Exp. Bot. 55: 475-483.

- Baize D, 1988. Les formations crayeuses redistribuées du Jovinien et les sols qui en sont issus. *Sci. Sol.*26 (2) 113-116p.
- Banerjee MR., Burton DL., Depoe S., 1997. Impact of sewage sludge application on soil biological. *Characteristics. Agriculture. Ecosystems and Environment*, 66: 241-249.
- Banerjee MR., Burton DL., Depoe S., 1997. Impact of sewage sludge application on soil biological. *Characteristics. Agriculture. Ecosystems and Environment*. 66: 241-249.
- Bascoul V, 2000. Des épandages pour la protection de la forêt contre l'incendie in: *Que faire des boues ? Une approche socio-économique du club Environnement et société*. Ecrin.
- Belmonte A, 2003. Reutilización y Reciclado de Materiales, Experiencia en Andalucía, Ed. Asociación Española de la Carretera, III Congreso Andaluz de Carreteras Madrid, Spain. 143-185.
- Belyaeva SD., KorotkovaEV., 2013. New national standards for the wastewater sludge utilization and disposal, *Novye natsionalnye standarty po ispolzovaniyu i razhmeshcheniyu osadkov stochnykh*. 5-9. 628.31.006.82.
- Benbrahim M., Denaix L., Carnus JM., Timbal J., Chossat JC., Scheifler R., Gomot de Vaufleury A., Badot PM., Tricot A., Lolive J., 2003. Effets environnementaux des épandages de boues de station dépuración en plantation de pin maritime. Dans : *Agriculture et épandage de déchets urbains et agro-industriels. Les Dossiers de l'environnement de l'INRA*. 25.Paris. pp. 35-44.
- Bengtsson M., Tillman AM., 2004. Actors and interpretations in an environmental controversy: the Swedish debate on sewage sludge use in agriculture. *Resources, Conservation and Recycling*. 42, 1, 65-82.
- Benjamin MM., Hayes KF., Leckie JO., 1982. Toxic metals from power-generation waste absorption and coprecipitation. *J. Water Control Fed.* 54: 1472-1481.
- Berry CR., Marx DH., 1980. Significance of amendments to borrow pit reclamation pine and fescue. *Reclamation Review* 3: various soil. p 87-94.
- Berry CR., MarxDH., 1980. Significance of amendments to borrow pit reclamation pine and fescue. *Reclamation Review* 3: various soils. With obloily. 87-94.
- 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.
- Bledsoe CS., Zasoski RJ., 1981. Seedling physiology of 8 tree species grown in sludge-amended soil. In *Municipal sludge application ta Pacific Northwest -Forest lands*. Édité par C.S. Bledsoe, University o-f Washington, College of Forest Resources. 93-100p.

- Boily Y., Van Puyvelde L., 1986. Screening of medicinal plants of Rwanda (Central Africa) for antimicrobial activity *Journal of Ethnopharmacology*.pp. 1-13.
- Bouriou M., Alaoui-Sosse L., Laffray X., Raouf N., Benbrahim M., Badot PM., Alaoui-Sosse B., 2014. Évaluation des eaux usées. Effets de boues sur les propriétés du sol, de croissance des plantes, des minéraux État de la nutrition, et Heavy Metal distribution en Europe Mélèze plantules (*Larix decidua*).
- Boutin P, 1987. Réutilisation des eaux usées urbaines : considérations sanitaires, réglementation in : congrès de Split (YU), 25-27 Novembre 1987, PNUE.
- Boutin, 1982. Risques sanitaires provenant de l'utilisation d'eau polluée ou de la boue de la station d'épuration en agriculture. Ed ELLIPSES. Paris, 247p.
- Boutmedjet A, 2004. La valorisation des boues résiduaires urbaines en plantation forestière dans la zone aride. Mémoire de Magister: Université Kasdi Merbah de Ouargla. 117p.
- Briat JF., Lebrun M., 1999. Plant responses to metal toxicity. *C. R. Acad. Sci. III, Sci. Vie.* 322, 43–54.
- Brockway DG, 1983. Forest floor, soil and vegetation responses to sludge fertilization in red and white pine plantations. *Sail. Soc. Am. J.* 47: 776-784.
- Brockway DG, 1983. Forest floor, soil and vegetation responses to sludge fertilization in red and white pine plantations. *Sail. Sei. Soc. Am. J.* 47: 776-784.
- Brouzes S., Chauvière F., 2009. Etude du devenir de micropolluants organiques issus des boues de station d'épuration. Rapport de projet de 3ème année en Sciences de l'Environnement, AgroParisTech, Paris, 44 p.
- Burren C, 1995. Les eucalyptus au Rwanda Analyse de 60 ans d'expérience avec référence particulière à l'arboretum RUHANDE ISAR! L'intercoopération. 454p.
- Caballero JA., Front R., Marcilla A., Conesa JA., 1997. Characterization of sewage sludges by primary and secondary pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 40-41, 433-450.
- Callot G., Dupuis M., 1980. Le calcaire actif des sols et sa signification. *Bull. AFES.* 17–26.
- Cameron KC., Di HJ., McLaren RG., 1997. Sol un dépotier approprié pour nos déchets. *Australien. Journal. La recherche du sol.* 35 (5): 995-1035.
- Caravaca F., Barea JM., Figuerola D., Roldán A., 2002. Assessing the effectiveness of mycorrhizal inoculation and soil compost addition for enhancing reforestation with *Olea europaea* subsp. *Silvestris* through changes in soil biological and physical parameters. *Appl. Soil Ecol.* 20, 107-118.
- Carbonell G., Pro J., Gomez N., Babin MM., Fernandez C., Alonso E., Tarazona JV., 2009. Sewage sludge applied to agricultural soil: Ecotoxicological effects on representative soil organisms. *Ecotoxicology and Environmental Safety.* 72: 1309-1319.

- Carbonell G., Pro J., Gomez N., Babin MM., Fernandez C., Alonso E., Tarazona JV., 2009. Sewage sludge applied to agricultural soil: Ecotoxicological effects on representative soil organisms. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 72: 1309-1319.
- Cataldo CA., Garland TR., Wildung RE., 1981. Cadmium distribution and chemical fate in soybean plants. *Plant Physiol*. 68: 835–839.
- CDER, 2014. Centre de développement des énergies renouvelables. La valorisation des boues des stations d'épuration. <http://portail.cder.dz/spip.php?article 4226>.
- CE, 2000. Prolonging for the second time the validity of Decision 1999/815/EC concerning measures prohibiting the placing on the market of toys and childcare articles.
- 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 vegetaux aquatiques: plante Lemna Minor, algue Spyrogyra Link Sp et bryophyte Fontinalis Antipyretica .*European Scientific Journal*. 11: 1857 – 7881, 1857- 7431.
- Chaney RL, 1990. Twenty years of land application research. *Biocycle*. 31: 54-59.
- Chang AC., Warneke JE., Page AL., Lund LJ., 1984. Accumulation of heavy metals in sewage sludge-treated soils. *J. Environ. Qual*. 13: 87-91.
- Chaussod R., Germon JC., Catroux G., 1981. Essai de détermination au laboratoire de l'aptitude à la minéralisation d'azote des boues résiduaires urbaines. *Compte Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 67:762-771.
- Chaussod R., Germor JC., Catroux G., 1981. Essai de détermination au laboratoire de l'aptitude à la minéralisation d'azote des boues résiduaires urbaines. *Académie d'agriculture de France*; extrait du procès-verbal de la séance du 13 mai 1981. p762-771.
- Cornfield AA, 1977. The mineralization of the nitrogen of soils during incubation: Influence of pH, total nitrogen, and organic contents. *J. Sci. Food Agric*. 3: 343-349.
- CSHPF, 1997. Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France .Section des eaux. Ministère du travail et des affaires sociales- Direction Générale de la Santé. Risques sanitaires liés aux boues d'épuration des eaux usées urbaines. Edition Lavoisier – TEC et DOC, Paris 8ème 106p (les recommandations qui concluent les différents chapitres de cet ouvrage, ont, pour la plupart, été reprises dans le décret du 8 décembre 1997 et l'arrêté du 8 janvier 1998).
- Damay N., Julien JL., 1995. Les indicateurs du statut acido-basique des sols. Station agronomique de l'Asine.
- Davidson J, 1993. Ecological aspects of Eucalyptus plantations In: *Proceedings of the regional expert consultation on Eucalyptus*. FAO. Vol. 1, pp. 35–60.
- 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.

- Degrement, 1972. Mémento technique de l'eau.TEC et DOC, 9ème éd, tome I, éd LAVASIER5, Paris, 592p.
- Degrement, 1978. Mémento technique de l'eau, 1236p- 8eme ed, 178, relié.
- Degremont, 1989.Mémento technique de l'eau : vol. 1, 9ème édition. Edition Technique et Documentation Lavoisier, pp 592.
- Denaix L., Thomas-Chéry AL., Balet J., Benbrahum M., Carnus JM., 2011. Effects of municipal sewage sludge application on soil and purple moor-grass (*Molinia caerulea*) contamination by metals in mamaritime Pine forest Water Air Soil Pollution .219 pp. 239-249.
- Dennaka T, 2011. Valorisation agricole des boues d'épuration: incidences sur le sol et sur une culture céréalière «l'orge ». Mémoire d'ingénieur: Université Ammar Tlidji de Laghouat. 52 p.
- DGF, 1997.Direction générale des forêts .Avantprojet de la loi du code forestier. Alger.
- Diehl R, 1975. Agriculture générale 2ème édition.Ballière.p231.
- Dommergue., Monogenot., 1970. mycchorizienne Association. Ed.Masson, Pp: 669-671.
- Dousset S., Morel JL., Wiart J., 1999. Influence du chaulage sur la biodisponibilité des éléments métalliques en trace incorporés au sol lors de l'épandage de boues de stations d'épuration. Etude et Gestion des Sols. 6: 105-114.
- Dousset S., Morel JL., Wiart J., 1999. Influence du chaulage sur la biodisponibilité des éléments métalliques en trace incorporés au sol lors de l'épandage de boues de stations d'épuration. Etude et Gestion des Sols, 6: 105-114.
- 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 P, 1990. Les systèmes de traitements des boues des stations d'épuration des petites collectivités .Documentation technique du FNDAE n° 09. p8-9.
- Dunigan E P., Dick RP., 1980 . Nutrient and coliform losses in runoff from fertilized and sewage sludge-treated soil.. J. Environ. Qual. 9: 243-250.
- During R., Gath S., 2002. Utilization of municipal organic wastes in agriculture: where do we stand, where will we go? Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 165: 544-556.
- Dutch J., Wolstenholme R., 1994.The effects of sewage sludge application to a heathland site prior to planting with Sitka spruce. For. Ecol. and Man. 66:151-16.
- E. P. A, 1979. Sludge treatment and disposal. Process design manual. EPA-625/1-79-011. 952 p.
- E.P.A, 1983. Land application of municipal sludge. Process design manual. EPA-625/1-83-016. 466 p.
- E.P.A., 1977. Land treatment of municipal. Wastewater. Process design manual. EPA 625/1-77-008. 577 p.
- Eckenfelder W, 1982. Gestion des eaux usées urbaines et industrielles. Caractérisation Techniques d'épuration .Aspects économiques. L. Vandevenne, (trad.) xiv, Tec et Doc Lavoisier, Paris, 503 p.

- Ecrin, 2000. Que faire des boues? (What doing with sludge?). Club Environnement et Société, w.w.w.ecrin.asso.fr.
- El-Fadel, M., Khoury, R., 2000. Modeling Settlement in MSW Landfills: a Critical Review. *Critical Reviews in Environ. Sci. Technol.* 30, 3, 327-361.
- 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*. 5: 422-426.
- 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*, 5: 422-426.
- Fine P., Rathod PH., Beriozkin A., Mingelgrin U., 2013. Uptake of cadmium by hydroponically grown, mature *Eucalyptus camaldulensis* saplings and the effect of organic ligands. *Int J Phytoremediation*. 15(6):585-601.
- Fischesser, 1996. *Le guide illustré de l'écologie*. Ed. La Martinière, p319.
- Fiskell GA., Martin FG., Pritchett WL., Maftoun., 1982. Effects of cadmium levels and sludges on the growth of pine seedlings. *Soils and Crop Science Society of Florida, Proc. Vol. 41, Soil. Sci. Dept. Univ. of Florida, Gainesville. p. 163-168.*
- Fliessbach A., Martens R., Reber HH., 1994. Soil microbial biomass and microbial activity in soils treated with heavy metal contaminated sewage sludge. *Soil Biology and Biochemistry*. 26:1201-1205.
- Fliessbach A., Martens R., Reber HH., 1994. Soil microbial biomass and microbial activity in soils treated with heavy metal contaminated sewage sludge. *Soil Biology and Biochemistry*. 26:1201-1205.
- FRANCE, 2001. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques *Rapport sur les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé*. Rédacteur : MIQUEL G. Paris : Assemblée nationale, Sénat. 360p.
- Gagnon J D, 1972. Les égouts domestiques: un engrais valable en foresterie. Édité par Environnement Canada, Centre de recherches forestières des Laurentides, Québec. Rapport Q-F-X-30. 13 p.
- Gagnon JD, 1974. Results of fertilizer experiments in Quebec. Proc. of a work shop on forest fertilization in Canada. Sault-Sainte-Marie, Ontario. Édité par Environnement Canada, Service des forêts. p. 83-91.
- Gamrasni MA, 1979. Utilisation agricole des boues résiduelles d'origine urbaine. p 73-92.
- García DM., Rodríguez CM. S., Lorenzo L F., Arienzo M.; Sánchez M J., 2007. Seasonal and time variability of heavy metal content and of its chemical forms in sewage sludge from different wastewater treatment plants. *Science of the Total Environment*. 382: 82-92.
- Garrec N., Picard-Bonnaud F., Pourcher AM., 2003. Occurrence of *Listeria* sp. and *L. monocytogenes* in sewage sludge used for land application: effect of dewatering, liming and storage in tank on survival of *Listeria* species. *FEMS Immunol. Med. Microbiol.*, 35, 3, 275-28.

- Glemas P, 1980. Fertilisation boue, gadoue, composts de finition fabrication et caractéristique. Revue cultivar n° 132: 44-51.
- Gouin FR., Walker JM., 1977. Deciduous tree seedling response to nursery soil amended with composted sewage sludge. HortScience .12: 45-47.
- Grenier, 1989. La valorisation des boues d'origine urbaines. Ed A.F.E.E, Paris, 128p.
- Guckert A., Kienzler L., Morel JL., 1982. Etude de l'action à long terme de boues résiduaires urbaines chaulées riches en métaux lourds sur les propriétés d'un sol à fort complexe absorbant et sur les productions végétales. C.R. Contrat d'Etude n° 78-131, Ministère de l'Environnement.
- Guerf Z, 2012. Impact de l'utilisation des boues résiduaires sur les propriétés physico-chimique des sols de la haute Vallée de la Medjerda willaya de Souk Ahras. Mémoire de Magister. Université Badji Mokhtar d'Annaba. 73 p.
- Guerrero FD., Davey RB., Miller RJ. 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.
- Guibelin E, 1999. Lutte contre la pollution des eaux .classification des boues d'épuration. TEC-ing, traité environnement, NANCIE.
- Guy Atlan M, 2003. Les boues d'épuration leurs perspectives de gestion en Ile de France. Thèse, doctorat, Paris. 128p.
- Handreck KA, 1994. Effect of pH on the uptake of cadmium, copper, and zinc from soilless media containing sewage sludge. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 25, 11-12 : 1913-1927.
- Henin S., Gras R., Monnier G., 1969. Le profil cultural. Masson Ed (2), Paris. Kearer P., Brooks M., Hill I., 2002. An introduction to Geophysical Exploration. Blackwell Science (3), 183-207.
- Henriët B, 2010. Impact des boues d'épuration sur la conservation du sol et l'amélioration des rendements d'une culture de céréale à Laghouat, Algérie. Mémoire de bio-ingénieur Université catholique de Louvain. 122 p.
- Horswell J., Weitz H. J., Percival H.J; Speir T.W., 2006. Impact of heavy metal amended sewage sludge on forest soils as assessed by bacterial and fungal biosensors. Biology and fertility of soils. 42: 569-576.
- 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 KHA., Hassan AF., Abdel-Hady ES, 2010. Study of sewage sludge use in agriculture and its effect on plant and soil. Agriculture And Biology Journal Of North America. 1: 1044-1049.
- IARC, 1987. Agence internationale pour la Recherche pour le Cancer. Cadmium and cadmium compounds (group 2A), IARC Ed, Lyon, suppl. 7, 139-141.

- Imai T., Li B., Reungsang A., Kaewkannetra P., 2010. Effects of mineral nutrients with biowaste compost as soil conditioner for farmland. *KKU Research Journal*, 15: 818-825.
- Jamonet B, 1987. Le traitement des boues résiduaires. Univ des sciences du Langue doc, Montpellier. 10p.
- Jarde E, 2002. Composition organique des boues résiduaires des stations d'épuration lonaines ; caractérisation moléculaire et effets de la biodégradation. Thèse, doctorat. Univ. Henri Poincaré, Nancy I en sciences de l'univers. 286p.
- 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.
- Jarosz J, 1985. Le traitement des boues stations d'épuration. Centre de formation et documentation sur l'environnement industriel, Marseille.
- Juste C., Chassin P., Gomez A., Linères M., Mocquot B., 1995. Les micropolluants métalliques dans les boues résiduaires des stations d'épuration urbaines. ADEME Editions .Paris. 209 p.
- Juste C., Solda P., 1979 .Effets d'applications massives de boues urbaines riches en cadmium et en nickel sur une monoculture intensive de maïs. In: First European Symposium Treatment and use of sewage sludge. Alexandre R, Ott H (eds). 372-382.
- Kabata-Pendias A., Pendias H., 1992. Trace elements in soils and plants. CRC Press, Boca Raton, Florida, 2nd Edition, 209 p.
- Kabata-Pendias A., Pendias H., 2000. Trace elements in soils and plants. CRC Press, Boca Raton, New York, 3rd Edition, 431p.
- 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.
- King DJ., Doronila AI., Feenstra C., Baker AJM., Woodrow IE.,2008. Phytostabilisation of arsenical gold mine tailings using four Eucalyptus species: Growth, arsenic uptake and availability after five years. *Sci Total Environ.* 406 (1-2): 35-42.
- Kjeldsen P., Barlaz MA., Rooker AP., Baun A., Ledin A., Christensen TH., 2002. Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review. *Critical Reviews in Environ. Sci. Technol.* 32, 4, 297-336.
- Klöpffer W, 1996. Environmental hazard assessment of chemicals and products. Part V. Anthropogenic chemicals in sewage sludge. *Chemosphere*, 33, 1067-1081.
- Koller E, 2004. Traitement des pollutions industrielles .Ed, Dunod. Paris PP59-90.
- 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 d'un vignoble du
- Kormanik RA, 1977. Technologie transfer seminar on sludge handling and disposal.
- Kozlov MN., Grachev VA., Khramenkov SV., Shchegolkova NM., Vanyushin A Ya., Agaryov

AM., 2012. The use of soils with addition of water and wastewater sludge for industrial crop cultivation .Ispolzovaniye pochvogruntovs vneseniyem osadkov sooruzheniy ochistki stochnykh vod i vodopodgotovki dlya vyrashchivaniya tehnikeskikh kultur.10:72-77.

- Lagerwerff JV., Biersdorf GT., Milberg RP., Brower DL., 1977. Effects of incubation and liming on yield and heavy metal uptake by rye from sewage-sludged soil. *J. Environ. Qual.*, 6, 4: 427-431.
- Lega R., Ladwig G., Meresz O, Clement RE., Crawford G., Salemi R., Jones Y., 1997. Quantitative determination of organic priority pollutants in sewage sludge by GC/MS. *Chemosphere*, 34, 1705-1712.
- 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.
- Letacon F., Garbaye J., Clement A., 1979. Possibilité d'utilisation des boues résiduaires de stations d'épuration urbaines en sylviculture: effet sur les sols et les eaux de drainage. *Proceedings of the first European symposium on the treatment and use of sewage sludge.* p. 291-308.
- Looser MO., Parriaux A., Bensimon M., 1999. Landfill underground pollution detection and characterization using inorganic traces. *Water Research*, 33, 17, 3609-3616.
- LosadaMRM.,Rodriguez AR., Dominguez NF., 2012. Residual effects of lime and sewage sludge inputs on soil fertility and tree and pasture production in a *Pinus radiata* D. Don silvopastoral system established in a very acidic soil *J. Agric. Ecosyst. Environ.* 161:12.pp. 165-173.
- Luo, YM.,Christie P., 1995. Some short-term effects of a lime stabilized sewage sludge applied to arable and forest soils. *Irish J. Agric. Food Res.* 34:78.
- Madejon P., Marañón T., NavarroFernandezCM., Dominguez MT.,Alegre JM., Robinson B., Murillo JM., 2017.Potential of *Eucalyptus camaldulensis* for phytostabilization and biomonitoring of trace-element contaminated soils. *PLoS ONE* 12(6):e0180240.
- Maksimova S., Kosourova D., Pesheva A., 2015. Recycling of wastewater treatment plants Sludge in urban landscaping in west Siberia *J. Sci. Direct.* 117. pp. 232-238.
- Mälkönen E., Derome J., Fritze H., Helmisaari HS., Kukkola M., KytöM., Saarsalmi, A., Salemaa M., 1999. Compensatory fertilization of Scots pine stands polluted by heavy metals. *Nutrient Cycling in Agroecosystems.* 55: 239–268.
- Martinez F., Cuevas C., Walter T., Iglesias I., 2002. Urban organic wastes effects on soil chemical properties in degraded semiarid ecosystem. In: *Seventeenth WCSS, Symposium No. 20, Thailand.* pp. 1-9.
- Marttinen SK., Kettunen RH., Rintala JA., 2003. Occurrence and removal of organic pollutants in sewages and landfill leachates. *The Science of the Total Environment*, 301, 1-12.
- Mathian, 1980. Valorisation des boues résiduaires de la station d'épuration urbaine en sylviculture, conséquence sur l'environnement- INP- Lorraine, 44p.

- Mathieu C., Pielain F., 2003. Analyse chimique des sols : Méthodes choisies. Lavoisier 386p.
- Maydell HJV, 1990. Trees and shrubs of the Sahel. Their characteristics and uses. GTZ (Deutsche Gesellschaft Technische Zusammenarbeit. 525p.
- McIntosh MS., Foss JE., Wolf DC., Brandt KR., Darmody R., 1984. Effect of composted municipal. Sewage sludge on growth and elemental. Composition of white pine and hybrid poplar. J. Environ. Qual. 13: 60-62.
- McKay-Moffat S., Cunningham C., 2006. Services for women with disabilities: mothers' experiences. British Journal of Midwifery. 14(8) 472-7.
- Meinck F., Stoff H., Kohlschutter H., 1977. Les eaux résiduaires industrielles, 2ème Ed. Masson, Paris, 863p.
- Mininni G, Sbrilli A, Guerriero E, Rotatori M., 2004. Dioxins and furans formation in pilot incineration tests of sewage sludge spiked with organic chlorine. Chemosphere, 54, 1337-1350.
- Moffett BF., Nicholson FA., Uwakwe NC., Chambers BJ., Harris JA., Hill TCJ., 2003. Zinc contamination decreases the bacterial diversity of agricultural soil. FEMS Microbiology Ecology, 43: 13-19.
- 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.
- Montcharmont A, 1999. Les risques sanitaires liés à l'épandage de boues de stations d'épuration urbaines. Thèse Méd. Vét. Université Claude Bernard, Lyon . 31, 113p.
- Morel C., Linères M., Guivarch A., Kvarnström E., Parnaudeau V., Nicolardot B., Morel JL., 2003. Phytodisponibilité et valeur fertilisante du phosphore de déchets urbains. Agriculture et épandage de déchets urbains et agro-industriels. Les dossiers de l'environnement de l'INRA n°25. Paris. 154 p.
- Morel J L, 1977. Contribution à l'étude de l'évolution des boues résiduaires dans le sol. Thèse de Docteur Ingénieur, Université de Nancy 1, France. p 117.
- Morel JL., Pierrat JC., Guckert A., 1988. Effet et arrière-effet de l'épandage de boues urbaines conditionnées à la chaux et au chlorure ferrique sur la teneur en métaux lourds d'un maïs. Agronomie, 8, 2: 107-113.
- Murillo M, 2004. Caractérisation de l'Effet d'un Traitement au Peroxyde d'Hydrogène sur une Boue - Application la Réduction de la Production de Boue', Thèse de doctorat, INSA Toulouse.
- Myburg AA., Grattapaglia D., Tuskan GA., Hellsten U., Hayes RD., Grimwood J., 2014. The genome of *Eucalyptus grandis*. Nature. 510 (7505).
- Nammari DR., Hogland, W., Marques M., Nimmermark S., Moutavtchi V., 2004. Emissions from a controlled fire in municipal solid waste bales. Waste Management, 24, 9 18.

- Navas A., Bermudez F., Machin J., 1998. Influence of sewage sludge application on physical and chemical properties of Gypsisols. *Geoderma*, 87, 123-135. Osburn, Q.W. (1986) Analytical methodology for linear alkylbenzene sulfonate (LAS) in waters and wastes. *Journal of American Soil Chemistry Society*. 63, 257-263.
- Nèble S., Calvert V., Le Petit J., Criquet S., 2007. Dynamics of phosphatase activities in a cork oak litter (*Quercus suber* L.) following sewage sludge application. *Soil Biology and Biochemistry*, 39: 2735-2742.
- Nguyen N, 2004. The Eucalyptus et environnement, Lettre d'information semestrielle sur l'eucalyptus n03V2 AFOCEL Station Sud Domaine de Saint Clément 34980 St Clément de Rivière. 4p.
- Nogueira TAR., Melo WJ., Fonseca IM., Melo GMP., Marcussi SA., Marques MO., 2009. Nickel in soil and maize plants grown on an oxisol treated over long time with sewage sludge. *Journal of Chemical Speciation and Bioavailability*. 21: 165–173.
- Nogueira TAR., Melo WJ., Fonseca IM., Melo G M P., Marcussi SA., Marques MO., 2009. Nickel in soil and maize plants grown on an oxisol treated over long time with sewage sludge. *Journal of Chemical Speciation and Bioavailability*. 21: 165–173.
- Ñna JD., Osorio F., 2006. Application of sludge from urban wastewater treatment plants in road's embankments. *J. Hazard. Mater. B*, 131 .pp. 37-45.
- ONA, 2008. Office National d'Assainissement. La station d'épuration de la ville de Tiaret. 13 p + Annexes.
- ORDIF, 2003. Observatoire régional des déchets d'Île de France. L'actualité des boues de stations d'épuration en Ile de France, compte rendu de la journée technique d'information et d'échanges.
- Ouali MS, 2001. Cours de procédés unitaires biologiques et traitement des eaux. Ed I.S.B.N, Alger, 156p.
- Paglia M., GUIOI G., Lamarca M., Giacchetti M., Lucamente G., 1981. Effects of sewage sludges and composts on soil. Porosity and aggregation. *J. Environ. Qual.* 10: 556-561.
- Pagliai M., Antisari L., 1993. Influence of waste organic matter on soil micro and macrostructure. *Bioresource Technol.* 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*, 122: 163-182.
- Patrick JH., Smith OW., 1975. Forest management and nutrient cycling in eastern hardwoods. *N.E. Forest. Res. Exp. Stn.* , Upper Oarby, PA. 12 p.
- Pérez S., Guillamón M., Barceló D., 2001. Quantitative analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in sewage sludge from wastewater treatment plants. *Journal of Chromatography A*, 938, 1-2, 57-65.

- Petit KMB, 2007. Actulisation des connaissances sur les elements biologiques et minnéraux persistants das les boues des stations d'épuration.impact sur la santé publiques.These de Doctorat: Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort.141p.
- Piccolo A., Zaccheo P., Genevini PG., 1992.Chemical characterization of humic substances extracted from organic-waste-amended soils. *Bioresource Technology*. 40, 275-282.
- Pisson C, 2000. Impact de l'épandage agricole des boues résiduaires urbaines sur la qualité des productions céréalières en particulier sur l'aspect des éléments traces métalliques. Mémoire d'Ingénieur. Ecole Nationale de la Santé Publique. Paris.102 p.
- Planquart P., Bonin G., Prone A., Massiani C., 1999. Distribution, movement and plant availability of trace metals in soils amended with sewage sludge composts: application to low metal loadings. *Science of the Total Environment*. 241: 161-179.
- Planquarta P., Boninb G., Pronea A., Massiania C., 1999. Distribution, movement and plant availability of trace metals in soils amended with sewage sludge composts: application to low metal loadings.
- Pommel B, 1979. La valorisation agricole des déchets: Les boues résiduaires urbaines. Ministère de l'Agriculture. Institut National de la Recherche Agronomique (INRA). Station d'agronomie de Bordeaux. 70 p.
- Poupon H, 1972. Description des appareils aérien et souterrain d'Eucalyptus camaldulensis Dehn. introduit en Tunisie du nord. *Cak. ORSTOM, Sér. Biol.* 17, 47-59.
- Prasad MN., Oliveira FHM., 2003. Metal hyperaccumulation in plants: biodiversity prospecting for phytoremediation technology. *Electronic Journal of Biotechnology*, 6(3), 285-321.
- Prevot H,2000.La récupération de l'énergie issue du traitement des déchets. Rapport du Conseil général des mines.
- Reddy GB., Faza A., Bennett R., 1987. Activity of enzymes in rhizosphere and non- rhizosphere soils amended with sludge. *Soil Biology and Biochemistry*, 19: 203-205.
- Reed BE., Carriere PE., Matsumoto MR., 1991. Applying sludge on agricultural land.*Biocycle*. 32: 58-60.
- Riekerk H, 1982. How much sewage nitrogen on forest soil.s? A case history. *BioCycle* 23(1): 53-56.
- Riekerk H, 1982. How much sewage nitrogen on forest soils? A case history. *BioCycle*. 23(1): 53-56.
- Roberge MR.,Gagnon JD.,Ling CH., 1980. Dosage d'azote dans trois sapinières 60 ans au Québec: résultats de 10 ans. *Can. J.* 470-475.
- Roy M., Couillard D., 1997. Use of municipal sewage sludge for the fertilization of forests. Mobility of metals and the risk of surface- and ground-water contamination. *Revue des sciences de l'eau*, 4: 507-525.

- Rumphorst MP., Ringel H.D., 1994. Pyrolysis of sewage sludge and use of pyrolysis coke. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 28, 137-155.
- Sahlström L., Aspan A., Bagge E., Tham MLD., Albiñ A., 2004. Bacterial pathogen incidences in sludge from Swedish sewage treatment plants. *Water Research*, 38, 1989-1994.
- 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.
- 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.
- Schneider KR., R.F. WITTEWER et S.B. CARPENTER, 1981. Trees respond to sewage sludge in reforestation of a despoil.. *Symposium on surface mining hydrology, sedimentology and reclamation, University of Kentucky.* p. 291-296.
- SECF, 2010. Situación de los bosques y del sector forestal en España. *Sociedad Española de Ciencias Forestales.*
- Sidle RC., KardosLT., 1977. Transport of heavy metals in a sludge-treated forested area. *J. Environ. Qual.* 6: 431-437.
- Sikora LJ., Enkir NK., 1999. Growth of tall fescue in compost/fertilizer blends. *Soil Sci.* 164: 62-69.
- Sims JT., Kline JS., 1991. Chemical fractionation and plant uptake of heavy metals in soils amended with co-composted sewage sludge. *J. Environ. Qual.* 20: 387-395.
- Singh RP., Agrawal M., 2008. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management.* 28: 347-358.
- Singh RP., Agrawal M., 2008. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management.* 28: 347-358.
- Singh RP., Agrawal M., 2008. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management.* 28(2), 347-358.
- Singh RP., Agrawal M., 2008. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management.* 28: 347-358.
- Smith SR, 1992. Sewage sludge and refuse composts as peat alternatives for conditioning impoverished soils: effects on the growth response and mineral status of *Petunia grandiflora*. *Journal of Horticultural Sciences.* 67: 703-716.
- Smith SR, 1992. Sewage sludge and refuse composts as peat alternatives for conditioning impoverished soils: effects on the growth response and mineral status of *Petunia grandiflora*. *Journal of Horticultural Sciences,* 67: 703-716.
- Sommers LE, 1977. Chemical composition of sewage sludges and analysis of their potential use as fertilizers. *Journal of Environmental Quality*, 6, 225-232.

- Sommers LE., Nelson DW., 1978. Analyses and their interpretation for sludge application to agricultural land. In Application of sludge and wastewater; a planning and educational guide. E. P. A.235. p. 3.2-3.12.
- Sposito G., Lund LJ., Chang AC., 1982. Trace metal chemistry in arid zone field soils amended with sewage sludge : 1. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in solid phases. Soil Sci Soc. Am. J., Vol. 46, p. 260-264.
- St-yves A, 1984. La valorization 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.
- Sud de la France. Étude et Gestion des Sols. Vol. 8. n. 3. pp. 203-210.
- Terce M, 2000. Les impacts de recyclage des boues de station d'épuration. Ed INRA, Paris. 10p.
- Terce M, 2002. Eléments de recherche sur l'impact de l'épandage des boues In : Quelles évolutions technologiques pour mieux garantir et pérenniser une gestion optimale des boues ?. Rencontres Techniques Nationale. Toulouse. Albi : Ecole des Mines d'Albi Carmaux, 143-150.
- Thomas AL., Carnus JM., Denaix L., Gautry JY., Bailly A., Thiberville F., 2004. Le réseau « ERESFOR » : Epandage de Produits Résiduaire sur Parcelles Forestières. Dispositifs expérimentaux Et outils d'acquisition de références agro- environnementales : Retour au sol des matières organiques .Paris.
- Vademicum, 1990. Références à l'usage des inspecteurs chargés de la protection de l'environnement. Edition ministère de l'intérieur.
- Weemaes MPJ., Verstraete WH., 1998. Evaluation of current wet sludge disintegration techniques. J. Chem. Technol. Biot. 73, 83-92.
- Weier TE., Stoking CR., Barbour MG, 1974. Botany, an introduction to plant biology. John Wiley and Sons, New York, 5e édition. 693 p.
- Werther J., Ogada T., 1999. 'Sewage sludge combustion', Prog. Energy Combust. Sci., vol. 25, pp. 55-116.
- Werther J., Ogada T., 1999. Sewage sludge combustion. Progress in Energy and Combustion Science, 25 55-116.
- Wiche O., Kummer NA., Heilmeyer H., 2016. Interspecific root interactions between white lupin and barley enhance the uptake of rare earth elements (REEs) and nutrients in shoots of barley. Plant Soil, 402 pp. 235-245.
- Wisniewski L., Dickinson NM., 2003. Toxicity of copper to Quercus robur (English Oak) seedlings from a copper-rich soil. Environmental and Experimental Botany 50: 99-107.

## Résumé

Le traitement des eaux usées produit une grande quantité de boues. Les différents usages d'éliminations telles que les décharges ou l'incinération et l'utilisation agricole ont des conséquences négatives pour l'environnement. La valorisation en utilisant des plantations forestières, peut apparaître dans certaines situations comme une alternative aux solutions actuelles, pour à la fois optimiser la dégradation et le recyclage des éléments organiques et minéraux. La fertilisation des plantes forestières par les boues de STEP, présente un risque moins élevé de contamination de la chaîne alimentaire humaine que leur utilisation en agriculture. Dans ce contexte, l'utilisation des plantations forestières peut offrir de nombreux avantages par rapport à des systèmes de valorisation purement agricole. L'objectif de cette étude est d'évaluer les caractéristiques fertilisantes des boues de la station de traitement des eaux usées de Tiaret et d'améliorer la qualité du sol étudié. Les plants *Eucalyptus camaldulensis* d'un an ont été transplantés dans des pots avec 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 mesures biométriques des plantes (hauteur, diamètre de base, diamètre à mi-hauteur et nombre de feuilles) ont été effectuées au cours des six mois suivant la plantation. Les résultats ont démontré l'effet positif de l'application des boues sur les paramètres du sol étudié. Nous avons constaté également une différence significative dans l'augmentation de la hauteur et le nombre de feuilles dans les plantes traitées par des boues. Les valeurs biométriques pour tous les mélanges de boues étaient plus élevées que celles des plantes témoins (100% de sol). Le substrat de 60% boue, donne le meilleur résultat, à l'exception du diamètre de tige, avec une hauteur moyenne de  $49,4 \pm 24,1$  cm et un nombre moyen de feuilles  $68,8 \pm 6,2$  tandis que la hauteur moyenne pour les plantes témoins, était de  $34,3 \pm 12,8$  cm et le nombre moyen de feuilles était de  $40 \pm 3,8$ . L'apport de boues fournit une modification du sol et une alimentation nutritive supplémentaire pour la plantation forestière.

**Mots-clés:** fertilisation, mesures biométriques, croissance des plantes, recyclage et alimentation nutritive, plantation forestière.

## Abstract

Wastewater treatment produces a large amount of sludge. The different uses of disposal such landfills or incineration and agricultural use, have a negative consequences for the environment. A valorisation using forest plantations may appear in some situations as an alternative to current solutions, it optimize the degradation and recycling of organic and mineral elements. The fertilization of forest plants by STEP's sludge, presents a low risk of contamination of the human food chain than their use in agriculture. In this context, the use of

forest plantations can offer many advantages. The objective of this study is to evaluate the fertilizing characteristics of the sludge from the Tiaret wastewater treatment plant and to improve the quality of the soil studied. The one-year-old *Eucalyptus camaldulensis* were transplanted into pots with mixtures of sludge and soil, where the sludge content was 20%, 40% and 60%. The physico-chemical measurements of the substrates and the biometric measurements of the plants (height, base diameter, diameter mid-height and number of leaves) were carried out within six months of planting. The results demonstrated the positive effect of sludge application on soil parameters studied. We also found a significant difference in the increase of height and the number of leaves in plants treated with sludge. Biometric values for all plants in sludge mixtures, were higher than those for control plants (100% soil). The 60% sludge substrate yielded the best results, with the exception of the stem diameter, with an average height of  $49.4 \pm 24.1$  cm and an average number of leaves  $68.8 \pm 6.2$  while the mean height for control plants was  $34.3 \pm 12.8$  cm and the mean number of leaves was  $40 \pm 3.8$ . The addition of sludge provides soil modification and supplementary feeding for forest planting.

**Keywords:** fertilization, biometric measurements, plant growth, recycling and nutritive feeding, forest plantation

## ملخص

معالجة المياه المستعملة تنتج كمية كبيرة من الحمأة، وإن مختلف الاستعمالات من أجل استبعادها مثل المفرغات أو الحرق والاستعمال الفلاحي لهم نتائج سلبية على البيئة. وإن التقييم باستعمال ( الزراعة الغابية) يمكن في بعض الحالات أن تكون كبديل للحلول الحالية، لكي في نفس الوقت تحسين التحلل وإعادة التدوير للعناصر العضوية والمعدنية. إن إخصاب النباتات الغابية عن طريق حماة محطات تصفية المياه (STEP) تمثل مخاطر أقل تلوينا للسلسلة الغذائية البشرية إذا استعملت في الفلاحة، في هذا السياق، إن استعمال المزارع الغابية يمكن أن يمنح الكثير من المزايا بالنسبة الى نظام التقييم الزراعي البحث. هدف هذه الدراسة هو تقييم خصائص التسميد بحماة محطة المعالجة للمياه المستعملة لتيارات وتحسين نوعية التربة محل الدراسة. ان نباتات الايكالبتوس وكمالدينسيس التي لها سنة قد تم زرعها في علب مع خليط الحمأة والتربة أين محتوى الحمأة كان 20% ، 40%، و 60%. إن القياسات الفيزيوكيميائية للمواد والقياسات البيومترية للنباتات (الارتفاع، قاعدة القطر، قطر منتصف الارتفاع، وعدد الأوراق) نفذت خلال السنة أشهر الموالية للزراعة.

وقد أظهرت النتائج التأثير الايجابي لتطبيق حماء على معلمات التربة محل الدراسة، وقد وجدنا كذلك فرق كبير في زيادة الارتفاع وعدد الأوراق على كل النباتات المعالجة بالحماة. إن القيم البيومترية لكل مخاليط الحماة كانت جد مرتفعة مقارنة بنباتات المرجع (100% من التربة).

القوام التي تحتوي على 60% من الحماة تمنح أحسن النتائج باستثناء قطر الجذع مع ارتفاع متوسط بـ  $49.4 \pm 24.1$  سم والعدد المتوسط من الأوراق يقارب  $68.8 \pm 6.2$  بينما ارتفاع نباتات المزرعة على التربة كانت بـ  $34.3 \pm 12.8$  سم وعدد الأوراق يقارب  $40 \pm 3.8$  سم.

مساهمة الحماة زادت في تغيير التربة والمكملات الغذائية للنباتات الغابية.

**الكلمات المفتاحية:** تسميد، قياسات بيومترية، نمو النباتات، إعادة التدوير المكملات الغذائية، النباتات الغابية.