

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOU MAMMARI DE TIZI-OUZOU
Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques
Département des Sciences Agronomiques



Mémoire de fin d'étude



En vue de l'obtention du diplôme de Master en Agronomie

Spécialité : Production végétale

Thème

*Evaluation des teneurs en phosphore et en
potassium assimilables des boues urbaines
pour l'amendement des sols agricoles de Tizi-
Ouzou.*

Réalisé par :

M^r FILALI Samir

Devant le jury composé de :

Présidente : M^{me} Bourbia S. MCA UMMTO

Promotrice : M^{me} Omouri O. MAA UMMTO

Examineur : M^r Tebib M. MAA UMMTO

Promotion : 2018/2019

Remerciements

*Je tiens tous d'abord à exprimer ma très grande gratitude et ma reconnaissance la plus sincère à **Mme OMOURI O** (M.A.A) qui a dirigé ce travail et avoir su m'apporter l'encadrement nécessaire à sa réalisation.*

*Mes remerciements vont également à **Mme BOURBIA S**(M.C.A) pour avoir accepté de présider notre jury.*

*Mes reconnaissances vont également à monsieur **TEBIB Mustapha** (M.A.A) pour ses conseils qui ont toujours été d'une aide très précieuse et d'avoir accepter de juger notre travail.*

Mes vifs remerciements vont à tous ceux qui ont collaboré à l'achèvement de ce travail particulièrement à ma famille.

Dédicace

Je dédis ce travail à :

A mes parents et ma famille ;

A mes frères ;

A tous mes amis ;

A tous ceux qui me sont chers ;

Liste des abréviations

ADP : Adénine di-phosphatés

AL : Aluminium

ATP : Adénine tri-phosphatés

A.N.R.H : Agence Nationale de Ressource Hydraulique

ADEME : Agence de l'Environnement et la Maîtrise de l'Energie, France

AFNOR : Association Française de Normalisation

B : Bore

°C : Degrés Celsius

C : Carbone

C/N : Rapport du taux de carbone sur le taux d'azote

Ca : Calcium

Cd : Cadmium

CaCO₃ : Calcaire total

DBK : Draa Ben Kheda

CE : Conductivité électrique

CET : Centre d'Enfouissement Technique

cm : Centimètre

CTO : Composé trace organique

Cr : Chrome

Cu : Cuivre

DBO₅ : Demande biochimique en oxygène sur cinq jours

DCO : Demande chimique en oxygène

DEM : Draa El Mizane

EH : Equivalent Habitant

ENITA : Ecole nationale d'ingénieurs de travaux agricoles

Eq/hab : Equivalent par habitant

ETM : Eléments Traces Métalliques

Fe : Fer

F.A.O : Food and agriculture organization, (organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture)

FV : Fraction volatile

g : Gramme

g/ha : Gramme par hectare

g/t : Gramme par tonne

ha : Hectare

Hg : Mercure

IAURIF : Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Ile-de-France

K : Potassium

Kg : Kilogramme

Km : Kilomètre
L : Litre
M³/j : Mètre cube par jour
mg : Milligramme
ml : Millilitre
M³ : Mètre cube
MES : Matière en suspension
MF : Matière fraîche
Mg : Magnésium
MO : Matière organique
Moy : Moyenne
MS : Matière sèche
MV : Matières volatiles
N : Azote
NH₃ : Azote nitrique
NH₄⁺ : Azote ammoniac
Ni : Nickel
NO : Oxyde d'azote
NO₂⁻ : Nitrites
NTK : Azote total kjeldhal
ONA : Office National d'Assainissement
P : Phosphore
Pb : Plomb
P₂O₅ : Phosphore assimilable
pH : Potentiel d'hydrogène
ppm : Partie par million
R₁, R₂, R₃ : Répétitions 1, 2, 3
STEP : Station traitement des eaux polluées
S : Siccité
Si : Silicium
T : Tonne
Zn : Zinc
% : Pourcentage

Liste des figures:

N°	Titre	Pages
Figure: 01	Schema de fonctionnement d'une station d'épuration	6
Figure: 02	Répartitions des stations d'épuration en Algérie selon leur procédé de traitement	7
Figure: 03	Classification des métaux en fonction de leur dangerosité et de leur intérêt agronomique	19
Figure: 04	Part de l'épandage agricole des boues dans le monde	23
Figure: 05	Transformation du carbone dans le sol	28
Figure: 06	Transformation de l'azote dans le sol	30
Figure: 07	Transformation du phosphore dans le sol	31
Figure: 08	Différentes formes et localisation des ETM dans les sols	33
Figure: 09	Situation géographique de la wilaya de Tizi-Ouzou	36
Figure: 10	Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен pour la période janvier 2018- septembre 2019.	40
Figure: 11	Localisation des STEP de la wilaya de Tizi-Ouzou	42
Figure: 12	pH mètre	44
Figure: 13	Solution de la gamme étalon	46
Figure: 14	Filtration	47
Figure: 15	Effervescence et coloration bleue après l'ajout de réactif chloro-molybdique	47
Figure: 16	Bain marie	48
Figure: 17	Spectrophotomètre	48
Figure: 18	pH moyen des boues étudiées (Tizi-Ouzou)	52
Figure: 19	Teneur de potassium assimilable des boues de différentes stations étudiées	54
Figure:20	Teneur de phosphore assimilable des boues de différentes stations étudiées	56
Figure:21	Teneur en métaux lourds des boues de différentes stations étudiées	57

Liste des tableaux:

Tableau	Titre	Pages
Tableau 01	Répartitions des stations d'épuration en Algérie selon leur procédé de traitement	7
Tableau 02	Composition en éléments utiles de cinq grands types de boues utilisées en agriculture	13
Tableau 03	Coefficient d'efficacité directe de l'azote des boues (dans le sol), selon le type de boue.	14
Tableau 04	Caractérisation de l'état de phosphore (soluble ou insoluble) dans les boues.	15
Tableau 05	Composition comparée des boues et du fumier de ferme	17
Tableau 06	Teneur de quelques engrais et produits organiques en ETM (Fourchette de variation en g /T de matière sèche).	18
Tableau 07	Composés traces organiques	20
Tableau 08	Seuils de références pour les teneurs en micro-organismes pathogènes dans les boues hygiéniques	20
Tableau 09	Sensibilité aux ETM de différents végétaux cultivés	25
Tableau 10	Seuils de carence / phytotoxicité de différents végétaux cultivés	26
Tableau 11	Teneurs limites en ETM actuelles et à long terme retenues par la commission européenne et les flux maximums cumulés apportés par les boues en 10 ans	34
Tableau 12	Températures moyennes mensuelles de la Wilaya da Tizi-Ouzou (2018 -2019)	38
Tableau 13	Précipitations moyennes mensuelles de la Wilaya da Tizi-Ouzou (2018 -2019)	39
Tableau 14	Taux d'humidité moyens mensuels (année 2018 -2019)	39
Tableau 15	Caractéristiques fonctionnelles des STEP de la wilaya de Tizi-Ouzou	43
Tableau 16	Résultats de pH des boues des différentes stations étudiées	51
Tableau 17	Résultats des teneurs en potassium assimilable des boues de différentes stations étudiées	53
Tableau 18	Résultats de phosphore assimilable des différentes stations étudiées	55
Tableau 19	Teneurs en métaux lourds des boues des différentes stations étudiées	57

Sommaire

Liste des abréviations

Liste des figures.

Liste des tableaux.

Introduction

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Partie I .Traitement des eaux usées et formation des boues résiduares

• I-Introduction	3
I.1. Procédés de traitement des eaux usées	3
I.1.1. Prétraitements des eaux usées.....	3
I.1.1.1. Dégrillage	3
I.1.1.2. Dessablage	4
I.1.1.3. Déshuilage	4
I.1.2. Traitements des eaux usées.....	4
I.1.2.1. Traitements mécaniques	4
I.1.2.1.1. Décantation	4
I.1.2.1.2. Filtration.....	4
I.1.2.1.3. Flottation	4
I.1.2.2. Traitements physico-chimiques	5
I.1.2.3. Traitements biologiques	5
I.2. Etat de l'épuration des eaux usées et domaines de valorisation des boues en Algérie	6
I.2.1. Etat des stations d'épuration en Algérie	7
I.2.2. Production et état de gestion des boues en Algérie	8

Partie II : Gestion et valorisation des boues

II. Boues résiduaires	9
II.1. Introduction	9
II.2. Différents types de boues résiduaires	9
II.2.1. Boues urbaines.....	9
II.2.2. Boues industrielles.....	10
II.3. Caractéristiques des boues	10
II.3.1. Caractéristiques physico-chimiques	10
II.3.1.1. Matière sèche(MS) et siccité(S)	10
II.3.1.2. Matières en suspension (MES).....	10
II.3.1.3. Fraction volatile (FV)	10
II.3.1.4. Indice de boue SVI (Sludge Volume Index).....	10
II.3.2. Caractéristique biologique	10
II.3.2.1. Composition des matières organiques	10
II.3.2.2. Pouvoir calorifique inférieur (PCI)	10
II.3.2.3. Composition des matières minérales	11
II.3.2.4. Micropolluants.....	11
II.3.3. Caractéristiques physiques	11
II.3.3.1. Aptitude au convoyage et au stockage.....	11
II.3.3.2. Masse volumique	11
II.3.3.3. Viscosité	11
II.3.3.4. Granulométrie.....	11
II.3.3.5. Conductivité thermique.....	12
II.4. Traitement et composition des boues résiduaires	12
II.4.1. Traitement des boues	12
II.4.2. Composition des boues	13
II.4.2.1. Eléments utiles.....	13
II.4.2.1.1. Eléments fertilisants.....	13
II.4.2.1.1. 1. Azote des boues	14
II.4.2.1.1. 2. Phosphore des boues	15
II.4.2.1.1. 3. Autres éléments minéraux	16
II.4.2.1.2. Matière organique	16
II.4.2.2. Eléments indésirables.....	17
II.4.2.2.1. Eléments traces métalliques (ETM)	17

II.4.2.2.1.1. Comparaison des teneurs en ETM de certains engrais et produits utilisés en agriculture	18
II.4.2.2.1.2. Classification des métaux en fonction de leur dangerosité et de leur intérêt agronomique	19
II.4.2.2.2. Composés traces organiques (CTO)	19
II.4.2.3. Micro-organismes pathogènes.....	20
II.5. Destination finale des boues	21
II.5.1. Mise en décharge	21
II.5.2. Incinération.....	21
II.5.3. Epandage agricole.....	21
II.5.3.1. Conditions de l'épandage.....	22
II.5.3.2. Périodes de l'épandage.....	22
II.5.3.3. Epandage des boues dans le monde.....	23
II.6. Valeurs agronomiques des boues résiduares	23
II.6.1. Valeur fertilisante	23
II.6.1.1. Azotée.....	24
II.6.1.2. Phosphatée	24
II.6.2. valeur amendante	24
II.6.2.1. Propriétés physico-chimiques du sol	25
II.6.2.2. Propriétés microbiennes et enzymatiques du sol	25
II.7. Effets défavorables	25
II.7.1. Phytotoxicité	25
II.7.2. Micro-organismes pathogènes.....	25
II.7.3. Dégradation de la structure	26
II.8. Comportement et devenir des constituants des boues dans le sol après épandage	26
II.8.1 Carbone	27
II.8.2 Azote	28
II.8.3 Phosphore	30
II.8.4 Actions échangeables.....	31
Potassium (K ⁺)	32
Calcium.....	32
Magnésium.....	32
Sodium	32

II.8.5 Métaux lourds	32
II.9. Législation sur l'épandage des boues	33
II.9.1. Dans les pays de l'union européenne	33
II.9.2. En Algérie.....	34
II.10. CONCLUSION	35

Chapitre II : Matériel et méthodes

I. Présentation de la wilaya de Tizi-Ouzou	36
I.1. Situation géographique.....	36
I.2. Géologie et géomorphologie	36
I.3. Situation économique.....	37
I.4. Répartition des terres agricoles	37
I.5. Eaux usées	38
I.6. Situation climatique	38
I.6.1. Température	38
I.6.2. Pluviométrie et Humidité de l'air	39
I.7. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen	40
II. Choix des boues.....	41
III. Localisation géographique des huit stations.....	41
III.1. STEP de Boukhalfa	41
III.2. STEP de Draa Ben Khedda.....	41
III.3. STEP d'épuration Est de Tizi-Ouzou.....	41
III.4. STEP d'épuration DEM.....	41
III.6. STEP d'épuration de Boghni	42
III.7. STEP d'épuration de Tadmaït.....	42
III.8. STEP d'épuration de la ville d'Azzefoune	42

IV. Etude expérimentale	44
IV.1. Protocole expérimental	44
IV.2. Analyse des échantillons	44
IV.2.1. Analyses chimiques.....	44
IV.2.1.1. Mesure de pH_{eau}	44
➤ Le mode opératoire	45
IV.2.1.2 Phosphore assimilable	45
IV.2.1.2.1 Choix de la méthode.....	45
IV.2.1.2.2. Principe de la méthode	45
IV.2.1.2.3 Préparation des réactifs.....	45
IV.2.1.2.4. Etablissement de la gamme étalon	46
IV.2.1.2.5. Mode opératoire	46
a. Extraction	46
b. Colorimétrie	47
c. Calcul de la concentration du phosphore en ppm	48
IV.2.1.3. Potassium (K) assimilable	48
IV.2.1.3.1. Extraction du potassium	48
IV.2.1.3.2. Préparation de la gamme d'étalonnage	49
IV.2.1.3.3. IV.2.1.3.3. Calcul de la concentration du potassium en ppm.....	49

Chapitre II : Résultats et discussion

I. Résultats et Discussions	51
I.1. Résultats d'analyses des boues et leur interprétation	51
I.1.1. Le pH.....	51
➤ Discussion des résultats.....	52

I.1.2. Potassium assimilable	53
➤ Discussion des résultats.....	54
I.1.3. Phosphore assimilable	55
➤ Discussion des résultats.....	56
I.1.4. Métaux lourds	57
➤ Discussion des résultats.....	58
Conclusion Générale	59

Références Bibliographiques

Annexe

INTRODUCTION GENERALE

La notion de déchet est subjective. Un déchet est un résidu que l'on juge inutile dans un contexte donné. La valorisation des déchets permet d'en retirer des produits utiles ou de l'énergie. Les méthodes de valorisation tendent à être considérées comme des processus industriels, soumises à des normes de plus en plus rigoureuses qui, dès lors qu'elles seront respectées, devraient contribuer à dépassionner le débat social autour de la question des déchets.

La matière organique et les éléments fertilisants présents dans les eaux usées sont éliminés par des microorganismes en présence d'une quantité suffisante d'oxygène. Les stations d'épuration fonctionnent sur le même principe que l'épuration naturelle. Elles comportent des cultures fortement oxygénées de microorganismes spécialisés, ce qui leur permet d'épurer l'eau beaucoup plus rapidement que dans la nature. Le processus d'épuration entraîne une prolifération massive des microorganismes qui contribuent à former les boues d'épurations. Bien que ces dernières soient aujourd'hui considérées comme des déchets par la nouvelle réglementation, elles ne doivent pas être versées en l'état dans la nature car elles risquent à long terme de créer des problèmes de pollutions insurmontables. Une fois traitées, elles deviennent une ressource qui peut être valorisée dans le domaine agricole. Cependant, elles présentent un intérêt agronomique réel du fait de la présence de matière organique, d'azote, de phosphore et d'un rapport carbone/azote favorable. Ces caractéristiques peuvent donner aux boues résiduaires une valeur agronomique très intéressante permettant ainsi de les recycler et de les valoriser en agriculture.

Aujourd'hui, le recyclage en agriculture est l'alternative la mieux adaptée pour éliminer les effluents organiques. La mise en décharge de ces résidus présente un risque de pollution par entraînement des éléments minéraux (azote, phosphore, métaux lourds) vers les nappes phréatiques ou les cours d'eau. Par contre, l'incinération apparaît plus coûteuse que l'épandage agricole et moins intéressante du point de vue environnemental.

Par ailleurs, l'augmentation importante des quantités des boues résiduaires produites dans notre pays, estimée à plus de 225 000 tonnes de matière sèche de boues par an. La volonté politique de préserver l'environnement et de valoriser la fraction organique de ces déchets, font que ces boues apparaissent comme une valeur ajoutée pour l'agriculteur.

La valorisation agronomique des boues résiduaires participe à la protection durable de l'environnement, et tire profit de ces produits organiques en améliorant la fertilité des sols cultivés. En effet, il est généralement admis que ces déchets ont un pouvoir fertilisant en apportant au sol de l'azote, du phosphore et de la matière organique (Nicourt Barbier, 2009 ; Wu *et al.*, 2010 ; Mazem *et al.*, 2010), en améliorant ainsi ses propriétés physiques (rétention en eau, porosité, stabilité structurale...), chimiques (disponibilité des éléments nutritifs) et biologiques (bonne activité microbiologique) (Grimaud, 1996 ; le Bissonnais, 2009 ; Copowiez, 2009). Cependant, leur utilisation ne peut se pérenniser sans la garantie de leur innocuité (teneur en micropolluants et en pathogènes (Annabi, 2005).

Par leur composition, les boues une fois épandues contribuent au rendement des cultures. Elles contiennent des nutriments pour les cultures et servent d'amendement organique et calcique. Des micro-organismes présents dans le sol dégradent en partie les matières organiques apportées par les boues et les transforment en éléments minéraux disponibles pour la plante. Une autre partie des matières organiques est incorporée au sol en contribuant à l'entretien d'une structure favorable au développement des racines. Les quantités épandues

INTRODUCTION GENERALE

doivent restées compatibles avec les besoins des cultures en éléments minéraux. Cependant, une gestion rigoureuse de la fertilisation s'impose en se référant à la méthode du bilan.

En Algérie, en l'absence d'un cadre réglementaire autorisant leur réutilisation agricole, la valorisation des boues résiduaires reste au stade de recherche et d'expérimentation avec des tentatives limitées de certaines stations d'épuration.

De ce fait, plusieurs questions se posent sur l'efficacité agronomique de ces déchets. Il est donc plus que nécessaire aujourd'hui de les maîtriser pour pouvoir les intégrer dans les itinéraires techniques de l'agriculture. En particulier, leur valeur fertilisante doit être connue pour ajuster les fertilisations minérales complémentaires aux besoins des cultures.

Ce travail a comme objectif d'évaluer les valeurs fertilisantes en éléments majeurs (P, K) des boues urbaines utilisées sur les sols cultivés en arbres fruitiers dans la région de Tizi-Ouzou. Pour répondre à cette problématique, ce travail est compartimenté en trois chapitres:

- le premier présente un aperçu bibliographique scindé en deux parties dont la première s'intéresse à l'étude de l'épuration des eaux usées et l'état de l'épuration et la gestion des boues en Algérie, la seconde traite les boues résiduaires des stations d'épuration, leur valorisation agricole et leur épandage ;
- le deuxième est consacré aux matériels et méthodes, qui présente le protocole d'échantillonnage des boues ainsi que les différentes techniques d'analyses adoptées ;
- le troisième présente les résultats obtenus et les discussions approuvées en fonction des acquis de recherche ;

Enfin, Le présent travail est couronné par une conclusion générale.

PARTIE I : Traitement des eaux usées et formation des boues résiduaires

I-Introduction

L'épuration des eaux usées consiste à décanter les éléments polluants particuliers et à extraire les éléments dissous qui sont transformés en matières sédimentables suite à un traitement approprié. Ainsi, à la sortie de la station, il en résulte d'une part une eau épurée rejetée dans le milieu naturel, et d'autre part, il reste des sous-produits désignés sous le terme des boues résiduaires (Werther et Ogada, 1999).

Les caractéristiques de ces boues dépendent du type de traitement des eaux usées (physico-chimique ou biologique), du procédé de stabilisation des boues (aérobie ou anaérobie, chaulage, compostage) et de leur état physique (variant d'un état liquide au solide) (O.T.V, 1997 ; Culot, 2005 ; Girard et *al.*, 2005).

Les boues résiduaires peuvent être considérées comme des substances extraites à partir des eaux usées afin de pouvoir récupérer dans le milieu naturel une eau épurée (Anred, 1982).

Le traitement primaire de décantation des eaux prétraitées sous l'influence de la pesanteur forme les boues primaires (Zekad, 1982), au cours du traitement biologique les particules dissoutes sont fixées et métabolisées par les micro-organismes (bactéries) en présence d'oxygène, cette biomasse bactérienne est séparée par une décantation pour donner les boues secondaires. Les deux types de boues issues de ce procédé sont mélangés pour donner les boues mixtes. Les boues issues d'une épuration physico-chimique sont dites boues de coagulation (Anred, 1982), celles-ci sont riches en résidus formés de réactifs chimiques (Sbih, 1990).

I.1. Procédés de traitement des eaux usées

I.1.1. Prétraitements des eaux usées

Les prétraitements des eaux usées sont indispensables dans toutes les stations d'épuration quelque soit le processus mis en œuvre en aval.

Ils consistent à éliminer les matières susceptibles de gêner l'exploitation du réseau d'égouts de la station (Koller, 2004).

I.1.1.1. Dégrillage

Les eaux usées d'origine urbaine ou industrielle qui arrivent à la station d'épuration passent d'abord à travers des grilles à barreaux plus au moins espacés ou de tamis rotatifs qui retiennent les éléments les plus volumineux (morceaux de bois, plastiques, objets divers, etc (Guy, 2003) ; leur vitesse d'écoulement est réduite pour provoquer la sédimentation des matières lourdes (Anred, 1988), qui seront évacuées vers les centres de traitement des ordures ménagères (Gamrasni, 1984).

I.1.1.2. Dessablage

Le dessablage a pour but d'extraire des eaux brutes, du gravier, du sable et des particules minérales plus ou moins fines afin d'éviter les dépôts dans les canaux. Cette opération conduit aussi à protéger contre l'abrasion des pompes et d'autres appareils (Morel, 1977).

I.1.1.3. Déshuilage

Les eaux usées urbaines contiennent souvent des matières flottantes, qui passent à travers les grilles (huiles, hydrocarbures, débris des graisses, fragments de matière plastique...), les huiles et les hydrocarbures forment une couche mince en surface et gênant ainsi le processus d'aération. Dans le cas des boues activées, quant aux matières flottantes solides elles risquent de former des bouchons qui pourraient obstruer des canaux ou des orifices dans la station, il est donc nécessaire de piéger ces substances au niveau du prétraitement par un dispositif d'écumage (Duchene, 1990).

I.1.2. Traitements des eaux usées

Après les prétraitements, il reste dans l'eau une charge polluante dissoute et des matières en suspension (MES).

I.1.2.1. Traitements mécaniques

Ils comportent des procédés suivants :

I.1.2.1.1. Décantation

Elle permet une séparation de deux phases, liquide- solide ou liquide -liquide, par simple gravité. Ce procédé dépend des propriétés des particules et du régime hydraulique (Thomazeau, 1981).

Dans la plupart des stations d'épuration on effectue deux décantations, l'une sur les eaux usées du prétraitement, l'autre après le traitement biologique. Les boues formées contiennent une forte proportion de matière organique (20 à 30% de matière sèche), des matières grasses (6 à 8 %) et de la cellulose (8 à 15%) (Kormanik, 1990).

I.1.2.1.2. Filtration

Elle a pour but essentiel la clarification finale d'une eau (Thomazeau, 1981). La filtration peut effectuer sur les eaux brutes prétraitées puis sur les eaux traitées par voie biologique ou chimique. Néanmoins, la forte teneur en matière colloïdales et mucilage des eaux brutes rend difficile leur filtration sauf pour des filtre dont les mailles sont assez larges, de l'ordre de dixième de millimètres, ce qui est peu intéressant, par contre ce procédé est largement utilisé pour le traitement des boues (Duchene, 1990).

I.1.2.1.3. Flottation

Elle se passe dans les conditions où la masse volumique des particules est inférieure à celle du milieu. On les élimine par flottaison avec ou sans adjonction de polymères. De fines bulles d'air sont injectées à la base du bassin pour favoriser la remontée des boues, ensuite ces dernières sont éliminées par un raclage de surface (Mahma, 1995).

I.1.2.2. Traitements physico-chimiques

Les eaux prétraitées sont additionnées de réactifs chimiques, flocculants ou coagulants (poly électrolytes, chaux....) qui agglomèrent les particules solides sous formes de flocons décantables. Une décantation sépare ensuite l'eau et les boues (Sbih, 1990).

Les traitements physico-chimiques permettent d'agglomérer ces particules par adjonction d'agents coagulants et flocculants (sels de fer ou d'alumine, chaux...). Les amas de particules ainsi formés, ou "flocs", peuvent être séparés de l'eau par décantation ou par flottation.

Les sels de fer ou d'aluminium et la chaux sont couramment utilisés pour les eaux usées urbaines à des concentrations de l'ordre du décigramme par litre alors que les polyélectrolytes naturels (alginates) ou de synthèse donnent de bons résultats pour des teneurs de l'ordre du milligramme par litre. Le coût élevé de ces derniers conduit généralement à l'utilisation simultanée des agents de floculation organique et minéraux.

La présence des sels minéraux dans les boues augmente le volume et le poids, ceci aura évidemment une influence sur les traitements ultérieurs des boues (Mathian, 1986).

I.1.2.3. Traitements biologiques

Dans cette opération, les microorganismes sont la base de traitement par l'utilisation des composés organiques comme substrat nutritif (Vedry, 1975). Il s'agit de réduire la charge en matière organique de l'eau usée par des micro-organismes regroupés en « floccs » et de produire des boues dites « activées ». Cette phase nécessite une aération conséquente. Les eaux usées décantées sont aérées par des turbines agissant sur la surface de l'eau ou par des rampes d'air comprimé ou d'oxygène au fond d'un bassin. Après ce traitement, les eaux sont à nouveau décantées.

Le traitement biologique permet la biodégradation des matières organiques des eaux usées grâce à des bactéries aérobiques ou anaérobiques dans des systèmes suivants :

- *Système intensif* à cultures fixes telles que les lits bactériens et les disques biologiques ou à cultures libres telles que les boues activées.

- *Système extensif* dont le plus répandu et le plus classique est le lagunage surtout dans les pays à climat chaud et où le terrain est disponible à coût raisonnable. Il consiste en un lent écoulement de l'affluent dans un ou plusieurs réservoirs plus ou moins profonds.

Après toutes ces opérations, l'eau traitée est alors rejetée dans le milieu naturel, tandis que les boues résiduelles sont collectées puis traitées en vue de leur valorisation ou de leur élimination.

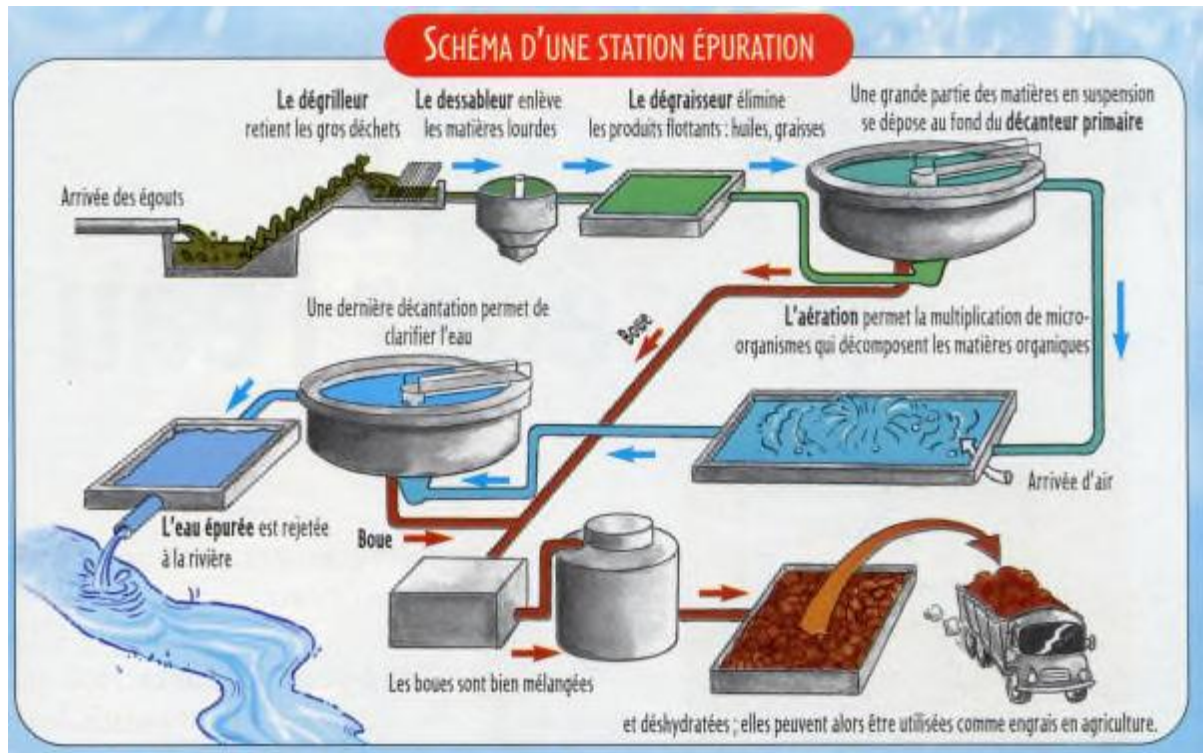


Figure 01 : schéma de fonctionnement d'une station d'épuration (ADEME,2012).

I.2. Etat de l'épuration des eaux usées et domaines de valorisation des boues en Algérie

La gestion durable de l'eau est l'un des principaux axes du développement durable, dans la mesure où l'eau doit répondre aux besoins des générations actuelles et satisfaire les générations futures. Vu la diminution des apports en eau constatée depuis plusieurs décennies, les agriculteurs, notamment ceux des régions continentales, s'intéressent à l'utilisation des eaux usées (Maynard et Hochmuth, 1997).

L'épuration de l'eau usée et son utilisation en irrigation est une option attrayante, en particulier dans les zones arides et semi-arides, car elle représente une source d'eau et d'engrais additionnels renouvelables et fiables (FAO, 2003).

Devant la rareté de la ressource en eau conventionnelle, l'Algérie ne peut plus se permettre de tourner le dos à la possibilité de réutiliser les énormes quantités d'eaux usées rejetées dans la nature ou à la mer. C'est donc à l'enracinement d'une nouvelle culture de l'eau, qu'il faut s'atteler pour espérer l'émergence d'une mentalité et d'un comportement nouveau (MRE, 2003).

Dans les conditions déficitaires en ressources en eau, le secteur de l'agriculture est le plus gros consommateur. En 2006, 900000 hectares soit 10,5% de la SAU sont irrigués et 78% de cette superficie l'est avec des eaux souterraines et 13% avec des eaux superficielles (Tamrabet, 2011).

Les STEP algériennes produisent plus de 225 000 tonnes de matière sèche de boue. Cette production est appelée à augmenter avec les futures projets de mise en place de nouvelles installations de traitement des eaux usées. C'est pourquoi le recyclage des boues longtemps considéré comme un aspect secondaires du traitement des eaux usées, révèle maintenant toute

son importance pour trouver des voies réglementaires d'élimination de ces tonnes de boues produites (ONA, 2018).

I.2.1. Etat des stations d'épuration en Algérie

Dans une optique de protection des ressources hydrique et du littoral par une législation de plus en plus ambitieuse, quant à la qualité des eaux usées déversées dans le milieu naturel, l'Algérie compte actuellement 156 unités de traitement (Tableau n°01) implantées sur le territoire national. L'ensemble de ces installations traite annuellement environ 18 660 000 de mètre cube par jour d'eaux usées (ONA, 2017).

Station d'épuration	nombre
Boues activées	79
Lagunage naturel	44
Lagunage aéré	29
Filtre planté de roseaux	3
Monobloc	1
totale	156

Tableau n°01 : Répartition des stations d'épuration en Algérie selon leur procédé de traitement(ONA,2018)

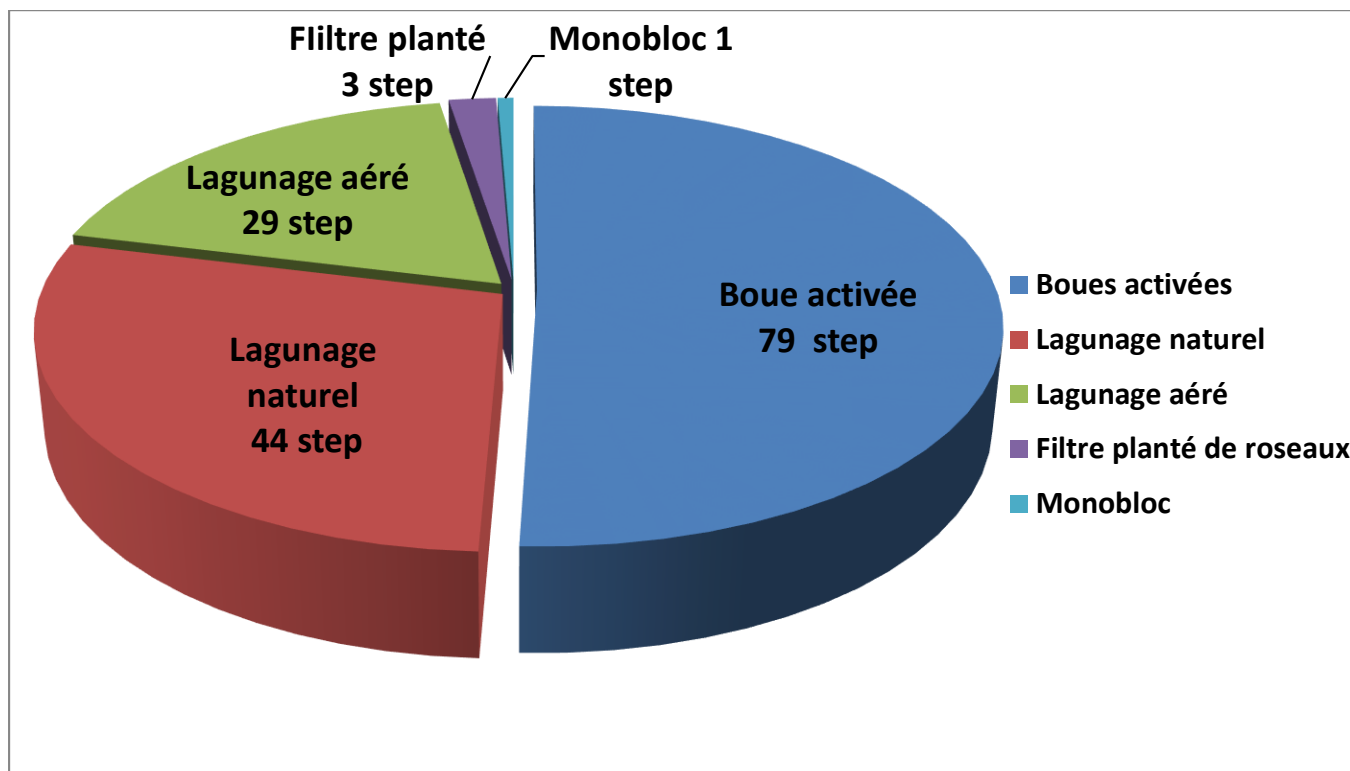


Figure n°02 :Répartition des stations d'épuration en Algérie selon leur procédé de traitement (ONA,2018)

D'après la figure ci-dessus on constate que le procédé à boue activée domine la sélection en cause de son rendement épuratoire avancé, suivi par le système de lagunage naturel et aéré qui présentent des résultats avancés en s'adaptant avec le climat algérien où les températures et le temps d'ensoleillement sont élevés.

I.2.2. Production et état de gestion des boues en Algérie

L'Algérie possède un système d'épuration formé de 04 organismes : ONA, SEAAL, SEOR, SEACO couvrant la quasi-totalité du tissu urbain qui a atteint un taux de 87% en 2012 (ONA, 2012), avec une capacité d'épuration annuelle environ 17 500 000 M³ d'eaux usées et produit plus de 225 000 tonnes de matière sèche de boues (ONA, 2017).

Les boues de stations d'épuration sont des résidus du traitement des eaux usées, composés en majeure partie de matières organiques. La production actuelle de boues en Algérie est de l'ordre de 150 000 M³ de matière sèche par an (ONA, 2018). La quantité majeure de ces déchets est couramment destinée vers le rejet en décharge et le reste utilisé comme fertilisants et amendements organiques sur les terres agricoles. L'épandage agricole concerne chaque année une surface de l'ordre de 200.000 hectares, et ce procédé est encadré par une réglementation limitant les risques liés à l'utilisation de boues qui peuvent contenir des métaux lourds, des germes pathogènes et des micropolluants organiques.

Le marché de l'épandage agricole est la principale filière de gestion de boues de stations d'épuration urbaines en Algérie, représentant moins de 40% des boues. Ceci s'explique par son coût relativement faible par rapport à l'incinération. Mais ce marché est actuellement menacé. En effet, il est actuellement exposé à une série d'initiatives privées visant à interdire ce type d'épandage, à travers le refus des produits cultivés sur des terrains ayant reçu des boues. Divers acteurs du secteur agro-alimentaire (industries agro-alimentaires, distributeurs, et coopératives) adoptent désormais une position radicale de refus de tout épandage de boues invoquant le « principe de précaution » pour justifier leur attitude. Compte tenu des incertitudes attachées aux risques sanitaires et environnementaux potentiels de l'épandage de boues, ils préfèrent se prémunir de façon radicale contre les risques commerciaux que l'épandage pourrait entraîner. Ce marché est donc menacé de disparaître si un accord n'est pas trouvé entre les différents acteurs concernés pour renoncer à de telles initiatives et maintenir le fonctionnement du marché. Des mesures ont été adoptées par les pouvoirs publics afin d'éviter un mouvement massif d'initiatives d'exclusions des boues de la part de la filière agro-alimentaire, de clarifier les responsabilités des différents acteurs et d'aboutir à un consensus sur l'intérêt de l'épandage agricole des boues (ONA, 2017).

Les différentes voies de valorisation des boues en Algérie sont :

- La mise en décharge (CET), pour 60 à 65 % ;
- La valorisation agricole, pour 35 % à 40 % ;
- La valorisation énergétique 1% à 5% ;
- Et 0% pour l'incinération (ONA, 2018).

PARTIE II : Gestion et valorisation des boues

II. Boues résiduaires

II.1. Introduction

Les boues résiduaires possèdent une valeur liée à la richesse en matière organique, en éléments fertilisants (N, P) et en oligo-éléments. L'utilisation agricole de ces boues, permet de recycler les éléments qu'elles possèdent par les plantes.

Néanmoins, le contrôle de l'épandage des boues doit être une préoccupation du fait que les boues soient des déchets et qu'elles soient susceptibles d'apporter des éléments indésirables (micropolluants métalliques ou organiques et des germes pathogènes) dont il faut maîtriser les flux pour garantir l'innocuité vis-à-vis des sols et de l'environnement.

Les différents travaux de recherche réalisés dans plusieurs pays appellent à l'application des boues en termes de matière fertilisante et d'amendement organique.

Cette application doit répondre à plusieurs objectifs :

- agro-écologique ;
- économique ;
- améliorer la qualité trophique et organique des sols ;
- garantir la production agricole.

Ainsi, la quantité de boue à épandre est calculée sur une période appropriée par rapport au niveau de fertilité des sols et aux besoins nutritionnels des plantes en phosphore et en azote. Cette dose doit être compatible avec les potentialités des sols.

II.2. Différents types de boues résiduaires

Généralement il existe deux grandes catégories de boues résiduaires qui sont les boues urbaines et les boues industrielles.

II.2.1. Boues urbaines

Elles résultent du traitement des eaux usées d'origine domestique. Pour être réputé « urbaine », un effluent doit répondre aux caractéristiques suivantes (OTV, 1997) :

- Rapport DCO/DBO₅ < 2.7 (DCO : demande chimique en oxygène, DBO₅ : demande biologique en oxygène sur cinq jours)
- DCO < 750mg/l
- NTK < 100mg/l

Ces données sont déterminées sur un échantillon moyen prélevé sur 24 heures, après une décantation de deux heures.

Les principaux types de boues proposés au recyclage en agriculture sont les boues liquides issues de traitement aérobiques, les boues pâteuses issues de traitement aérobiques ou

anaérobiques, les boues chaulées, les boues compostées, les boues physico-chimiques, les boues de lits de séchage et les boues de lagunage.

II.2.2. Boues industrielles

C'est l'ensemble de déchets liquides, pâteux ou solides sortant du site de production industriel (Salhi, 2003).

II.3. Caractéristiques des boues

II.3.1. Caractéristiques physico-chimiques

II.3.1.1. Matière sèche (MS) et siccité (S)

C'est le paramètre principal de la définition de filière et surtout un des plus faciles à mesurer. MS est exprimée en g/l. Rapporté à la masse totale de boue, on l'exprimera en fraction massique S qui correspond à la siccité. Il permet de connaître la qualité de boue à traiter, quel que soit son niveau de concentration dans la filière de traitement (Kormanik, 1972).

II.3.1.2. Matières en suspension (MES)

Si les MS sont faciles à déterminer sur les phases concentrées, il n'en va pas même sur les phases clarifiées où la procédure de mesure de MES par filtration sur membrane est plus appropriée.

Afin d'écrire un bilan matière rigoureux soit en MS, soit sur une opération de séparation de phase (qui ne sépare que les MES), on reliera les deux paramètres par la relation expérimentale suivante :

$MES = MS - (\text{substances organiques et minérales dissoutes})$ (Emilie Jarde, 2002)

II.3.1.3. Fraction volatile (FV)

C'est le rapport des matières volatiles MV (en g/l) sur les matières sèches MS (en g/l), elle donne une précieuse indication sur le degré de stabilisation de la boue et son aptitude à divers traitements (déshydratation, incinération...) (Dudkowski, 2000).

II.3.1.4. Indice de boue SVI (Sludge Volume Index)

Il caractérise l'aptitude à la décantation, et donc ultérieurement à l'épaississement puis à la déshydratation d'une boue issue d'un traitement biologique. Il est à relier indirectement aux MS et MV (Amadou, 2007).

II.3.2. Caractéristique biologique

II.3.2.1. Composition des matières organiques

La connaissance de la composition élémentaire de la boue en terme C, H, O, N, S permet de déterminer l'aptitude d'une boue à être dégradée biologiquement (digestion anaérobie avec production de biogaz) ou thermiquement (incinération) par écriture de la stœchiométrie de la dégradation. Elle est exprimée par rapport aux MV, voire par rapport aux MV dégradables uniquement si l'on s'intéresse à la stabilisation. $C_5H_7O_2N$ est souvent pris comme « formule bute » d'une boue biologique. (Echab, 1998).

II.3.2.2. Pouvoir calorifique inférieur (PCI)

Son importance est primordiale en incinération. Généralement exprimé par rapport aux MV, il est à relier au C, H, O, N, S par écriture de la stœchiométrie de combustion.

Différentes approches (formule de Dulong, théorie des électrons disponibles, etc.) permettent de le calculer approximativement, à défaut de le mesurer expérimentalement à la bombe calorimétrique (Hoodah, Alloway, 1993).

II.3.2.3. Composition des matières minérales

Silice, alumines, carbonates et phosphates constituent les éléments les plus couramment rencontrés, à l'exception des boues minérales d'industries spécifiques.

Carbonates et phosphates ont ainsi leur importance pour préciser la qualité agricole d'une boue épandue mais la silice est un élément défavorable en centrifugation.

Par ailleurs les chlorures, essentiellement solubles, sont peu appréciés en cas d'utilisation des cendres de boues incinérées en valorisation dans le béton (Tauzin et Juste., 1986).

II.3.2.4. Micropolluants

Ils doivent être caractérisés en cas d'épandage agricole comme en cas d'incinération, car ils peuvent se retrouver dans les fumées. Les législations se sont longtemps tenues aux seuls micropolluants minéraux en limitant les rejets des métaux lourds suivants : plomb, chrome, cuivre, manganèse, nickel, arsenic, cadmium et mercure (Suh et Roussauxp., 2002).

II.3.3. Caractéristiques physiques

Afin de concentrer, chauffer, convoier et stocker la boue, il est indispensable de préciser ses propriétés physiques.

II.3.3.1. Aptitude au convoyage et au stockage

La boue peut présenter différents états liés à sa rhéologie dont il est important de connaître les limites afin de dimensionner les capacités de pompage, convoyage et stockage (Rada, 1996).

II.3.3.2. Masse volumique

Elle permet de calculer le volume de boue à convoier. En l'absence de mesure, pour une boue liquide ou pâteuse.

$FM = (1 - FV)$ représente la fraction de matière minérale, de masse volumique 2700 kg/m^3 , la fraction organique ayant une masse volumique proche de 900 kg/m^3 (ADEME, 2001).

II.3.3.3. Viscosité

Les boues fraîches, dont la concentration dépasse rarement 10 à 15 g/l, ont un comportement newtonien. Leur viscosité est alors de l'ordre de quelques mPas. Quand la teneur en MS prend des valeurs plus importantes, la boue adopte un comportement généralement rhéofluidifiant, modélisable. (Sedki, 1995).

II.3.3.4. Granulométrie

Idéalement, la valeur du diamètre particulaire permettrait de connaître, d'après la loi de Stokes, l'aptitude d'une boue à s'épaissir. La distribution granulométrique d'une boue est cependant difficile et longue à mesurer. Les rares mesures effectuées montrent en outre une forte dispersion autour du diamètre moyen. Par ailleurs, si la taille est généralement un critère favorable, des particules de taille importante peuvent entraîner des problèmes de convoyage (dépôts) ou d'abrasion (silice), notamment en cas de centrifugation (ADEME, 1999).

II.3.3.5. Conductivité thermique

Ce paramètre ne sert que dans le cas d'une modélisation fine du séchage indirect ou d'échangeur où des calculs de coefficient d'échange sont nécessaires (Aggelides et Londra., 2000).

II.4. Traitement et composition des boues résiduaires

II.4.1. Traitement des boues

Les boues issues de l'épuration des eaux usées se présentent sous une forme liquide bien chargées en matière organique hautement fermentescible. Ces deux caractéristiques sont gênantes et posent beaucoup de problèmes techniques pour l'évacuation des boues ou leur stockage. Ceci nécessite donc la mise en place d'une filière de traitement dès l'installation de la station d'épuration (STEP) (Amir, 2005). Généralement, le traitement des boues a pour objectifs :

- **Stabilisation** pour empêcher ou réduire les problèmes de fermentation et d'éviter ainsi les nuisances olfactives. La stabilisation peut être biologique par voie aérobie (compostage) ou anaérobie (méthanisation) ou chimique (chaulage ou autres traitements). La stabilisation biologique présente l'avantage de limiter l'évolution ultérieure de la composition des boues (Amir, 2005).

- **Épaississement** vise à augmenter la siccité (teneur en matière sèche) des boues sans pour autant modifier leur caractère. Ce procédé se fait par voie gravitaire (décantation) dans un concentrateur ou par des moyens mécaniques (égouttage, flottation ou centrifugation) (Benterrouche, 2007).

- **Déshydratation** consiste à réduire le volume des boues (plus de 97% d'eau) pour faciliter par la suite leur transport et leur stockage. Les boues passent donc de l'état liquide à l'état pâteux ou solide. Les filtres à bandes et les centrifugeuses donnent des boues pâteuses 20-25% de siccité, par contre les filtres presses donnent (30 à 35% de siccité) (Benterrouche, 2007).

- **Séchage** élimine en grande partie l'eau contenue dans les boues par évaporation. Il peut être réalisé soit par évaporation naturelle (lits de séchage), soit par voie thermique. Selon la puissance du procédé de séchage utilisé, épaississement, déshydratation ou séchage thermique, on obtient des boues à différents pourcentages de siccité :

- Boues liquide (4 à 10% de MS),
- Boues pâteuses (10 à 25% de MS)
- Boues solides (25 à 50% de MS)
- Boues granulées pour une siccité supérieure à 85% (ADEME, 1996).

II.4.2. Composition des boues

La composition des boues varie en fonction de l'origine des eaux usées, de la période de l'année, de type de traitement et de conditionnement pratiqué dans la station d'épuration (Werther et Ogada, 1999). Par leur composition, les boues utilisées en agriculture augmentent le rendement des cultures. Elles contiennent des nutriments qui servent d'amendement organique et calcique pour améliorer les propriétés physicochimique du sol (Dudkowski, 2001).

En général, les boues se composent de trois éléments : les éléments utiles (matière organique, éléments fertilisants), les éléments indésirables (élément traces métalliques, composés traces organiques), et les micro-organismes pathogènes.

II.4.2.1. Eléments utiles

La valorisation des boues en agriculture est intéressante, tant par les quantités de la matière organique qu'elles contiennent que par la présence en quantité appréciable d'éléments fertilisants. Le tableau ci après donne la composition en éléments les plus communément rencontrés dans les boues.

Tableau n°02. Composition en éléments utiles de cinq grands types de boues utilisées en agriculture (ADEME, 2001).

	Boues liquides	Boues pâteuses	Boues chaulées	Boues compostées	Boues sèches
Teneur en matières sèches MS %	2 à 7	16 à 22	90 à 95	25 à 40	40 à 60
Teneur en matière organiques %MS	65 à 70	50 à 70	50 à 70	30 à 50	80 à 90
Teneur en matières minérales %MS	30 à 35	30 à 50	30 à 50	50 à 70	10 à 20
pH	6.5 à 7	7 à 8	6 à 8	9 à 12	6 à 7
Rapport Carbone / azote(C / N)	4 à 5	5 à 6	4 à 6	8 à 11	15 à 25
Azote (Kg N/T brute)	2 à 4	8 à 12	30 à 50	6 à 9	5 à 9
Phosphore kg P₂O₅/T brute	2 à 3	6 à 9	50 à 70	6 à 10	6 à 8
Potassium (kg K₂O/T brute)	0.9	0.8	5	1	1 à 2

II.4.2.1.1. Eléments fertilisants

Les boues contiennent des quantités appréciables d'éléments fertilisants se résument en :

- azote, de 4 à 6% de matière sèche (MS) ;
- phosphore, de 3 à 8% de MS ;
- Potassium et Magnésium, très faibles teneurs (0.5 à 1.5% de MS), les sels de ces deux éléments étant très solubles et donc éliminés des boues ;
- Ca de 4 à 7% de MS.

Il est envisageable de fabriquer des matières fertilisantes commerciales à partir de la matière sèche des boues d'épuration (Dudkowski, 2000).

II.4.2.1.1.1. Azote des boues

La nature et la teneur de l'azote varient beaucoup avec le type de boues (origine et mode de traitement) (Sbih, 1990). Cependant, les teneurs en azote dans les boues décroissent avec l'âge des boues. Ceci s'explique par le fait du lessivage des nitrates (NO_3) et une volatilisation de l'azote ammoniacale due à l'activité des bactéries dénitrifiantes lors de stockage (Furrer, 1977 ; ADEME, 1996).

Dans les boues, l'azote est présent sous deux formes : l'azote organique et l'azote minéral (NH_4^+). Les boues ne contiennent généralement pas d'azote nitrique (NO_3) ou d'azote nitreux (NO_2), sauf à l'état traces (Grimaud, 1996), les proportions varient avec le mode de traitement, comme le montre le tableau suivant :

Tableau n° 03 : Coefficient d'efficacité directe de l'azote des boues (dans le sol), selon leur type.

Boues	MO (%de MS)	N Total (%de MS)	N.NH4 (% de N Total)	C/N
Mixte fraîches	60-80	3-5	≤ 10	10-14
Digérées anaérobies	40-60	2-7	20-40	5-10
Digérée aérobie	50-70	3-8	5-10	5-8
D'aération prolongée	40-60	2-6	5-10	4-8
Séchées sur lits	35-50	2-4	≤ 10	8-12
Conditionnées et déshydratées thermiquement	40-60	2-6	≤ 5	5-10
Autoclave et déshydratée	50	1-2	< 5	20

Source : Juste et Catroux (1980)

La disponibilité de l'azote des boues dépend tout d'abord des caractéristiques physico-chimiques de chaque type de boues : richesse en azote, forme d'azote, rapport C/N, stabilité de l'azote organique. Ainsi, pour un type d'effluent donné, les différents traitements subis par les boues (stabilisation, conditionnement chimique, déshydratation) constituent les facteurs essentiels de variation de la disponibilité en azote (Bourgeois et al, 1996 ; Grimaud, 1996).

Toutefois, il est reconnu que l'efficacité réelle de l'azote pour un type de boue donné va dépendre des conditions d'utilisation (le contexte pédo-climatique, les conditions d'épandage et les techniques culturales) (Bourgeois et al, 1996 In Abadou, 2001).

Selon Grimaud (1996), les résultats d'un essai au champ sur maïs comparant l'efficacité de l'azote d'une boue à différents stades du traitement de déshydratation dans une même station par apport à un témoin minéral, montrent que l'efficacité de l'azote diminue lorsque la proportion N-NH₄⁺/N-total décroît, que le rapport C/N croît et que la teneur en matière sèche augmente. Les paramètres (teneur en N-total N-NH₄⁺, C/N et MS de la boue) sont généralement assez bien corrélés entre eux.

II.4.2.1.1.2. Phosphore des boues

L'élément phosphore existe en quantité à peu près équivalente à celle de l'azote dans les boues. Sommers (1977) donne une valeur moyenne de concentration en phosphore : 4.7% relativement à la matière sèche (moyenne de 250 échantillons de boues d'origine différentes). 5 à 6% du phosphore total des boues se trouvent sous forme de phosphate organique et que le phosphore minéral étant surtout constitué par des associations avec les composés du Fe, d'Al du Ca et du Mg qui sont en abondance dans la plus part des boues (Juste, 1979).

Les études consacrées à la caractérisation de l'état sous lequel existe le phosphore dans les boues (soluble ou insoluble) sont rares.

Dans ce sens, Rudolf et Gehm (*in* Lamari, 1979) ont donné les valeurs moyennes regroupées dans le tableau ci après.

Tableau n° 04 : Caractérisation de l'état de phosphore (soluble ou insoluble) dans les boues.

Total (P ₂ O ₅ % MS)	Insoluble (P ₂ O ₅ % MS)	Assimilable (P ₂ O ₅ %MS)
3.25	0.32	2.93

Source : Rudolf et Gehm (*in* Lamari, 1979)

Il s'ensuit que la majeure partie est sous forme assimilable. Si, dès la première année de l'épandage, la biodisponibilité du phosphore est facilement obtenue, elle est différente pour l'azote puisqu'elle est de 40-60% pour une boue liquide, de 30- 35% pour une boue pâteuse, 25-40% pour une boue sèche, de 30-40% pour une boue chaulée et de 10% seulement pour une boue compostée (Guy, 2003).

La caractérisation des formes minérales et organiques du phosphore des boues est délicate en raison de la très forte réactivité des anions ortho phosphorique qui peuvent entrer dans une multitude de combinaisons organo-minérale. Le phosphore minéral représente 30% à 98% du phosphore total selon le type de boue. Ainsi, dans les boues stabilisées en aérobie et les boues compostées, le phosphore est présent presque exclusivement sous forme minérale, alors que dans les activées ou stabilisées en aérobie, le phosphore organique peut représenter jusqu'à 75% du phosphore total (Hinedi *etal*, 1989 ; ADEME,1996).

La biodisponibilité du phosphore peut être définie comme son aptitude à être prélevé par les plantes. Parmi les processus qui interviennent dans le prélèvement du P par la plante à partir d'une boue est la complémentarité de l'offre en P du sol par l'offre en P de boue pouvant

passer en solution par désorption, dissolution ou minéralisation (Hugues, 1999 ; Guivarch, 2001).

II.4.2.1.1.3. Autres éléments minéraux

Les apports de potassium par les boues résiduairees sont négligeables (Brame et Lefevre, 1977). La teneur moyenne est de l'ordre de 1% de la MS (Moleta et Cansell, 2003).

Le potassium est très peu retenu pendant le traitement des eaux usées et se trouve en faible quantité dans les boues surtout celle ayant été déshydraté (Anred, 1982). La teneur des boues en potassium varie de 0.1 à 0.31% de la matière sèche (Lamari, 1979).

Les boues contiennent aussi du calcium en quantité appréciable : 0.2 à 1.5% du CaO dans les boues liquides et de 2 à plus de 20% de CaO dans les boues solides (Anred, 1982).

Pour le magnésium, les boues contiennent de très faible teneur (0.5 à 1.5% de MS), les sels de magnésium sont très solubles et donc éliminés des boues (Impens et Avril, 1992).

II.4.2.1.2. Matière organique

Les boues sont très riches en matières organiques, leur teneurs sont de 50 à 70% de la matière sèche, pour les boues issues des traitements physico-chimiques (Juste, 1995). Il est à noter que la nature de la matière organique qui compose les boues est fortement différente de celle du fumier, car dans les boues on constate que leur matière organique est constituée par les micro-organismes qui se multiplient et qui décomposent celle-ci (Juste, 1995).

Selon Sperandio (1998), la matière organique est divisée en trois groupes bien distincts:

- Une fraction facilement biodégradable, dont l'importance est essentiellement liée à la déphosphoration biologique, qui se dégrade en quelques heures,
- Une fraction rapidement hydrolysable, partiellement soluble, consommée en quelques dizaines d'heures,
- Une fraction lentement biodégradable, (temps nécessaire supérieur à une dizaine de jours), qui va se retrouver dans la filière boue. La matière organique représente plus de 50% de la matière sèches dans les boues (Barideau, 1988 cités par Bourkeb, 2002).

La teneur moyenne en carbone des boues de station d'épuration est voisine de celle d'un fumier de ferme (voir Tableau ci-dessous). On peut donc les considérer avant tout comme un amendement organique.

Tableau n° 05. Composition comparée des boues et du fumier de ferme

Élément en %de la M.S	Boues	Fumier
C	33.5	36.2
N	3.9	2.2
P₂O₅	5.7	1.3
Ca	4.9	2.6
Mg	0.6	0.3

Source : Juste et Catroux (1980)

Le rapport C/N varie largement selon les produits. Il en résulte une possibilité de minéralisation ou au contraire d'organisation plus ou moins importante. Cet équilibre organisation/minéralisation est lié à la composition biochimique et à l'état de maturité du produit (Zekkad, 1982).

Le rapport C/N des boues solides est de l'ordre de 9 à 13 %. Il varie selon l'âge des boues (Hadouche, 1981 ; Djabala, 2003 ; Mani, 2005). De ce fait, une minéralisation rapide des boues, une décomposition et une stimulation de l'activité microbienne sont observées. Les grandes valeurs du rapport C/N sont relevées au niveau des boues d'un an. Cela est justifié par la faible teneur en azote.

Le rapport C/N des boues voisin de 10, laisse penser que les boues résiduaire se caractérisent après leur incorporation dans le sol par une minéralisation rapide. Par contre, la dégradation est plus lente pour le fumier dont le rapport est élevé (Zekkad, 1982).

Selon Brahim et Lefevre (1977), cette matière organique a deux origines essentielles :

- soit qu'elle émane de la récupération de la culture microbienne développée en consommant une partie substantielle de la matière organique des eaux.
- soit qu'elle émane de la récupération directe d'une matière organique hétérogène retenue par décantation primaire puis stabilisée.

II.4.2.2. Eléments indésirables

Parmi ceux-ci on distingue les éléments traces métalliques (ETM), les composés traces organiques (CTO).

II.4.2.2.1. Eléments traces métalliques (ETM)

Les éléments traces métalliques sont des micropolluants inorganiques présents dans les boues sous formes de traces. Ils proviennent des eaux usées et dont la nocivité n'apparaît qu'à partir d'une certaine concentration. Ils ne subissent pas de dégradation et se retrouvent dans la phase particulaire : seulement 1 à 4% des métaux sont sous forme soluble (Bougrier, 2005).

Certains de ces ETM sont des oligo-éléments (Ni, Mn, Zn et Cu) indispensables au déroulement des processus biologiques, tandis que d'autres, tels que le plomb ou le cadmium, n'ont pas de fonction biologique connue.

La présence des métaux lourds dans les boues de station d'épuration constitue à ce jour le frein principal à l'utilisation de ce type de sous-produit en agriculture.

Il est primordial de savoir à partir de quelle quantité de métal apporté dans le sol avec les boues il y a risque de contamination.

Certaines études entreprises dans ce sens (Gomez *et al.*, 1992) ont montré que Zn et Ni étaient relativement solubles dans différents réactifs chimiques, mobiles dans les sols et facilement absorbés par les végétaux.

Le Pb et le Hg sont fortement retenus par la phase adsorbant et assez peu disponibles pour les végétaux.

Brahem et Lefevre (1977) rapportent que la toxicité se manifeste d'autant plus que le sol est acide, car en pH neutre ou alcalin, les métaux lourds sont adsorbés sur l'argile, complexée par la matière organique et les composés hydroxydes du sol. Cette action propre du sol rend très difficile la fixation des seuils limites des métaux lourds.

Les boues concentrent entre 70 et 90% des quantités d'ETM des eaux usées entrant dans la station d'épuration (Terce, 2001).

Dans l'ensemble, la concentration de ces ETM dans les boues est très faible et très inférieure lorsqu'on rapproche la valeur de chaque ETM à la valeur limite réglementée (voir tableau n°11).

II.4.2.2.1.1. Comparaison des teneurs en ETM des boues avec certains engrais et produits utilisés en agriculture

Le tableau ci-dessous donne, à titre indicatif, les résultats de mesures réalisées sur un certain nombre de produits utilisés en agriculture. Même si les teneurs en ETM peuvent varier selon leur origine, les types de produits et leur fabrication, aucun de ces produits ne peut se prévaloir d'être exempt de traces d'éléments "indésirables".

Sur le plan pratique, ces informations indiquent en tout cas que l'évaluation des flux d'ETM apportés au sol doit tenir compte de toutes les sources possibles d'apport.

Tableau n°06. Teneur de quelques engrais et produits organiques en ETM (Fourchette de variation en g /T de matière sèche).

	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn
Boues d'épuration	0.7-8	30-110	170-500	0.7-6	20-60	55-220	0.3-20	500-1400
Engrais azotés	0-10	6-10	5-10	0-1	1-10	0.5-10	0.1-5	2-10
Engrais phosphatés	9-100	90-1500	10-60	0-0.2	5-70	0.5-40	*	50-600
Engrais potassique	0.1-2	0.1-15	0.1-10	0-0.2	0.1-3	5-15	*	1-15
Fumier de bovins	0.3-1.5	5-60	5-40	0.1-0.6	6-40	5-90	*	75-500
Lisiers de porc	0.3-2	10-30	190-700	0.1-0.2	7-80	7-150	*	290-800

Source : ADEME, 2001 – (Boues d'épuration, dossier documentaire)

II.4.2.2.1.2. Classification des métaux en fonction de leur dangerosité et de leur intérêt agronomique

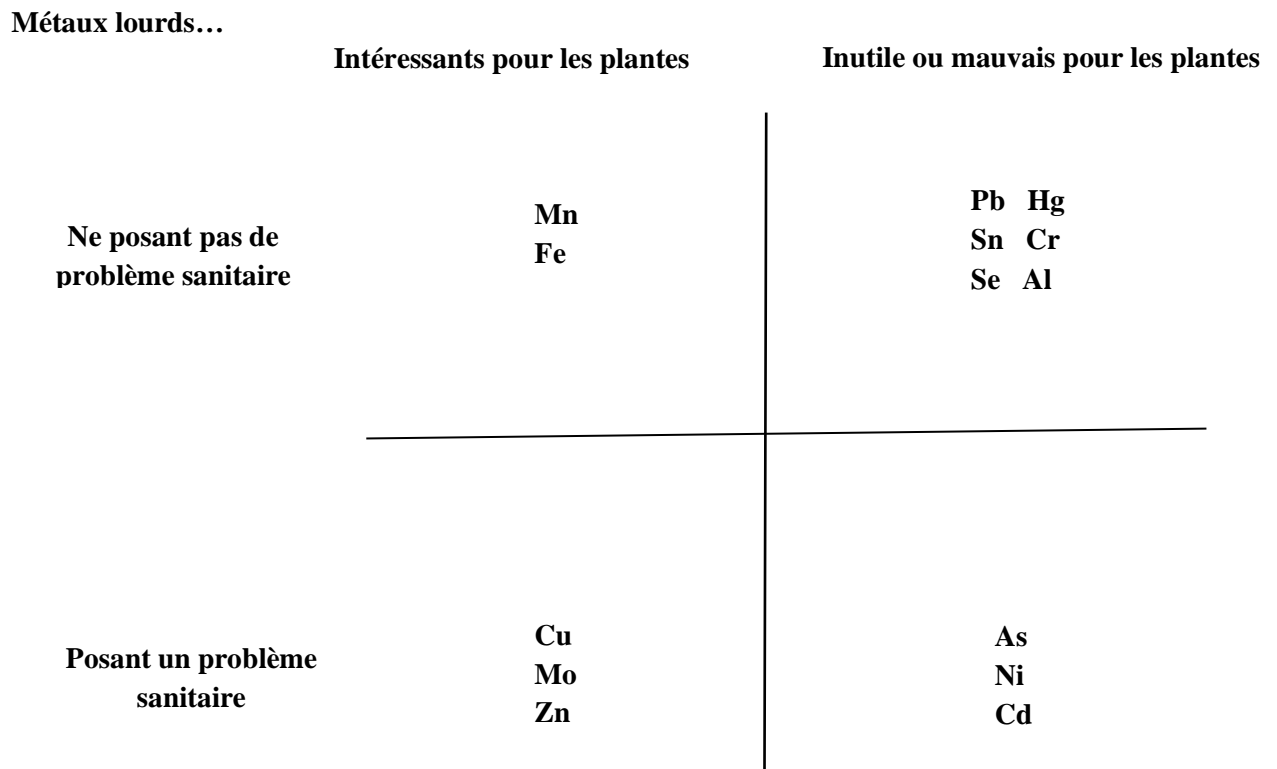


Figure 03 : Classification des métaux en fonction de leur dangerosité et de leur intérêt agronomique, (Baumont, 2003).

II.4.2.2.2. Composés traces organiques (CTO)

Ce sont des produits chimiques (hydrocarbures et leurs dérivés, produits de dégradation, solvants ...) résultant essentiellement de l'automobile et engins motorisés, des activités industrielles et des pratiques domestiques irrespectueuses (Iaurif, 2003).

Ces produits sont plus ou moins dégradés par l'activité microbologique du sol et à concentration élevée, ils peuvent devenir toxiques pour les micro-organismes essentiels à la fertilité des sols.

La réglementation française a retenu comme indicateur de ces composés leur résistance à la biodégradation.

Tableau n°07 : Composés traces organiques

Composés trace organiques	Valeurs moyennes* (g/T MS)	Valeurs limites réglementaire** (g/T MS)	% de valeur réglementaire
Fluoranthène	0.53	5	11
Benzo (a) fluoranthène	0.39	2.5	16
Benzo (a) pyrène	0.31	2	16
7PCB	0.19	0.8	25

* Données moyennées (ordre de grandeurs) : ADEME, 1995 ; Agence de l'eau RMC et Recyval,

- ❖ 7PCB : somme de 7 polychlorobiphényles,
- ❖ FLT : fluoranthère,
- ❖ B(b) P : benzo(b)fluoranthère,
- ❖ B(a)P : benzo(a)pyrène,

II.4.2.3. Micro-organismes pathogènes

Les boues issues des traitements des eaux usées contiennent presque toujours des germes pathogènes et des œufs parasites. Ils proviennent en majorité des excréments humains ou animaux (Sahlström et al, 2004).

Les bactéries pathogènes les plus courantes sont les Salmonella, les Shigella, Mycobactérium, Tuberculosum. Les autres germes sont moins cités (Juste et Catroux, 1980). On trouve également des virus, des protozoaires, etc....

Le sol présente autant de bactéries que les boues (de l'ordre de $10^8 - 10^9/g$). Seule une très faible fraction de celles-ci est pathogène.

Les valeurs limites de référence pour les micro-organismes pathogènes dans les boues sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Tableau n°08. Seuils de références pour les teneurs en micro-organismes pathogènes dans les boues hygiéniques

Salmonelles	Entérovirus	Œufs d'helminthes pathogènes viables
<8 NPP/10 g MS	<3NPPUC/10g MS	<3/10 g MS

Source : arrêté du 8 janvier 1998 relatif aux épandages de boues sur les sols agricoles
NPP : Nombre le plus probable ; NPPUC : nombre le plus probable d'unité cytopathogène

II.5. Destination finale des boues

Après avoir subi les différents traitements, les boues doivent être éliminées sans nuire à l'environnement. Les principales voies d'éliminations ou de gestion des boues résiduaires sont la mise en décharge, l'incinération et l'épandage agricole.

II.5.1. Mise en décharge

C'est une mise en décharge contrôlée qui tend à se restreindre et n'être tolérée que pour les déchets ultimes, dont des boues à concentrations élevées en contaminants, qui ne peuvent être valorisées. Cette mise en décharge contrôlée consiste en un enfouissement de ces boues, le plus souvent mélangées avec des ordures ménagères, suivi de la récupération et du traitement des lixiviats. Cette solution perd progressivement de son intérêt pour des raisons financières et des problèmes environnementaux tels que l'émanation d'odeurs nauséabondes ainsi que l'entraînement d'éléments minéraux et organiques toxiques par les eaux superficielles et la contamination des nappes phréatiques (Marttinen et al., 2003 ; Looser et al., 1999).

II.5.2. Incinération

Elle consiste à transformer par oxydation les constituants des boues en éléments stables et simples (CO₂, H₂O, NO₂, SO₂ etc.) et également de vaporiser l'eau que les boues contiennent. Il ne reste, après passage au four, que des cendres inertes ne contenant que les matières minérales présentées dans les boues de départ (Gaid, 1984)

Selon Bechaux (1978), ces cendres peuvent être utilisées dans la constitution des revêtements routiers, des produits stabilisateurs de sol ou de ciment.

II.5.3. Epandage agricole

L'épandage de boues de station 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 pratique constitue une solution particulièrement favorable à l'environnement, car elle offre l'opportunité de recycler la matière organique nécessaire au sol. De plus, les boues représentent un fertilisant peu onéreux, qui permet à l'agriculteur de réduire ses charges en engrais fertilisants classiques (O.T.V., 1997).

L'aspect positif de l'utilisation agricole des boues résiduaires a été démontré par plusieurs recherches effectuées au Canada (N'Dayegamiye et al. 2004 ; Irda, 2004 ; Bipfubusa et al., 2006 ; N'Dayegamiye et Drapeau 2009), en France (Koloulewsky et al., 2001 ; Daudin, 2003 ; Benbrahim et al., 2003 ; Scheiner, 2005 ; Baize et al., 2006 ; Capowiez, 2009). Ces recherches ont confirmé les impacts favorables des boues résiduaires sur la fertilité chimique, biologique et physique des différents types de sol et sur les rendements des cultures (maïs, vigne, blé, fourrage, maraichage, sylviculture..).

Cependant, la valorisation agricole de ces boues comporte des limites liées à la concentration en éléments toxiques et/ou germes pathogènes. Une bonne étude agronomique permet dans chaque cas de déterminer les quantités optimales des boues à épandre.

II.5.3.1. Conditions de l'épandage

Une opération de valorisation agricole est inscrite dans le cadre d'une organisation d'épandage parfaitement structurée. Elle répond à des règles strictes. Les éléments à prendre en compte pendant l'opération de valorisation agricole sont :

- Analyse des boues et vérification de leur conformité ;
- Suivi de leur valeur agronomique ;
- Plan d'épandage ;
- Suivi des sols et des parcelles de référence.

Ces mesures doivent s'accompagner d'étude du milieu récepteur. On remarque aussi que :

- les sols à texture moyenne ou fine ont une perméabilité moyenne et sont les plus appropriés à l'épandage des boues.
- le gravier et le sable à texture grossière sont très perméables, l'épandage des boues peut causer la contamination de la nappe phréatique.
- les sols à texture très fine ne sont que légèrement perméable et sont soumis au ruissellement.
- les sols organiques ne conviennent pas à l'épandage des boues, car il n'a pas besoin de les amender avec du phosphore ou de MO pour les cultiver dont le risque de contamination de nappe phréatique.
- l'épandage est moins judicieux sur les sols trop acides sauf si les boues ont été traitées à la chaux. En effet, si les boues non chaulées sont épandues sur un sol acide, le pH du sol après épandage demeure faible.
- En zone de montagne, la boue peut être utilisée dans la reconstitution des sols.

II.5.3.2. Périodes de l'épandage

Les périodes d'épandage sont déterminées en fonction de nombreux critères tels que le type de culture, l'occupation des sols, l'accessibilité aux parcelles, la disponibilité de l'agriculture, les risques de lessivage de l'azote et la réglementation en vigueur.

La contrainte de temps constitue un élément majeur à la valorisation agricole, car la fenêtre d'épandage est étroite techniquement. Cette opération, est réalisable à trois périodes de l'année :

- En fin d'été et à l'automne, après récoltes.
- Au printemps :
 - ✓ Avant labour et travail de sol.
 - ✓ Avant le semis.
 - ✓ A la reprise de végétation et sur prairie.

- En été, sur prairie après la première coupe.

Le climat, la saison et les conditions atmosphériques interviennent en de plusieurs façons :

- Influence de la disponibilité de terrains en fonction des cycles végétatifs et des besoins des plantes en éléments fertilisants.
- Influence sur les disponibilités d'accès des véhicules à proximité et sur les terrains.
- Influence sur les risques de lessivage du sol vers les eaux superficielles et souterraines.

II.5.3.3. Epandage des boues dans le monde

Partout dans le monde, la pratique de l'épandage est généralisée comme la montre la figure ci-après :

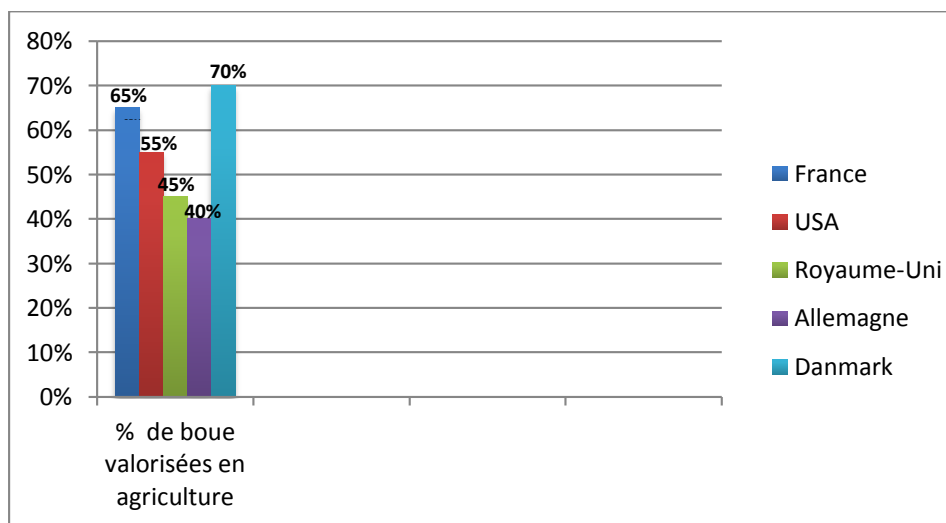


Figure 04 : Part de l'épandage agricole des boues dans le monde (HYDROPLUS N° 106. Septembre 2000)

II.6. Valeurs agronomiques des boues résiduelles

II.6.1. Valeurs fertilisantes

La valorisation des boues d'épuration en agriculture est une pratique ancienne. Elle permet le recyclage des éléments fertilisants tels que la matière organique, l'azote, le phosphore et de nombreux éléments minéraux pour la plante (Sommers, 1977). 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).

La valeur fertilisante azotée et phosphatée des boues résiduelles motive leur utilisation. La teneur en azote et en phosphate représente 3 à 7% de la matière sèche.

II.6.1. 1. Azote

une disponibilité élevée en azote pour les plantes stimule le développement et l'activité racinaire, favorisant ainsi l'absorption des autres éléments minéraux (Bipfubusaet *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.

L'azote présent dans les boues d'épuration se trouve principalement sous forme organique et n'est disponible pour la plante qu'après minéralisation de la matière organique. Le coefficient de disponibilité de l'azote représente sa fraction présente dans les boues et disponible l'année suivant l'épandage. Il dépend du type de matière organique, de la quantité appliquée, de la culture mise en place, de l'époque d'application, de la technique d'application, du climat et du type de sol. Ce coefficient (part d'azote sous forme minérale utilisable par la plante) des boues de station d'épuration peut être estimé à 30% (Monfort et *al* , 1985)

II.6.1. 2. Phosphore

Le phosphore est un constituant cellulaire et un transporteur d'énergie important.

Son rôle physiologique est triple, avec l'azote il est le constituant des protéines phosphorées (nucléoprotéines, phosphoprotéines). Il participe à de nombreuses réactions biochimiques, par exemple : métabolisme des glucides. Par ailleurs, les ions phosphoriques servent de transporteur d'énergie. Lors de la photosynthèse, par exemple, l'énergie solaire est stockée momentanément dans les molécules phosphatées (ATP = ADP + énergie).

Le rôle agronomique du phosphore est considérable car il participe avec l'azote à la croissance de la plante et notamment au développement du système racinaire. En tant qu'agent actif des réactions biochimiques, il favorise le métabolisme des glucides et des protides et donc la croissance mais aussi la floraison, la fructification et la maturation.

Le phosphore contenu dans les boues se trouve essentiellement sous forme inorganique et constitue dans le sol un pool lentement utilisable par la végétation. On peut considérer cependant que 25 à 50% du phosphore est utilisable après un an par la végétation et ce, même dans le cas de boues stabilisées à la chaux (Behunda, 1990).

II.6.2. valeur amendante

Un amendement constitue un apport d'une matière organique ou minérale aux sols dont le but principal est d'améliorer leurs propriétés physiques et/ou chimiques et /ou biologiques (Girard et *al.*, 2005)

II.6.2.1. Effets sur les propriétés physico-chimiques du sol

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).

II.6.2.2. Effets sur les propriétés microbiennes et enzymatiques 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).

La fertilité organique stimule l'activité biologique du sol. Les organismes du sol ont des fonctions centrales dans la nutrition des plantes, à la fois par leur implication dans les processus de décomposition et le recyclage des nutriments pour la fourniture d'éléments nutritifs aussi que pour le transfert de ces éléments à la plante, notamment par les mycéliums des champignons mycorrhiziens (Lemercier, 2002).

II.7. Effets défavorables des boues

II.7.1. Phytotoxicité : A partir d'une certaine concentration dans la plante, variable selon l'espèce et l'ETM considéré, des phénomènes de phytotoxicité peuvent se manifester par une diminution de biomasse et de l'apparition de différents symptômes tels que chlorose, rabougrissement. Les différentes espèces végétales n'ont pas la même sensibilité à l'excès d'ETM comme le montre le tableau ci-dessous :

Tableau n°09 : Sensibilité aux ETM de différents végétaux cultivés (ADEME, 1995)

Très sensibles	sensibles	Tolérants à très tolérants
Laitue	Moutard	Concombre
Navet	Epinard	Chou fleur
Trèfle	Lupin	Graminées
luzerne	Soja	mais
	Haricot	
	Radis	
	chou	

A ce jour, les expériences sont faites avec des doses de boues et des teneurs en ETM plus importantes que ne permet la réglementation. Il se produit soit une croissance normale, soit pas de croissance du tout. Ces résultats sont donc d'une portée limitée dans le cadre d'épandage à dose agronomique. On peut également établir des seuils de carence et de toxicité chez les végétaux (voir tableau n° 10)

Tableau n° 10 : Seuils de carence / phytotoxicité de différents végétaux cultivés (mg/kg de MS) (ADEME, 1995)

Eléments	Seuil de toxicité (sol)	Seuil de carence	Seuil de phytotoxicité
Cadmium	3-8	-	10-20
Chrome	-	-	1-10
Cuivre	100-150	3-10	20-100
Mercure	2-5	-	1-8
Nikel	75-90	0,1	10-30
Plomb	100-400	-	30-300
zinc	300-400	10-20	100-400

II.7.2. Micro-organismes pathogènes

Le risque d'infection par ces agents pathogènes est dépendant d'une part de leurs concentrations, leur dispersion, la capacité de ces agents intestinaux à survivre dans l'environnement, la qualité et la procédure du traitement, et d'autre part de la dose infectante, l'exposition et la susceptibilité de la population exposée (Afssa, 2008). Ces espèces peuvent être acheminées par les boues lors d'un épandage de celles-ci et contaminer ainsi les eaux, les sols et les aliments. La problématique de déchet implique alors de limiter les risques que peut faire courir un tel intrant dans le processus de production agricole.

II.7.3. Dégradation de la structure

Les apports intensifs et répétés de certaines boues riches en sodium, risquent de dégrader la structure, particulièrement dans les sols déjà sensibles (texture limoneuse et/ou teneur en MO faible) (Balland et Bauvois, 1980).

II.8. Comportement et devenir des constituants des boues dans le sol après épandage

La dégradation et le recyclage des éléments des boues est la première exigence pour qu'il y ait véritablement mise en valeur du pouvoir fertilisant des boues. Voyons comment s'effectue la dégradation et le recyclage des différents constituants des boues dans le sol.

La matière organique des boues est un vaste réservoir de divers éléments. Le carbone, l'oxygène et l'hydrogène forment la structure de base. A cette structure peuvent s'ajouter divers éléments tels l'azote, le phosphore, le soufre, le potassium, etc. Pour que ces éléments deviennent disponibles pour les plantes, la matière organique doit être transformée en éléments inorganiques.

La population biologique surtout présente dans les premiers centimètres du sol, joue un rôle primordial dans la décomposition de la matière organique. La plupart des composés organiques ajoutés au sol ou produits dans le sol, sont décomposés par les organismes

hétérotrophes, lesquels ont besoin des composés organiques comme source d'énergie et de carbone (Bridle et al., 1985).

Dans le processus habituel de la décomposition de la matière organique, la destruction initiale des gros détritiques se fait par les mammifères, les termites et les vers. Les plantes (saprophytes) comme les champignons, tirent leur énergie de ces résidus partiellement détruits. A mesure que la matière organique devient plus finement divisée, la taille des organismes décomposeurs diminue (Bohn et al, 1985). Il semble plausible de supposer que c'est surtout cette population de petite taille qui est sollicitée par l'apport de boues puisque celles-ci sont déjà assez finement divisées lors du traitement à l'usine d'épuration. Selon Webber (1984), la matière organique des boues digérées est relativement résistante à l'action microbienne de sorte que la minéralisation se fait de façon lente et graduelle.

Quoiqu'il en soit, une fois les différents éléments minéralisés, la végétation joue un rôle important dans leur prise en charge. Toutefois, l'assimilation, tout comme la décomposition dépend de plusieurs facteurs du milieu: l'oxygène, l'eau, la température, la quantité d'éléments nutritifs, etc. La présence d'oxygène favorise l'action des organismes aérobiques tandis que son absence favorise celle des organismes anaérobiques dont le rôle est différent. Les conditions anaérobiques peuvent être causées par un excès d'eau dans le sol dû à un mauvais drainage ou à la remontée de la nappe souterraine. La température, elle, limite la période de croissance des plantes et par conséquent, la prise en charge des éléments nutritifs par celles-ci. Elle limite aussi la période d'activité des micro-organismes donc la période de décomposition de la matière organique. Enfin, la croissance des plantes et des organismes n'a lieu que si tous les éléments nutritifs requis sont en quantité suffisante. Pour plus de détails sur ce qui advient les différentes composantes des boues, on citera :

II.8.1. Carbone

Le carbone compose la plus grande partie de la matière organique des boues. L'apport de boues a donc pour effet d'augmenter le taux de carbone organique du sol. La figure n°05 donne le schéma général de la transformation du carbone des boues dans le sol. Une certaine quantité du carbone organique peut être assimilée par les plantes par photohétérotrophie (Caillé et al., 1978), mais la plus grande partie est graduellement transformée en carbone inorganique (CO₂) par l'action des bactéries hétérotrophes du sol. Le CO₂ produit peut retourner à l'atmosphère et peut être assimilé par les plantes pour la photosynthèse. Il peut aussi, en présence d'eau, être hydrolysé et former l'acide carbonique.

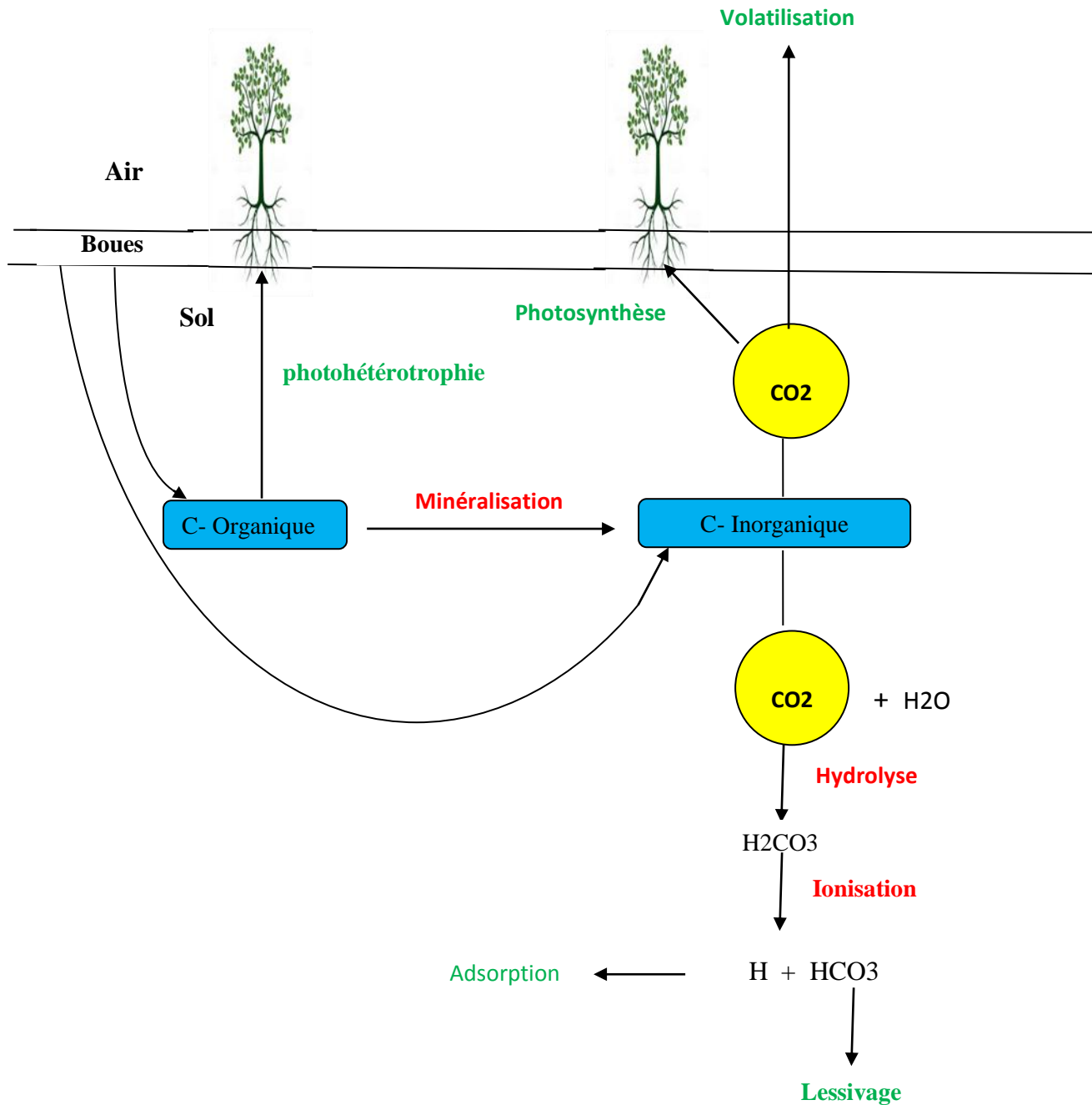


Figure 05 : Transformation du carbone dans le sol

II.8.2. Azote

L'azote des boues est présent sous forme organique et inorganique (Haith, 1983). La figure 06 montre les différentes voies de transformation de l'azote dans le sol. L'azote organique des boues doit être minéralisé avant d'être utilisé par les plantes. Cette minéralisation se fait par l'action des microorganismes hétérotrophes du sol. L'ammonium (NH_4^+) le nitrate (NO_3^-) sont les deux formes d'azote inorganique présentes dans les boues (Bridle et al., 1985). Si les boues ne sont pas incorporées au sol, une grande partie du NH_4^+ présent peut être volatilisé dans les premiers jours de l'application (Beauchamp et al., 1978; Grenier, 1985). Le NH_4^+ peut aussi

être utilisé par les plantes (Alexander, 1961). En raison de sa charge positive, le NH_4^+ qui n'aura pas été volatilisé ni assimilé, aura tendance à être retenu sur les sites d'échange cationique du sol (Federer, 1983) où il est, quand même, disponible pour les plantes.

En milieu aérobique, le NH_4^+ peut être nitrifié, c'est-à-dire transformé en nitrate (NO_3^-) par le processus d'oxydation selon la formule suivante: $\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 \longrightarrow \text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+$ (Breuer et al., 1979).

Cette réaction se fait par l'action de bactéries autotrophes, les bactéries nitrifiantes. En raison de sa charge négative, le NO_3^- a tendance à rester en solution. Ceci le rend facilement disponible pour les plantes mais aussi plus susceptible d'être lessivé. Dans des conditions anaérobiques et en présence de bactéries dénitrifiantes, le NO_3^- peut être réduit en composés gazeux (N_2O ou N_2) (Khdyer et Cho, 1983). Le N_2 peut être retourné à l'atmosphère ou fixé par certains microorganismes spécifiques du sol (Alexander, 1961).

Le facteur majeur qui influence les transformations de l'azote est donc l'action biologique (Tessier, 1985). Par conséquent, tout changement susceptible d'affecter les microorganismes est aussi susceptible d'affecter les transformations de l'azote.

Dans les sols acides par exemple, l'ion ammonium peut s'accumuler car les microorganismes responsables de la minéralisation de l'azote organique en NH_4^+ sont moins sensibles au pH que les organismes responsables de la nitrification (Bohn et al., 1985).

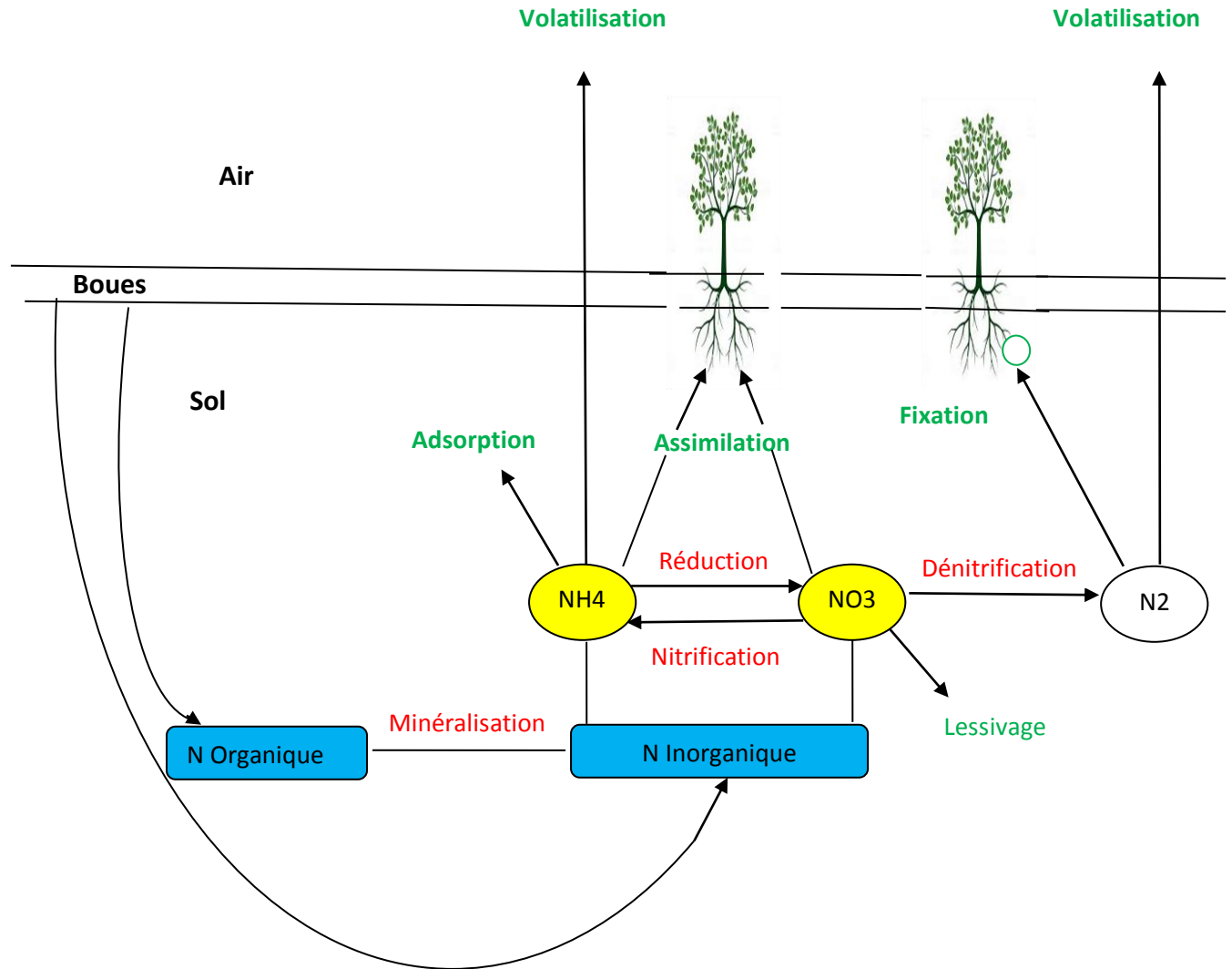


Figure 06 : Transformation de l'azote dans le sol

II.8.3. Phosphore

Habituellement, les boues contiennent des quantités à peu près égales de phosphore et d'azote. Mais les plantes requièrent beaucoup plus d'azote que de phosphore pour croître de sorte que le phosphore s'accumule dans le sol (Webber, 1984). Ainsi on observe une augmentation très nette des teneurs en phosphore du sol après l'application de boues (Juste et Solda, 1977).

La figure 07 montre les transformations du phosphore dans le sol. Le phosphore organique peut s'adsorber sur les sédiments (Tessier, 1985). Dans des conditions anoxiques, le phosphore de certaines boues peut être entraîné par lessivage (Juste et al., 1977), ou être transformé en phosphore inorganique par l'activité biologique. Le phosphore inorganique peut

être sous forme d'orthophosphates ou de polyphosphates. Ces derniers peuvent être transformés en orthophosphates par le processus de l'hydrolyse:



Comme le montre la figure 07 tirée de Bohn et al. (1985), les orthophosphates en solution peuvent prendre différentes formes en fonction du pH du sol. On remarque que l'ion $H_2 PO_4^-$ est dominant dans les sols acides, tandis que l'ion HPO_4^{2-} est dominant dans les sols basiques. Toutefois, les ions phosphates ne demeurent pas en solution dans le sol, ils sont plutôt précipités ou adsorbés (Bridle et al., 1985). Dans les sols acides, le $H_2 PO_4^-$ est associé au fer et à l'aluminium tandis que dans les sols basiques le HPO_4^{2-} est associé au calcium (Bohn et al., 1985).

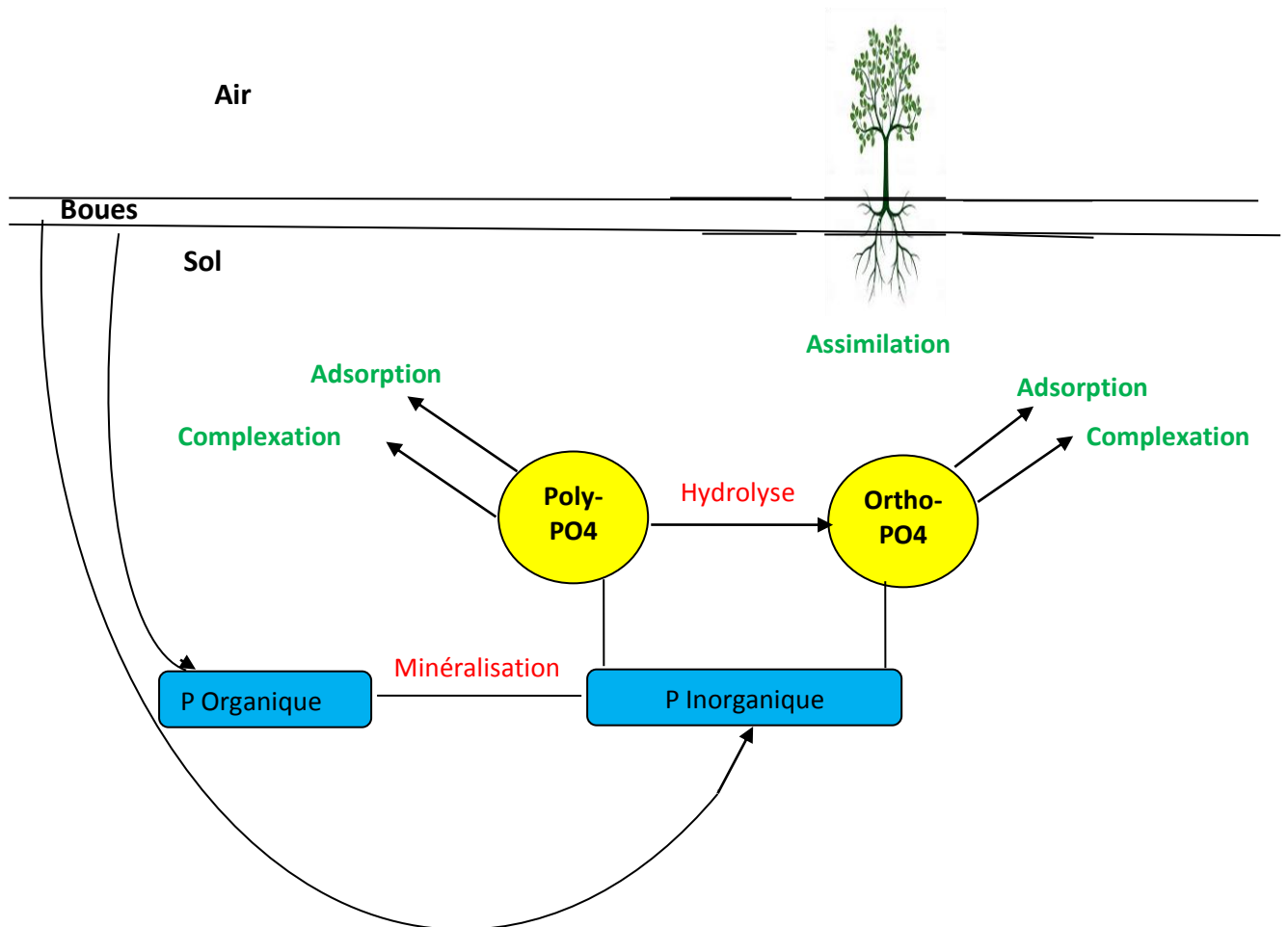
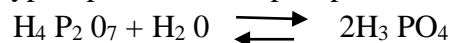


Figure 07 : Transformation du phosphore dans le sol

*Hydrolyse du polyphosphate en orthophosphate:



II.8.4 Cations échangeables

Les cations échangeables sont des éléments inorganiques présents dans les boues. Les principaux cations échangeables, ou les cations majeurs échangeables sont : K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ .

De façon générale, la charge négative des colloïdes (organiques ou inorganiques) du sol retient les cations. Cette rétention réduit la perte des cations par lessivage tout en les gardant disponibles pour les plantes. La force de cette rétention varie suivant la valence et la taille du cation.

Le potassium (K^+) est un élément essentiel à la croissance des plantes. Présent en assez faible quantité dans les boues, il est rapidement assimilé par les plantes.

Le calcium est lui aussi un élément essentiel à la croissance des plantes, il peut donc être assimilé par elles. Il peut aussi être retenu sur les sites échangeables du sol ou encore rester en solution. La solubilité du Ca est surtout contrôlée par l'équilibre avec les roches carbonatées du sol (calcite $CaCO_3$). Cette équilibre dépend du pH, de la pression partielle de CO_2 produit par les racines des plantes et par l'activité des organismes du sol, et dépend aussi de la diffusion CO_2 vers l'atmosphère (Lindsay, 1979).

Le magnésium est aussi un élément nécessaire aux plantes. Sa stabilité est contrôlée par les carbonates, les oxydes et l'hydroxyde de magnésium (Lindsay, 1979).

Le sodium est moins utilisé par les plantes et sa concentration aura tendance à augmenter légèrement dans le sol avec l'application de boues (Pommel, 1979). Le sodium est en équilibre avec les aluminosilicates du sol comme l'albite ($Na Al Si_3 O_8$), Mais pour qu'il y ait précipitation, la concentration de Na en solution doit être très élevée. Le sodium pose un problème lorsqu'il est en excès dans le sol. Lorsqu'il représente plus de 5% du total des cations échangeables, les agrégats du sol formés par l'association des argiles et de la matière organique peuvent être détruits, rendant le sol imperméable à l'eau et à l'air (Bohn et al, 1985).

II.8.5 Métaux lourds

Les métaux peuvent être fortement adsorbés sur les minéraux argileux, sur les oxydes et hydroxydes de fer et de manganèse. Ils peuvent être adsorbés ou complexés à la matière organique, ou encore apparaître sous forme d'ions libres (Chang et al, 1984).

Une certaine quantité de métaux peut être absorbée par les plantes. Toutefois, le total des métaux pris en charge par les plantes reste largement inférieur à la quantité appliquée. Certains de ces métaux sont indispensables pour la croissance des plantes mais deviennent toxiques au-delà d'un certain seuil. Ils peuvent aussi devenir toxiques pour les animaux et l'homme qu'ils atteignent à travers la chaîne alimentaire (Pommel, 1979).

Les ETM sont présent dans le sol à l'état de traces. Ils ne peuvent donc pas constituer de phases indépendantes mais vont rentrer dans des phases hôtes ou des compartiments du sol. Les ETM peuvent se trouver dans différents constituants du sol comme le montre la figure 08.

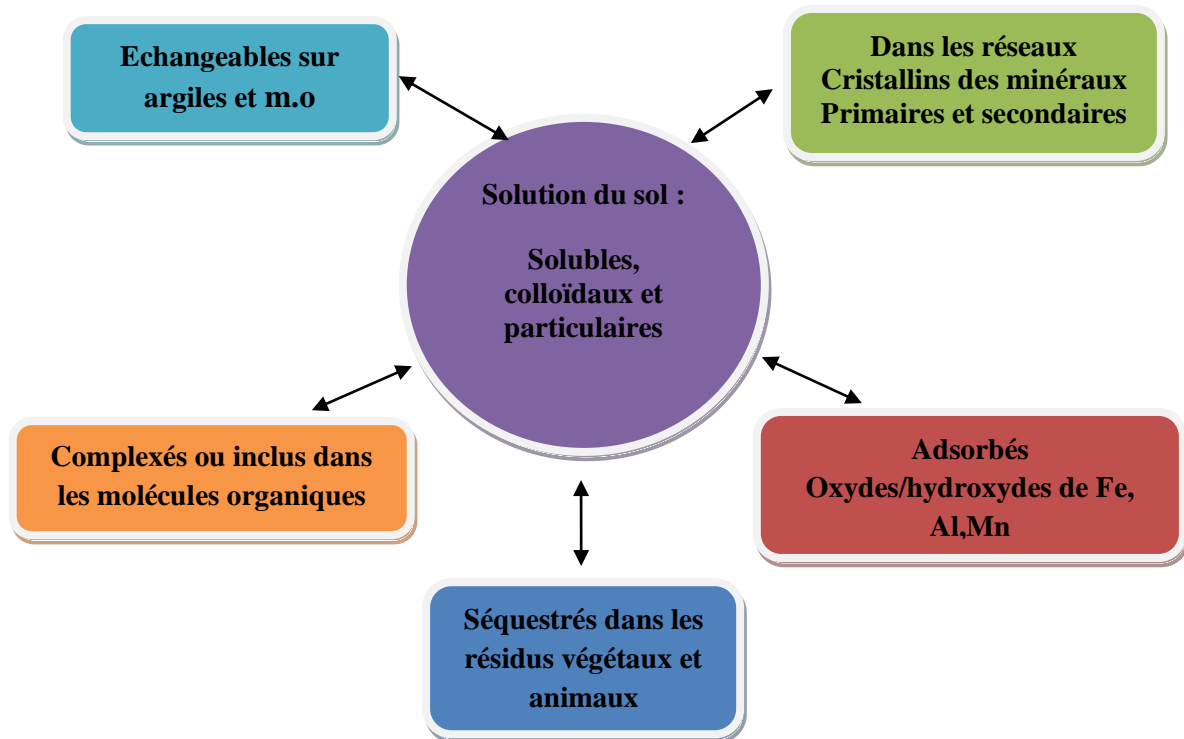


Figure 8 : Différentes formes et localisation des ETM dans les sols (Baize, 1997).

La répartition d'un ETM dans les compartiments du sol ne demeure pas figée au cours du temps. En permanence les éléments passent d'une forme à une autre sous l'influence de modifications externes naturelles ou anthropiques (changements de pH, de degré d'aération, de température, d'hydratation, d'environnement chimique, etc.) (Baize, 1997 in Poitiers, 2002).

Dans le sol la concentration en ETM donnée varie avec la profondeur en raison de leur très forte liaison avec les différents constituants du sol énumérés ci-dessus (fig.08), les ETM issus d'apports extérieurs vont s'accumuler en surface, de sorte que leur concentration va très rapidement décroître avec la profondeur et marquer, dans le cas de sols cultivés, une nette discontinuité au-dessous de la couche travaillée.

II.9. Législation sur l'épandage des boues

II.9.1. Dans les pays de l'union européenne

L'épandage est la solution privilégiée dans la logique de la politique européenne de gestion des déchets. Donnant la priorité au recyclage des matières. La directive n°86/278/CEE du 12 juin 1986 définit les pratiques d'utilisation agricole des boues d'épuration municipales depuis 1998, la commission envisage de réviser cette directive en proposant des valeurs limites en ETM dans les boues.

Tableau n°11 : Teneurs limites en ETM actuelles et à long terme retenues par la commission européenne et les flux maximums cumulés apportés par les boues en 10 ans (Gaultier JEAN-PIERRE et al)

ETM	Directive actuelle		Long terme (vers 2025)	
	Valeur Limite dans Les boues (g/t)	Flux maximum cumulés, apporté par les boues en 10 ans (g/ha)	Valeur Limite dans Les boues (g/t)	Flux maximum cumulés, apporté par les boues en 10 ans (g/ha)
Cd	20-40	150	2	6
Cr	1000-1700	12000	600	1800
Cu	1000-1700	12000	600	1800
Hg	16-25	100	2	6
Ni	300-400	3000	100	300
Pb	750-1200	15000	200	600
Zn	2500-4000	30000	1500	4500

II.9.2. En Algérie

L'épandage en Algérie se fait après prémuni de certains risques liés à l'aspect bactériologique et métaux lourds. En outre, l'agriculture se limite uniquement à l'épandage des boues dans les cultures céréalières, arboricultures et plantes ornementales (pépinières) cas des STEP de HADJOUT, MOUMERDES, KOLEA, CHLEF).

La valorisation agricole des boues reste au stade expérimental avec des tentatives limitées de certaines stations d'épuration. En l'absence d'un cadre réglementaire.

La démarche de management de l'environnement dans laquelle s'est engagé l'ONA a permis d'identifier les aspects environnementaux et par conséquent d'établir un plan d'action pour réduire les impacts.

La production de boue reste un aspect environnemental significatif dont il va falloir réduire l'impact. Les lois et décrets qui régissent la réglementation en matière de valorisation agricole des boues en Algérie sont comme suit :

- Loi n°2001-19 du 12 Décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets qui oblige à trouver une solution au devenir des boues de STEP.
- Décret Exécutif n° 2006-104 de 28 Février 2006 fixant la nomenclature des déchets qui classifie les boues de STEP comme des déchets spéciaux voir même dangereux en cas de présence d'origine industrielle.

La contrainte majeure de la valorisation agricole des boues résiduaires en Algérie reste donc liée à l'aspect réglementaire juridique qui doit définir :

- les modalités de mise en œuvre de l'opération d'épandage.
- les normes de valorisation.
- les responsabilités et les prérogatives des différents acteurs concernés par l'opération.

II.10. CONCLUSION

La composition des boues résiduaires, en matière organique, éléments majeur et oligo-éléments est largement dépendante de l'origine des eaux usées entrants en station d'épuration et les traitements mis en œuvre. Cette composition est comparable à celle d'autres produits organiques (fumier et lisier). Néanmoins, les teneurs, les formes et la disponibilité de ces éléments dans le sol qui fait différencier les boues de ces produits.

Cette étude bibliographique révèle que les boues résiduaires contiennent des quantités non négligeables en certains éléments minéraux très utiles pour l'amélioration de la fertilité des sols cultivés. Il s'agit surtout de la matière organique, de l'azote, du phosphore et certains cations. Ces caractéristiques peuvent donner aux boues résiduaires une valeur agronomique très intéressante permettant ainsi de les recycler et les valoriser en agriculture.

Cependant, l'azote présent dans les boues se trouve principalement sous forme organique et n'est disponible pour la plante qu'après minéralisation de la matière organique. Le phosphore est un constituant cellulaire et un transporteur d'énergie important. Dans les boues il se trouve essentiellement sous forme inorganique et constitue dans le sol un «pool» lentement utilisable par la végétation. Etant donné les teneurs élevées en azote et en phosphore dans les boues, leur épandage constitue alors un apport essentiel de nutriments dans les sols.

Malgré les intérêts qu'elle présente, cette valorisation a des limites. Elle est assez mal acceptée quand la présence des ETM, de CTO, et des germes pathogènes dans les boues dépassent certaines valeurs.

L'épandage agricole des boues résiduaires est une pratique courante régie par des normes et une réglementation sans cesse renouvelée. Cependant, pour garantir la durabilité et la bonne gestion de cette valorisation, il est nécessaire d'acquérir des connaissances scientifiques indispensables à l'évaluation des risques écotoxicologiques et sanitaires associés à la présence de contaminants potentiellement bioactifs dans ces boues tels que les métaux lourds, les polluants organiques, les agents pathogènes, etc.

I. Présentation de la wilaya de Tizi-Ouzou

I.1. Situation géographique

La wilaya de Tizi-Ouzou est située sur le littoral de l’Algérie. Elle s’étend sur une superficie de 2957,9362 Km², limitée au Nord par la mer méditerranéenne, à l’Ouest par la wilaya de Boumerdes, à l’Est par la wilaya de Bejaia, au sud par la wilaya de brouira. A l’issue du dernier découpage administratif de 1984, la wilaya compte 21 Daïra et 67 communes.

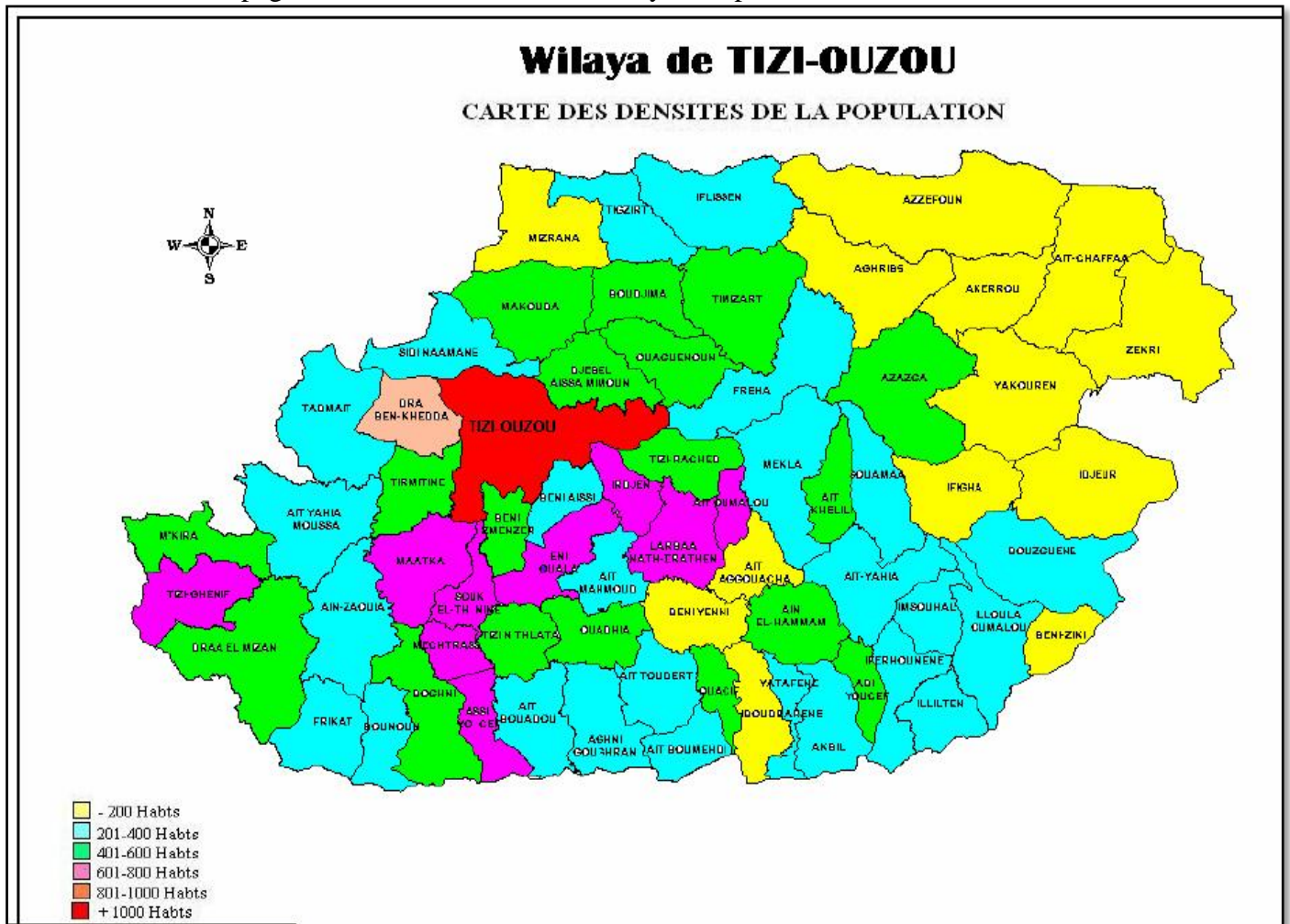


Figure 09 : Situation géographique de la wilaya de Tizi-Ouzou

I.2. Géologie et géomorphologie

- Géologie

La wilaya de Tizi-Ouzou se divise en trois ensembles géologiques à savoir : la chaîne côtière, le massif central métamorphique et les dépôts alluvionnaires du quaternaire.

Les dépôts alluvionnaires du quaternaire reposent sur un substratum tertiaire de marnes éocènes.

- Géomorphologie

La géomorphologie est l'expression de l'interaction de plusieurs phénomènes et différents processus dans la croûte terrestre et sur la surface.

Les principales formes des reliefs sont les Djebels (massif montagneux), les zones de collines et les plaines alluviales avec leurs terrasses.

I.3. Situation économique

La situation géographique de la Wilaya de Tizi-Ouzou est caractérisée par un relief abrupt qui fait de celle-ci une région à faible potentiel en terres cultivables. Les principales activités agricoles s'articulent autour de l'oléiculture et de l'élevage.

Quant aux activités industrielles, privées ou étatiques, sont concentrées au niveau des rives de l'oued Sebaou. L'industrie englobe les activités se rapportant à l'électroménager, fabrication électro-industrielles, transformation du bois, du plastique et du textile.

L'activité agroalimentaire intéresse le secteur de conditionnement d'eau minérale et de laiteries...etc

Quant au secteur de la pêche qui est en phase embryonnaire est accompagné par deux ports à savoir celui de Tizgirt et d'Azeffoune. Le secteur de tourisme englobe principalement le parc national de DJURDJURA, les sites romains et l'activité artisanale.

La répartition des emplois par branche d'activités (source RGPH 98) est la suivante :

Administration.....	36%
Commerces, transport et services.....	35%
Industrie.....	12%
BTPH.....	11%
Agriculture.....	05%

I.4. Répartition des terres agricoles

Les principaux chiffres indicateurs concernent les superficies agricoles et leurs répartitions sont les suivant :

- Surface agricole totale (SAT).....143 253ha
- Surface agricole utile (SAU).....96 914ha
- Pacage et parcours.....27 299ha
- Terres improductives des exploitations.....19 040ha
- Les terres des domaines forestiers (forêts et maquis) représentent 115000ha.

La SAU qui est égale à 96,914 ha représente 67,7% de la SAT et 32,7% de la superficie totale de la Wilaya (Larbi & Oumedjebeur, 2013)

I.5. Eaux usées :

Selon une enquête menée par le ministère des ressources en eau, le taux de raccordement pour la Wilaya de Tizi-Ouzou est de 83% et le volume rejeté est de 18,923m³ / jour. Il existe dans la wilaya 10 stations d'épuration dont seulement 08 sont en service.

I.6. Situation climatique

Le climat de la région de Tizi-Ouzou est typiquement méditerranéen, caractérisé par un hiver doux, printemps précoce, un été chaud et un automne doux et humide.

La température et la pluviosité sont les deux éléments principaux du climat.

I.6.1. Température

La température est influencée par la topographie du milieu à savoir l'altitude, le relief, la pente et l'exposition, qui interviennent de façon déterminant dans la différenciation au sein d'un même méso climat et/ou de microclimat particuliers (Alainet Robert, 1996).

Tableau12.Températures moyennes mensuelles de la Wilaya da Tizi-Ouzou (2018 -2019)

Année	2018			2019							
	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout
T° moy (°C) mensuel	19,1	14,9	11,9	9,2	10,7	13,5	15,3	18,8	25	29,1	28,5
T° Max moy(°C) mensuel	24,9	20,2	17,3	14,0	16,9	19,8	22,5	27,7	32,4	35,5	35,5
T° Min moy (°C) mensuel	15,3	11,4	7,7	5,8	6,2	8,6	11,8	13,5	16,8	21,5	23,0

(Source : Station météorologique de Boukhalfa 2019)

Du mois de janvier au mois de juillet, les températures moyennes mensuelles augmentent d'une façon significative, par la suite, il y'a diminution jusqu'au mois de janvier. Les mois les plus frais de l'année sont Janvier et Février, avec des températures moyennes respectivement 9,2°C et10, 3°C. Le mois le plus chaud est le mois de juin 2019 avec une température moyenne de 25° C.

I.6.2. Pluviométrie et Humidité de l’air

L’eau provient des précipitations (pluie, neige et grêle), des phénomènes physiques et physiologiques respectivement l’évaporation et transpiration. En Algérie, la pluviosité augmente avec l’altitude ce qui nous mène à dire que les pluies sont d’origine orographique. Elles sont aussi soumises à l’influence de la continentalité et la latitude en allant vers de la mer (Seltzer, 1946 ; in Rebai et Bourahla, 2006).

Le Tableau 13. Précipitations moyennes mensuelles de la Wilaya da Tizi-Ouzou (2018 - 2019)

Année	2018			2019							
Mois	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout
PR en mm	182	175	44,0	187	51	51	56	35	1	11	10
PR (Mx en 24hres)	43,0	93	34,0	41,0	28	19,0	15	14	0,8	9,0	3,1
DATE	17	3	14	23	2	21	1	2	19	31	13

(Source : Station météorologique de Boukhalfa 2019)

D’après le tableau 13, on remarque que le niveau pluviométrique le plus élevé est enregistré durant la période Octobre –Novembre (357mm). Le mois d’octobre représente une période la plus pluvieuse avec 182 mm. A partir de ce mois, on remarque que les précipitations diminuent continuellement.

Le Tableau 14. Taux d’humidité moyens mensuels (année 2018 -2019)

Année	2018			2019							
Mois	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout
Humidité moy en %	76	77	83	84	76	74	77	66	60	55	59
Hum/moy mini en %	50	54	62	65	50	49	54	42	36	30	37
Hum/moy Max en %	92	91	94	94	91	90	93	89	83	78	80

(Source : Station météorologique de Boukhalfa 2019)

I.7. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен

Le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен permet de déterminer la période sèche et la période humide à partir des données mensuelles pluviométriques et thermiques. Ces deux auteurs précités signalent qu'un mois est considéré comme sec lorsque le double de la température mensuelle est supérieur ou égale aux précipitations moyennes mensuelles ($P \leq 2T$).

Avec :

P : précipitations moyennes mensuelles (mm)

T : température moyenne mensuelle (°C)

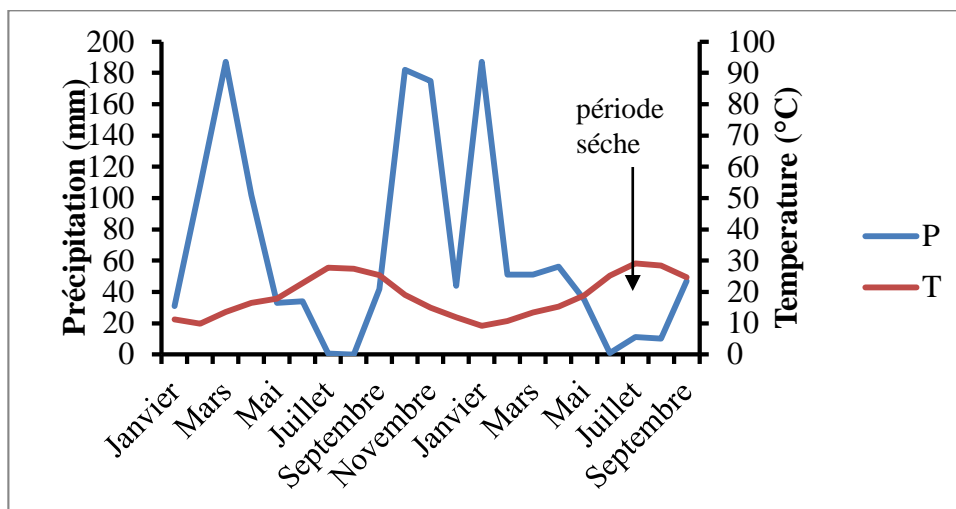


Figure 10. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен pour la période janvier 2018- septembre 2019.

Durant la période janvier 2018- septembre 2019, le diagramme ombrothermique pour la wilaya de Tizi-Ouzou révèle une saison sèche qui s'étale de mi-mai à mi-septembre 2019.

II. Choix des boues :

On a prélevé des échantillons de boues résiduaires sèches des huit stations d'épurations de la wilaya de Tizi-Ouzou qui sont destinées à l'épandage agricole (sur sols cultivés en arbres fruitiers).

III. Localisation géographique des huit stations :

III.1. STEP de Boukhalfa

La station d'épuration de Boukhalfa est située à l'ouest de la ville de Tizi-Ouzou, sur la rive gauche de l'oued Bouaid à 40 mètres de la RN 12 (à proximité de l'autoroute Tizi-Ouzou - Alger) qui déverse vers Oued Sebaou au nord.

Elle traite les effluents domestiques de la partie ouest de l'agglomération de Tizi-Ouzou et les déverse dans l'oued Sebaou. Elle s'étale sur une superficie d'un ha environ et possède une capacité de 25000 équivalents habitants correspondant à un volume d'eau usée traitée de 3750m³/j.

III.2. STEP de Draa Ben Khedda :

La station d'épuration de la ville de D.B.K est située à la sortie ouest de la ville, en contrebas de la RN12 reliant Alger à Tizi-Ouzou. Conçue au cours de l'année 1972 [l'étude a été dressée par SAFEG ; (Société française d'études et de Gestion)]. Sa mise en service remonte à 1974 et sa gestion a été menée par la Direction de l'Hydraulique de Tizi-Ouzou à ce jour (DJEBA & TAIEB, 2015).

III.3. STEP d'épuration Est de Tizi-Ouzou

Est un établissement d'une capacité de 120 000 équivalents habitants et d'une superficie de 35591m² dont 14714m² Batis. Elle a été conçue pour épurer les eaux usées urbaines afin de protéger le milieu récepteur, en l'occurrence l'Oued Sebaou. Cette station est située sur la rive gauche d'Oued Sebaou à 200 m en amont du Pont de Bougie sur le chemin de Wilaya n° 124 reliant Tizi-Ouzou à Béjaia. La STEP est donc implantée à la sortie Est de la ville de Tizi-Ouzou, en dehors du tissu urbain (manuel juin, 2012).

III.4. STEP d'épuration DEM

La station d'épuration des eaux usées de Draa El Mizane usées située à la sortie nord de la ville de Draa El Mizane, au lieu dit Barbarou. Cette station répondra probablement à une exigence des plus pressantes en matière de lutte contre la pollution et de la sauvegarde de l'environnement. En effet, les eaux usées de toute cette localité sont, depuis des années, déversées directement dans l'oued qui s'étend sur la RN25. Son portail donne sur le chemin Inegrachen. (www.elwatan.com).

III.6. STEP d'épuration de Boghni

La station d'épuration de Boghni est située à 50 mètres du coté droit du CW°128 (ONA, 2019).

III.7. STEP d'épuration de Tadmaït

La station d'épuration de Tadmaït est située à proximité de la route nationale N°25 (ONA, 2019)

III.8. STEP d'épuration de la ville d'Azzefoune

La station d'épuration d'Azzefoune est située à 3KM du chef lieu et à 7 mètres de la mer (ONA, 2019).

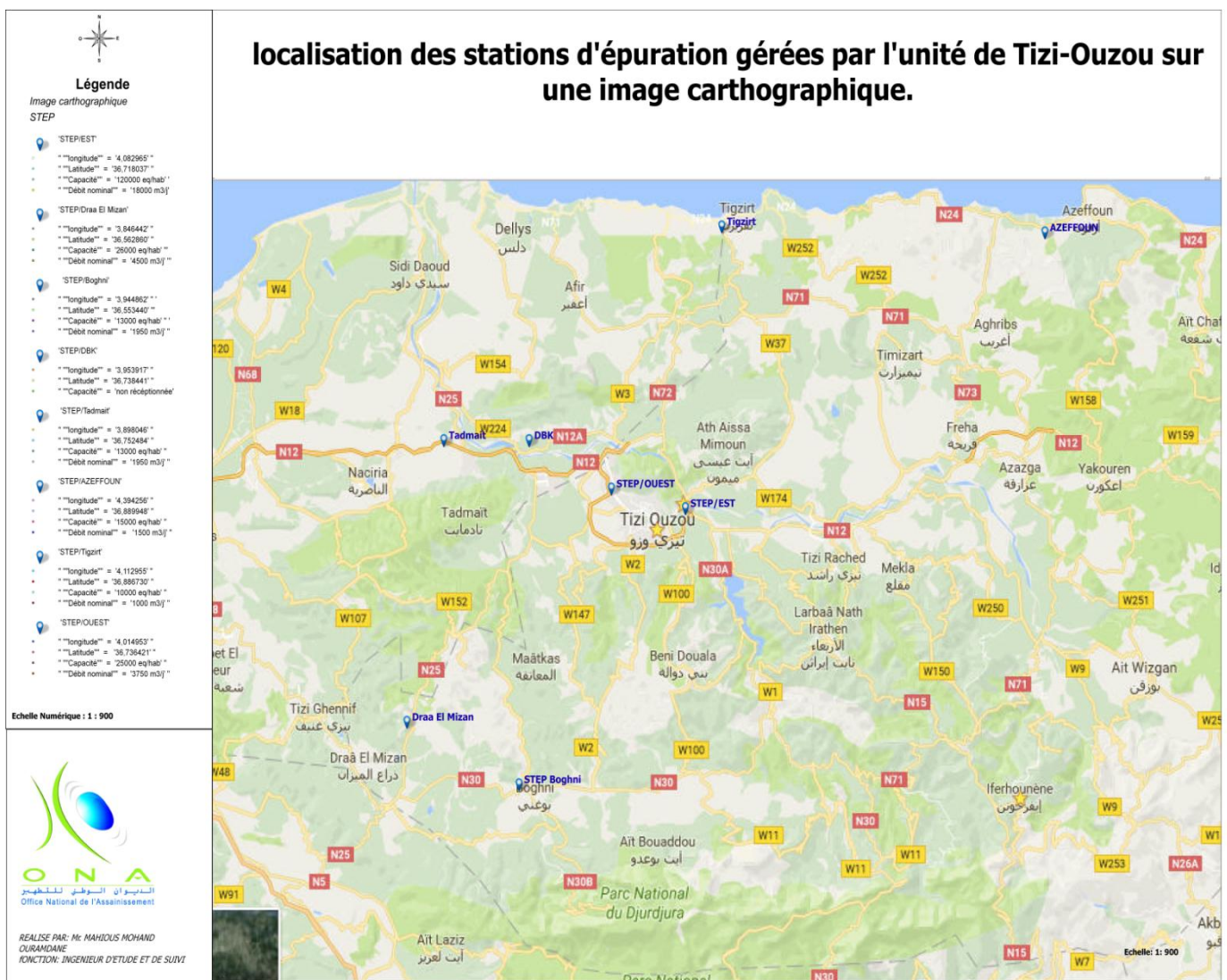


Figure 11 : Localisation des STEP de la wilaya de Tizi-Ouzou

Tableau 15 : Caractéristiques fonctionnelles des STEP de la wilaya de Tizi-Ouzou

Wilaya	Tizi-Ouzou							
Nom (Step)	Tizi-Ouzou Est	TiziBoukhalfa	Tadmait	Boghni	Draâ El Mizan	Draâ Ben Khedda	Tigzirt	Azeffoune
Date de mise en service	juillet-00	1985 réhabilitée en 2006	1984 réhabilitée en 2007	1985 réhabilitée en 2006	mars-07	1974 en cours d'extension	mai-07	juillet-06
Procédé	Boues activées "moyenne charge"	Boues activées "faible charge"	Boues activées "faible charge"	Boues activées "faible charge"	Boues activées "faible charge"	Boues activées "faible charge"	Boues activées "faible charge"	Boues activées "faible charge"
Capacité actuelle en EQH	120 000	25 000	13 000	13 000	30 000	25 000	5 000	5 000
Volume réel entrant à la Step en m3/j	17 411	2 575	580	353	147	3 750	101	300
Cnes raccordées à la Step	Tizi-Ouzou Nord Est, Est, et Sud, Tazmalt, Redjaouana, Abid Chamlal, Sikh Oumed-dour	Boukhalfa, Tala Allam, TiziOuzou Ouest et Nord ouest en partie	Tadmait Est	Partie Est de la ville de Boghni	Ville de Draâ El Mizan et Draâ Sachem	Ville de Draâ Ben Khedda	Tigzirt	Ville d'Azeffoun
Impact	Protection de la nappe phréatique de l'oued Sébaou			Protection de l'oued Boghni		Protection de la nappe phréatique de l'oued Sébaou	Protection du littoral	

Source : DRHW de Tizi-ouzou

IV. Etude expérimentale**IV.1. Protocole expérimental**

Pour l'investigation, on a opté pour un échantillonnage de type aléatoire.

Les lits de séchage des boues sont divisés en 4 blocs. Chaque bloc est subdivisé en 4. Ensuite, on prend un échantillon de chaque bloc et on les mélange pour avoir un échantillon représentatif pour chaque STEP.

IV.2. Analyse des échantillons

Les échantillons prélevés dans différentes stations d'épuration d'une façon aléatoire sont acheminés au laboratoire. À leurs réceptions, on a procédé d'abord au séchage à l'air libre, puis au broyage et au tamisage avec un tamis de 2 mm, avant tout traitement physique et chimique. Ils sont, par la suite, conservés dans des sachets dans un endroit sec.

Les échantillons, ainsi obtenus, sont soumis à une série d'analyses chimique.

IV.2.1. Analyses chimiques**IV.2.1.1. Mesure de pH_{eau}**

L'acidité, la neutralité ou l'alcalinité des boues est définie par la concentration en H_3O^+ (ou H^+ pour faciliter l'expression) libre, existant dans la solution des boues (Mathieu, 2003).



Figure 12: pH mètre

➤ Le mode opératoire :

Consiste à suivre les étapes suivantes :

- . Peser 10g d'échantillon des boues dans un bécher ;
- . Ajouter 25 ml de l'eau déminéralisée ;
- . Agiter pendant 10 minutes ;
- . Laisser reposer pendant 2 heures ;
- . Plonger l'électrode dans le liquide surnageant et effectuer la mesure ;
- . Laisser la lecture se stabiliser durant plusieurs secondes et noter les valeurs au deuxième décimal.

IV.2.1.2 Phosphore assimilable:

IV.2.1.2.1 Choix de la méthode

Différents auteurs ont adopté des méthodes d'analyses du phosphore assimilable dans les boues Truog (1930) ; Das (1930) ; Olsen et al (1954) et etc... Après avoir mesuré le pH des solutions des boues, on a opté pour la méthode Olsen et al (1954).

IV.2.1.2.2.Principe de la méthode

L'extraction de l'acide phosphorique dans cette méthode est faite avec une solution de NaHCO_3 à 0,5N dont le pH est de l'ordre de 8,5 sur une suspension boue/solution égale à 5/100.

La suspension est agitée pendant ½ heure puis filtrée, le phosphore est ensuite dosé par colorimétrie.

IV.2.1.2.3 Préparation des réactifs

- Bicarbonate de sodium (NaHCO_3) : Peser 42g et les faire dissoudre dans 900ml d'eau distillée dans une fiole d'un litre. Ajuster à pH 8,5 à l'aide d'un pH-mètre avec de la soude NaOH une fois normale (1N). Compléter ensuite à un litre avec de l'eau distillée.

- Réactif chloromolybdique : Peser 25g de molybdate d'ammonium dans une fiole de 1000ml, ajouter 200ml d'eau distillée chaude. Ajouter lentement 275 ml d'acide sulfurique dans 475ml d'eau distillée. Laisser refroidir. Ensuite, ajouter lentement la solution de molybdate d'ammonium à la solution d'acide sulfurique. La solution obtenue est refroidie à la température ambiante puis ajuster à 1000ml à l'eau distillée.

- Acide ascorbique : Peser 1g d'acide ascorbique dans 100ml d'eau distillée.

-Solution étalon d'orthophosphate : la solution est préparée à partir du phosphate monopotassique (KH_2PO_4). Peser 0,439g de phosphate mono-potassique et les introduire dans

une fiole de 1000ml. Ajouter 500ml d'eau distillée puis agiter l'ensemble pour bien dissoudre le produit et ajuster au volume imposé à l'eau distillée. Ensuite, on obtient une solution à 100 mg de p/l. Dans une fiole de 200 ml, introduire 10 ml de cette solution et ajuster au volume à l'eau distillée afin d'atteindre une solution à 5 mg de p/l.

IV.2.1.2.4. Etablissement de la gamme étalon

Dans des fioles de 25 ml, on introduit respectivement les volumes des solutions suivantes :

N° des fioles	0 (témoin)	1	2	3	4	5	6
Volumede KH_2PO_4	0	0,5	1	2	4	6	8
Solution de NaHCO_3	5	5	5	5	5	5	5
réactifchloromolybdique	5	5	55	5	5	5	5
acideascorbique	1	1	1	1	1	1	1
Eau distillée	14	13,5	13	12	10	8	6
Concentration finale en mg de p/l	0	0,1	0,2	0,4	0,8	1,2	1,6

Laisser dégager le CO_2 après l'addition du réactif chloro-molybdique. Maintenir les tubes dans le bain marie à 80°C pendant 10 minutes puis passer au colorimètre à une longueur d'onde de 660 nm.



Figure 13 : Solution de la gamme étalon

IV.2.1.2.5. Mode opératoire:

a. Extraction

- Peser 5 g de boue séchée (tamisée à 0,2 mn). Les placer dans une fiole d'agitation ;
- Ajouter 100 ml de NaHCO_3 ;
- Remuer pendant 30 minutes avec un agitateur va et vient ;

- Filtrer toute la suspension avec papiers à filtration lente. Si le liquide n'est pas claire, recommencer la filtration.



Figure 14 : Filtration

b. Spectrophotométrie

Dans une fiole jaugée de 25 ml, mettre successivement :

- 5 ml de l'extrait obtenu sur l'échantillon de boue ;
- Ajouter doucement 5 ml de réactif chloro-molybdique (laisser dégager le CO_2) ;
- 1 ml de la solution d'acide ascorbique ;
- Ajuster au volume de 25 ml avec l'eau distillée et bien homogénéiser la solution ;
- Laisser reposer la solution pendant 10 mn (pour la stabilisation de la coloration bleue) ;
- Maintenir les tubes dans le bain marie pendant 10 minutes ;
- Colorimétrie de la solution : utiliser des cuves de 2 cm pour une longueur d'onde de 660nm.



Figure 15 : Effervescence et coloration bleue après l'ajout de réactif chloro-molybdique



Figure 16: Bain marie



Figure 17 : Spectrophotomètre

c. Calcul de la concentration du phosphore en ppm

$$P \text{ (ppm)} = X \cdot V \cdot U \cdot 100 / 1000 \cdot V \cdot P = X \cdot 100$$

Avec:

X : Concentration lue sur le graphique en ppm

U : Volume colorimétrique (25 ml)

V : Volume de la prise d'essai (5 ml)

P : Poids de la prise de boue (5 g)

IV.2.1.3. Potassium (K) assimilable

Le principe de la méthode consiste à extraire le potassium soluble et échangeable avec une solution d'acétate d'ammonium 1N à pH 7. Le potassium soluble est dissout et extrait par la solution d'acétate d'ammonium. Le potassium échangeable est déplacé par l'ammonium et il est libéré dans la solution d'extraction. Le potassium extrait, qui constitue le potassium assimilable, est dosé par spectrophotométrie.

IV.2.1.3.1. Extraction du potassium

- Préparer une solution d'acétate d'ammonium 1N en introduisant 77,08 g d'acétate d'ammonium dans une fiole de 1000 ml et ajuster au volume à l'eau distillée. Agiter jusqu'à la dissolution complète du produit. Mesurer le pH de la solution qui doit être égal à 7. Si le pH est différent de cette valeur, il faut l'ajuster avec l'acide ou la base correspond (acide acétique ou hydroxyde d'ammonium).
- Peser 5g de boue et les placer dans une fiole de 200 ml ;
- Ajouter 50 ml de la solution d'acétate d'ammonium ;

- Agiter pendant 2 heures ;
- Filtrer la suspension dans une fiole jaugée de 50 ml, compléter au trait de jauge à l'eau distillée ;
- Préparer une dilution de 1/10 en mettant 5 ml de la solution extraite dans une fiole de 50 ml puis ajuster au volume à l'eau distillée ;
- Après le passage de la gamme d'étalonnage, passer l'échantillon au spectrophotomètre à flamme.

IV.2.1.3.2. Préparation de la gamme d'étalonnage

Le dosage du potassium au spectrophotomètre à flamme nécessite d'étalonner l'appareil de mesure. La gamme d'étalonnage est préparée de la façon suivante :

- Solution mère à 1000 ppm : introduire 1,907 g de KCL dans une fiole jaugée de 1000 ml, bien agiter et ajuster au volume.
- Solution fille à 100 ppm : prendre 10 ml de la solution mère, les introduire dans une fiole de 100 ml puis ajuster au volume à l'eau distillée.
- Solution d'étalonnage : prendre des fioles de 100 ml et introduire les volumes suivants :

Solution N°	Nombre de ml de la solution fille à 100 ppm	Concentrations obtenues en ppm
1	0,5	0,5
2	1	1
3	2	2
4	4	4
5	8	8
6	12	12
7	16	16
8	20	20

- Compléter au trait de jauge avec la solution d'acétate d'ammonium ou avec l'eau distillée ;
- Passer la gamme d'étalonnage au spectrophotomètre et noter la lecture obtenue pour chaque concentration.

IV.2.1.3.3. Calcul de la concentration du potassium en ppm

- Calculer le coefficient d'étalonnage en divisant la somme des lectures par la somme des concentrations (C).
- Calculer K en meq/100g de boue.

$$K \text{ en meq/100g} = \frac{L . D . V . 100}{C . 1000 . P . 39}$$

Avec :

L : Lecture correspondant à l'échantillon

C : Coefficient d'étalonnage

D : Inverse du rapport de dilution (= 1 dans le cas ou aucune dilution n'est réalisée)

V : Volume extrait (50 ml)

P : Prise d'essai (5g)

A : Facteur de conversion mg-méq (1/39)

Conclusion générale

Conclusion

A travers cette étude dont l'objectif est d'évaluer les valeurs fertilisantes en phosphore et en potassium des boues urbaines utilisées comme amendement organique sur les sols cultivés en arbres fruitiers dans la wilaya de Tizi-Ouzou.

Les résultats d'analyses chimiques en pH, en phosphore et en potassium assimilables ainsi que l'évaluation de la contamination par les métaux lourds (Zn, Pb, Ni...) des boues étudiées, nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Un pH légèrement acide à neutre, d'où leurs utilisations sur les sols agricoles ne présentent aucun effet sur la solution du sol, mais il est conseillé de les épandre sur des sols alcalins ou bien les chauler avant l'épandage.
- Des teneurs faibles en potassium assimilable, d'où leur apport sur les sols agricoles doit s'accompagner d'une fertilisation chimique potassique, assurant les besoins en potassium, ou les co-composter avec d'autres matières organiques riches en cet élément tels que les sous produits oléicoles et les fumiers.
- Un potentiel important en phosphore assimilable, ce qui induit à augmenter sa biodisponibilité dans le sol. De ce fait, les boues sont qualifiées d'amendement phosphaté.

L'emploi des boues, pourrait être recommandé chaque fois que le respect des normes en métaux lourds, polluants organiques et en agents pathogènes soit vérifié. C'est un critère primordial dans le choix de l'utilisation des différentes boues.

D'après les données en métaux lourds, obtenues par l'ONA, les boues étudiées sont largement inférieures aux normes AFNOR. Les risques de toxicité liés à ces boues sont donc considérées faibles et ne présentent pas de contraintes pour une éventuelle valorisation dans le domaine agricole.

Ces caractéristiques peuvent donner aux boues résiduaire une valeur agronomique très intéressante permettant ainsi de les recycler et de les valoriser en agriculture.

Les boues résiduaire peuvent donc avoir un rôle agronomique dans l'amélioration de la fertilité du sol et économique du fait qu'elles ne sont pas coûteuses contrairement aux engrais.

Ce double rôle doit nous inciter à élargir notre champ d'action en rapportant ces résultats obtenus au laboratoire et à essayer de les concrétiser sur le terrain.

Conclusion générale

Perspectives

En générale, le phosphore et le potassium ne sont pas les seuls éléments à prendre en compte lors d'utilisation des boues en agriculture : il est donc nécessaire de moduler les apports en fonction des autres fertilisants présents dans celles-ci tels que l'azote et la chaux (cas des boues chaulées). De plus, la présence d'éléments indésirables (éléments traces métalliques, micro-polluants organiques) doit être gérée minutieusement afin d'éviter toute sorte de contamination.

Tous ces résultats peuvent être satisfaisants vis-à-vis des plantes. Cependant, on ne peut pas affirmer que l'apport de ces boues peut être bénéfique quelque soit la dose de ces dernières. Une étude de l'effet de différentes doses sur la croissance et le développement des arbres fruitiers s'impose afin de confirmer l'efficacité de ces boues, ainsi que le suivi obligatoire de la qualité des sols et des produits agricoles.

I. Résultats et discussion

I.1. Résultats d'analyses des boues et leur interprétation

I.1.1. Le pH

Les pH des différentes boues étudiées sont regroupés dans le tableau ci-après :

Tableau 16: pH des boues des différentes stations étudiées

STEP	Echantillon	pH	moyenne	écart type
Boghni	R 1	6,29	6,38	0,095
	R 2	6,48		
	R 3	6,38		
DEM	R 1	6,35	6,24	0,093
	R 2	6,2		
	R 3	6,18		
Boukhalfa	R 1	5,86	5,81	0,046
	R 2	5,8		
	R 3	5,77		
Tadmait	R 1	5,6	5,58	0,032
	R 2	5,55		
	R 3	5,61		
DBK	R 1	5,96	5,95	0,045
	R 2	6		
	R 3	5,91		
Est	R 1	5,3	5,37	0,07
	R 2	5,44		
	R 3	5,38		
Azzefoune	R 1	5,6	5,6	0,03
	R 2	5,57		
	R 3	5,63		
Tigzirt	R 1	5,06	5,05	0,017
	R 2	5,06		
	R 3	5,03		

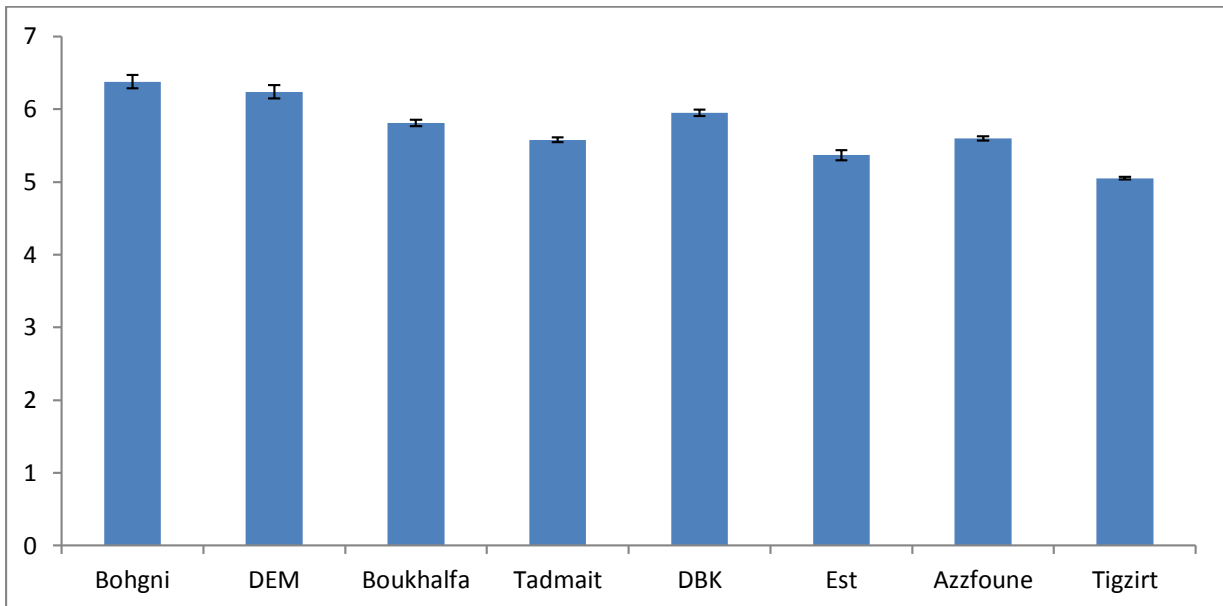


Figure 18 : les pH moyens des boues étudiées

Généralement le pH des boues résiduaires se situe dans un intervalle de valeurs bien précis $5 < \text{pH} < 8$. Pour les échantillons de nos stations, les valeurs moyennes de pH sont comprises entre $5,05 < \text{pH} < 6,38$, donc, considérées comme faiblement acides (Leclech, 2000). Ces valeurs de pH sont acceptables car elles sont comprises entre 5 et 7, ce qui rend les éléments minéraux assimilables par les plantes. Entre autre, cette plage de pH peut-être expliquée par le taux réduit du calcaire actif. En effet, l'analyse statistique à un facteur de comparaison a révélé une différence très hautement significative des pH des boues des différentes stations et le test de Newman et Keuls classe les stations en sept groupes (A, B, C, D, E, F et G) (annexe 01). Le pH le plus élevé est celui des boues de la station de Bohgni avec une valeur de 6,38, tandis que le pH le plus faible qui est de 5,05 est celui des boues de la station de Tizirt. Quant aux pH intermédiaires sont observés au niveau des boues des autres stations, à savoir : DEM, DBK, Boukhalfa, Azzfoune, Tadmaït et Est avec des valeurs respectives 6,24 - 5,95 - 5,81 - 5,6 - 5,58 et 5,37.

En général, le pH des boues ne représente pas un facteur limitant pour son utilisation en agriculture, bien au contraire, il favorise les conditions de développement de l'activité des micro-organismes dans le sol.

D'après Mengel et Kirkby (1978) in Chamayou, Maeret et Salsac (1982), le pH des sols est un facteur important pour la solubilité des éléments nutritifs (phosphore, potassium...). Dans le sol, l'intervalle de pH des boues le plus favorable à la disponibilité des éléments minéraux se situe entre 5,5 et 6,5, donc leur utilisation sur sol agricole ne peut pas entraîner des effets néfastes sur la solution du sol, mais il est conseillé de les épandre sur sol alcalin, ou bien les chauler avant épandage.

Le pH peut avoir une influence sur la rétention des polluants tels que les métaux lourds qui sont mieux retenus lorsque le pH est élevé (Durand, 2003). En effet, les cations métalliques peuvent se combiner avec les anions hydroxydes (OH⁻) formant des hydroxydes métalliques peu ou pas solubles (Tran, 2009). Pour cette raison, le chaulage et le compostage des boues s'imposent pour rendre les polluants métalliques immobiles et ainsi localiser la pollution par ces derniers, ce qui diminue la toxicité due aux eaux de lessivage.

I.1.2. Le potassium assimilable

Les teneurs moyennes en potassium assimilable des différentes boues étudiées sont regroupées dans le tableau ci-après :

Tableau 17. Résultats des teneurs en potassium assimilable des boues de différentes stations étudiées

STEP	Echantillon	K assimilable (mg/kg)	Moyenne concentration (mg/kg)	K ₂ O kg/ tonne	écart type
Boghni	R 1	39,22	39,31	0,047	1,24
	R 2	40,61			
	R 3	38,12			
DEM	R 1	106,61	105,80	0,126	0,80
	R 2	105,8			
	R 3	105			
Boukhalfa	R 1	96,75	94,88	0,113	1,75
	R 2	93,27			
	R 3	94,61			
Tadmait	R 1	61,73	62,29	0,074	0,748
	R 2	62			
	R 3	63,14			
DBK	R 1	97,66	98,93	0,118	1,346
	R 2	98,78			
	R 3	100,34			
Est	R 1	64,68	65,02	0,078	1,47
	R 2	66,63			
	R 3	63,75			
Azzefoune	R 1	90,78	92,73	0,111	1,724
	R 2	93,36			
	R 3	94,05			
Tigzirt	R 1	98,05	97,51	0,117	0,0809
	R 2	97,9			
	R 3	96,58			

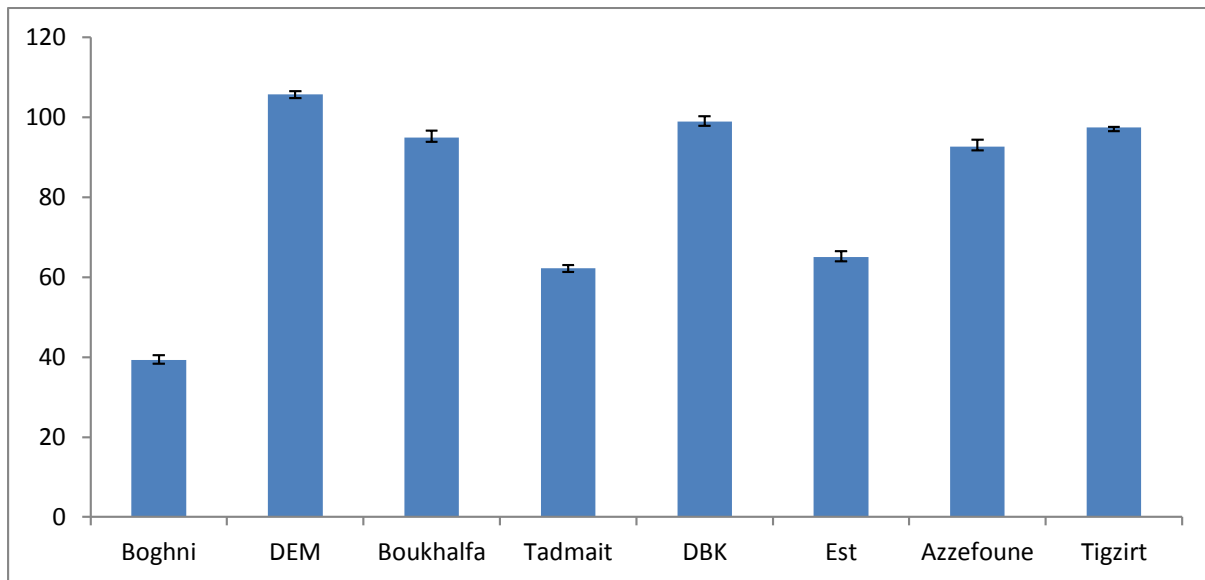


Figure 19 : Teneur en potassium assimilable des boues de différentes stations étudiées

Les teneurs en potassium assimilable des boues des différentes stations ont montré une fluctuation très remarquable. La teneur la plus élevée de cet élément caractérise la boue de la station DEM avec 105,80 mg/kg, suivi par celle de la station de DBK et celle de la station de Tizirt avec des teneurs respectives de 98,93 et 97,51mg/kg. Par contre les teneurs des boues des stations de Boukhalfa et d'Azzefoune sont très proches avec des valeurs respectives de 94,88 et 92,73 mg/kg. Les boues des stations Est et Tadmaït viennent ensuite avec des teneurs très proches soient respectivement 65,02 et 62,29 mg/kg. La teneur la plus faible qui est de 39,31mg/kg est celle de la boue de la station de Boghni. En effet, l'analyse statistique à un facteur de comparaison a révélé une différence très hautement significative des teneurs en potassium assimilable des boues des différentes stations et le test de Newman et Keuls classe les stations en six groupes (A, B, C, D, E et F) (annexe 02). Cette variation de la teneur en potassium assimilable entre les différentes stations est due à la nature des rejets, le nombre d'habitants, l'activité exercée, le mode de conditionnement dans chaque station.

Les résultats obtenus montrent que les teneurs en K_2O des différentes boues étudiées, se situent au dessous de la concentration admissible selon ESCO MAFOR (2014) (annexe 04). Toutefois, les apports en potassium par les boues de stations d'épuration sont négligeables à cause de sa solubilité, d'où une grande quantité se perd avec l'effluent dans le milieu récepteur (eaux épurées). Malgré les faibles teneurs, le potassium présent dans les boues est facilement assimilable par les plantes (Sabey et Hart, 1975 ; Pérez Garcia *et al.*, 1986). On peut donc souligner que l'application des boues ne fournit pas suffisamment de K pour répondre aux exigences des cultures. De ce fait, on pense qu'une fertilisation chimique assurant les besoins en potasse est nécessaire dans le cas de la réutilisation de ces boues en

agriculture ou bien le co-compostage des boues urbaines avec d'autres matières organiques riches en cet élément, tel que les sous produits oléicoles et les fumiers.

I.1.3. Le phosphore assimilable

Les teneurs moyennes en phosphore assimilable obtenues pour les différentes boues étudiées sont regroupées dans le tableau ci-après :

Tableau18 : Résultats du phosphore assimilable des boues de différentes stations étudiées

STEP	Echantillon	P assimilable (mg/kg)	Moyenne concentrations (mg/kg)	P ₂ O ₅ (kg/tonne)	écart types
Boghni	R_1	1170	1170,33	2,680	0,577
	R 2	1171			
	R 3	1170			
DEM	R 1	1091	1092	2,500	1,732
	R 2	1094			
	R 3	1091			
Boukhalfa	R 1	1159	1160,33	2,657	1,528
	R 2	1162			
	R 3	1160			
Tadmait	R 1	1191	1189,33	2,723	1,528
	R 2	1188			
	R 3	1189			
DBK	R 1	1151	1151	2,635	1
	R 2	1152			
	R 3	1150			
Est	R 1	1103	1102	2,523	1
	R 2	1101			
	R 3	1102			
Azzefoune	R 1	1172	1172,66	2,685	0,577
	R 2	1173			
	R 3	1173			
Tigzirt	R 1	1149	1148,66	2,630	1,528
	R 2	1150			
	R 3	1147			

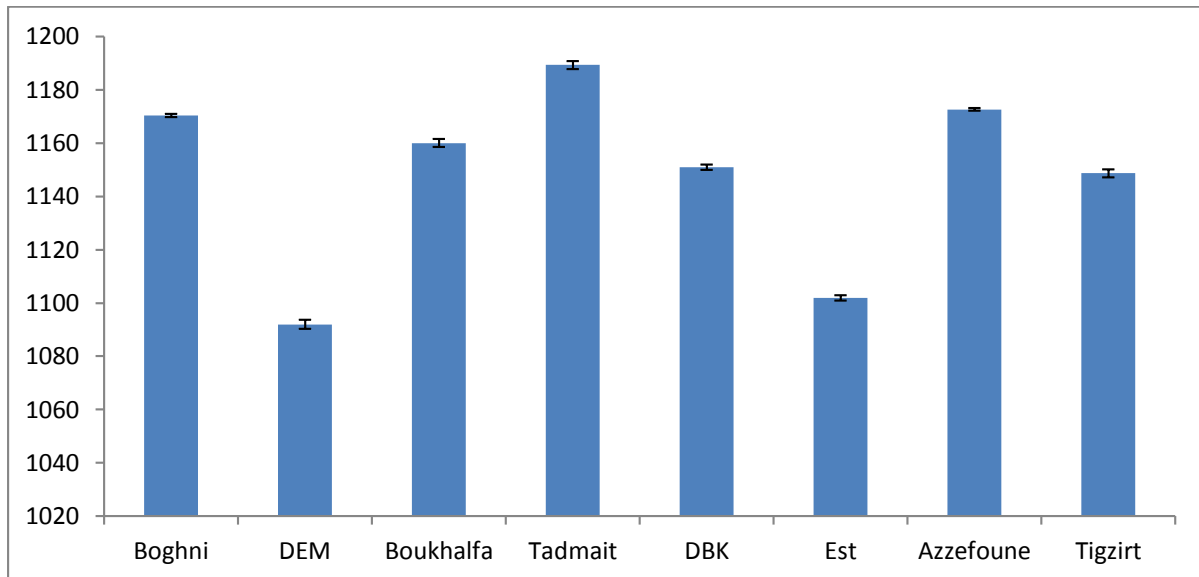


Figure 20 : Teneurs en phosphore assimilable des boues de différentes stations étudiées

Les teneurs en phosphore assimilable des boues des différentes stations, ont montré une fluctuation très remarquable. La teneur la plus élevée des boues en cet élément, est observée au niveau des boues de la station Tadmaït avec une valeur de 1189,33 mg/kg. Tandis que la plus faible valeur qui est de 1092 mg/kg est celle de la boue de la station de DEM. Les teneurs intermédiaires sont observées au niveau des autres stations : Est, Tizirt, DBK, Boukhalfa, Boghni et Azzeffoune avec des valeurs respectives 1102 mg/kg, 1148,66 mg/kg, 1151 mg/kg, 1160,33 mg/kg, 1170,3 mg/kg et 1172,66 mg/kg. En effet, l'analyse de la variance à un facteur de comparaison a révélé une différence très hautement significative des teneurs en phosphore assimilable des boues des différentes stations et le test de Newman et Keuls, classe les stations en huit groupes (A, B, C, D, E, T, G et H) (annexe 03). Cette variation de la teneur en phosphore assimilable entre les différentes stations est due à la nature des rejets, le nombre d'habitants, l'activité exercée, le traitement biologique et le mode de conditionnement dans chaque station.

Les résultats obtenus montrent que les teneurs en P_2O_5 des différentes boues étudiées en P_2O_5 se situent dans la fourchette de la concentration admissible, dictée par ESCO MAFOR (2014) (annexe 4) et que cette variation est probablement due à l'origine des eaux usées qui sont riches en eaux ménagères et en composés phosphatés. Cette richesse en phosphore assimilable permet donc de qualifier ces boues de très bons amendements phosphatés, ce qui confirme l'efficacité de ces dernières vis-à-vis du stock du sol en cet élément (Morel, 1978 ; Pommel, 1979 ; Ouslati, 1998 ; Gasem, 2000). Il s'avère donc, que les boues urbaines peuvent aisément couvrir les besoins du végétal en phosphore et que leur application en agriculture améliore sa biodisponibilité dans le sol.

I.1.4. Les métaux lourds

Les boues ont toujours été considérées comme des fertilisants toxiques car elles renferment souvent des quantités élevées de métaux lourds, cependant les données de l’ONA concernant les analyses de ces derniers nous ont permis de conclure que nos boues répondent aux normes citées par AFNOR (1985). En ce qui concerne les teneurs en éléments traces métalliques, le tableau 19 représente les teneurs de ces derniers (ONA, 2018).

Tableau.19. Teneurs en métaux lourds des boues des différentes stations étudiées

Eléments (mg/kg)	Azzeffoune	DEM	Tigzirt	Boukhalfa	Tadmait	Boghni	DBK	Est	normes AFNOR
Nickel	33	28	18	23	28	23	27	27	50
Cuivre	115	72	50	115	150	209	133	133	1000
Cadmium	1	1	1	1,3	1,6	1	1	1	20
Plomb	54	75	25	58	75	106	106	106	800
Chrome	53	27	19	23	39	23	23	23	1000
Zinc	623	415	285	483	574	650	650	650	3000

Source : (ONA, 2018)

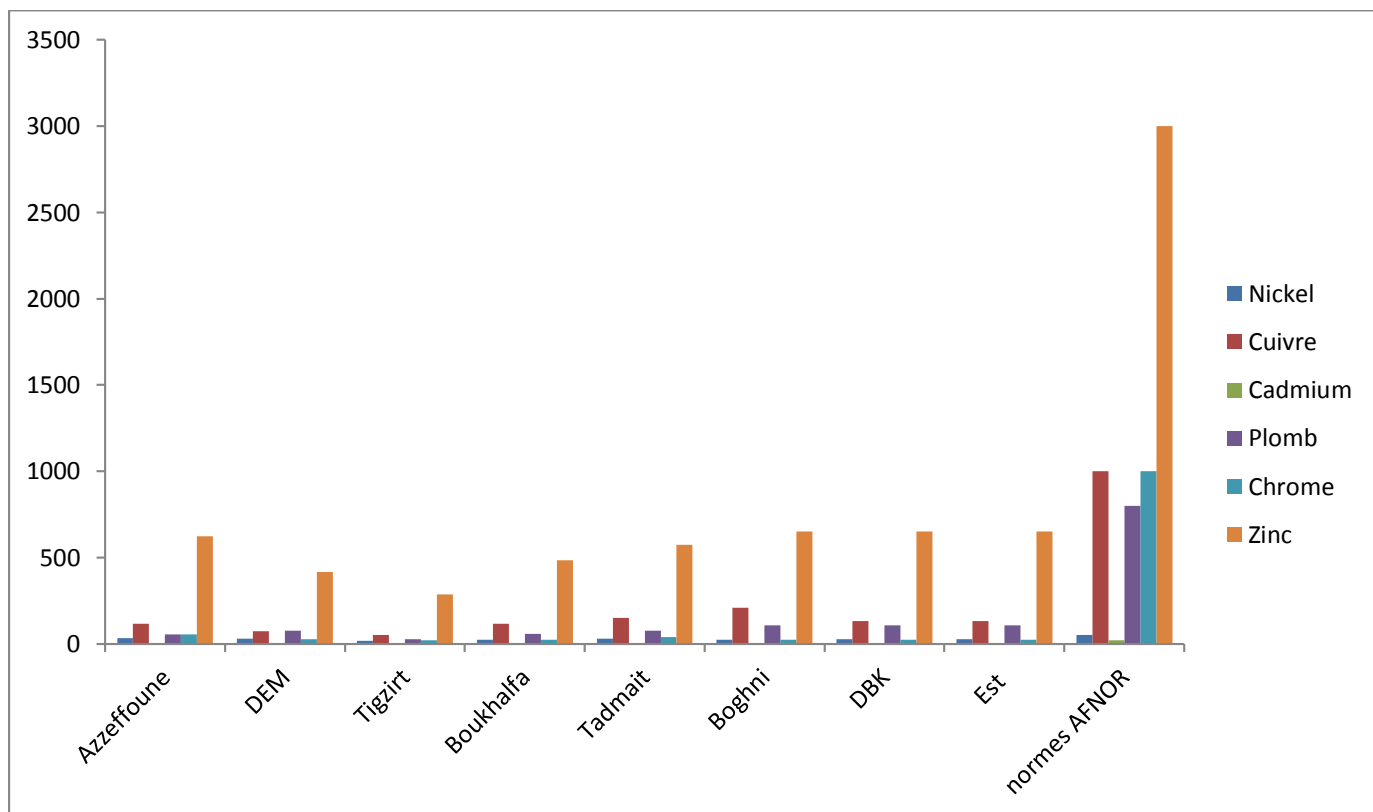


Figure 21 : Teneurs en métaux lourds des boues de différentes stations étudiées

Discussion des résultats

Les valeurs des métaux lourds des boues étudiées sont largement inférieures aux normes AFNOR, ce qui confirme qu'elles ne sont pas toxiques. A travers ces résultats, on constate que ces boues sont loin d'être contaminées par le cadmium et c'est aussi le cas pour les autres métaux (Cu, Ni, Cr, Zn et Pb), ce qui les rend valorisables en milieu agricole, à condition de vérifier leur composition en d'autres contaminants organiques et en agents pathogènes. Les boues qui représentent des faibles concentrations en métaux lourds sont celles de la station de Tigzirt. Selon Pommel (1981), le cadmium est apporté dans les boues presque exclusivement par des effluents d'origine industrielle et que c'est leur contenu en cadmium qui limitera à terme les doses d'apport de boues sur les végétaux consommables. En effet, ce métal se caractérise par sa mobilité et sa toxicité vis-à-vis de la chaîne alimentaire ; cette toxicité serait atténuée par la présence de zinc mais dans le cas des bouées étudiées la concentration de ce métal est très faible.

Références Bibliographiques

ABADOU C ; 2001. Contribution à l'étude d'impacts des résidus organiques sur les propriétés d'un substrat sableux après trois années d'application. En bac de végétation. Thèse d'ing. Agron. Université de Tizi-Ouzou.103p.

ADEME. , 1995. Les micropolluants métalliques dans les boues résiduaires des stations d'épuration urbaines. Edition ADEME. Guide et cahiers techniques, 209 p

ADEME ; 1996. La valeur azotée des boues résiduaires des stations d'épuration urbaines. 336p.

ADEME ; 1999. Situation du recyclage agricole des boues d'épuration urbaines en Europe et dans divers autres pays du monde, Ademe édition, Paris, pp. 159.

ADEME., 2001. Les boues d'épuration municipales et utilisation en agriculture. TH3616
<http://www.ademe.fr/collectivites/Dechets-new/mots-chiffres/chiffres-cles/dec.pdf>

AFSSA (Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments) ; 2008. Réutilisation des eaux usées traitées pour l'arrosage ou l'irrigation. 69p

AGGELIDES, S.M., LONDRA, P.A; 2000. Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of a loamy and clay soil. Bioresource Technology, 71, p 253-259.

ALEXANDER, M., D.A. ANDOW et J.W. GILLET; 1986. Fate and movement of microorganisms in the environment. Environmental Management, Vol. 10, No. 4, pp. 463-493.

ANNABI M ., 2005. Stabilisation de la structure d'un sol limoneux par des apports de composts d'origine urbaine : relation avec les caractéristiques de leur matière organique. Thèse doctorat de l'Institut National Agronomique, paris-grignon. 270

ANRED R ; 1982. La valorisation agricole des boues de la station d'épuration. Cahier technique 7.63p

ANRED., 1988. La valorisation agricole des boues de la station d'épuration .Cahier technique.23.117p

AMADOU H ; 2007. Modélisation du séchage solaire sous serre des boues de stations d'épuration urbaines. Thèses de doctorat, Université Louis Pasteur.

AMIR S., 2005. Contribution à la valorisation de boues de stations d'épuration par compostage. Devenir des micropolluants métalliques et organiques et bilan humique du compost. Thèse de doctorat en sciences Agronomiques de l'institut national Polytechnique de Toulouse.312p

ARCHIE S.G. & 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

Références Bibliographiques

BAIZE D., JANIEC S., 1997. Les éléments traces métalliques dans les sols (France). Edition INRA, 1997, 407p.

BAIZE D., COURBE C., SUC O., SCHWARTZ C., TERCE M., BISPO A., STERCHMANT. et CIESIELSKI H ., 2006. Epandage de boues d'épuration urbaines sur des terres agricoles : impact sur la composition en éléments en traces des sols et des grains de blé tendre. *Courier de l'environnement de l'INRA* N° 53 : 35-61.

BAUMONT S., 2003. Réutilisation des eaux usées épurées : risques sanitaires et faisabilité en ile-de France. L'ORS ile-de France. Ecole nationale supérieure agronomique de Toulouse (ENSAT), Jean-Philippe CAMARD, Agnès LEFRANC, chargés d'études à l'ORS et Antoine FRANCONI, chargé d'études à l'IAURIF

BENBRAHIM M., DENAIX L., GANUS J.M., TIMBAL J., CHOSSAT J.C., SCHEIFLER R., VAUFLEURY A.G ., BADOT P. M ., TRICOT A . et LOLIVE J., 2003. Effets environnementaux des épandages de boues de stations d'épuration en plantation de pin maritime. *Dossier de l'environnement de l'INRA* N° 25 : 95-105.

BENTERROUCHE I., 2007. Réponse écophysologique d'essences forestières urbaines soumises à une fertilisation avec les boues d'épuration. Mémoire de magistère en écologie et environnement. Fac. Sci. Nat. Vie. Univ. <Mentouri >, constantine, 198 p.

BIPFUBUSA M., N'DAYEGAMIYE A. & ANTOUN H., 2006. Evaluation des effets de boues mixtes fraîches et de leurs composts sur les rendements des cultures et leur nutrition minérale. *Agrosollutions17* :65-72.

BOHN, H.L., B.L. McNEAL et G.A. O'CONNOR ; 1985. Soil Chemistry. A.W.interscience publication. John Wiley and Sons. New York. 339 pages

BOUGRIER C., 2005. Optimisation du procédé de méthanisation par mise en place d'un co-traitement physico-chimique : Application au gisement de biogaz représenté par les boues d'épuration des eaux usées, Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, 2005.

BOUREKEB A., 2002. Possibilité de phytoremédiation des sols amendés avec des boues d'épuration par les Epinards et la laitue, Mémoire d'ingénieur. 100p.

BOURGEOIS S., MICHELIN J., FUNERY H., WIART J ; 1996. La valeur azotée des boues résiduaires des stations d'épuration urbaines. Collection ADEME « valorisation agricole des boues de stations d'épuration ». 336p.

BOUREKEB A., 2002. Ossibilité de phytoremédiation des sols amendés avec des boues d'épuration par les Epinards et la laitue, Mémoire d'ingénieur. 100p.

BROME V ; LEFEVRE G., 1977. Aspects qualitatifs de l'utilisation agronomique des boues résiduaires des stations d'épurations. *Bull.d'AFES* n°3, pp : 125-140.

BREUER, D.W., D.W. COLE et P. SCHIESS;1979. Nitrogen transformation and leaching associated with wastewater irrigation in Douglas Fir, Poplar, grass and unvegetable systems. Utilization of municipal sewage effluent and sludge on forest and disturbed land. W.E. Sopper et S.N. Kerr. Pennsylvania Univ. Press, pp. 19-33.

Références Bibliographiques

BRIDLE, T.R., S.A. BLACK, D.N. GRAVE LAND, W. NICHOLAICHUK, D.W. SMITH, R.S. TOBIN et M.D. WEBBER ;1985.L'épandage des eaux usées traitées et des boues d'épuration d'origine urbaine. Environnement Canada, Ottawa, Canada, 190 pages.

CAILLE, A., P.G. CAMPBELL, D. CLUIS, D. COUILLARD, P. COUTURE, H. GRISEL, M. LACHANCE, R. LAPOINTE, M. LECLERC, M. MEYBECK, L. POTVIN, A. ROUSSEAU, J.L. SASSEVILLE, H. ST-MARTIN, A. TESSIER, R. VAN COILLIE et S.A. VISSER ;1978. Planification de l'acquisition des données de qualité de l'eau au Québec, TOME 2 :Processus de régulation de la qualité des eaux d'un bassin. Gouvernement du Québec, ministère des Richesses naturelles, direction générale des eaux, 760 pages.

CHANG, A.C., J.E. WARNEKE, A.L. PAGE et L.J. LUND ; 1984. Accumulation of heavy metals in sewage sludge-treated soils. *Journal of Environmental Quality*. 13: 8-91.

COPOWIEZ Y., 2009. Effets bénéfiques des composts de boues sur les vers de terre. Magazine de bout en bou(es) N° 14, décembre 2009.

CULOT M., 2005. Filières de valorisation agricole des matières organiques. Rapport technique de 73 p

DAUDIN D., 2003. Caractérisation d'un substrat élaboré à base de boues de stations d'épuration conditionnées par mélange avec différents composts. ECOTECHNA, rapport final de 25p.

DJABALA L ; 2003. Contribution à l'étude physico-chimique des boues résiduelles en vue d'une valorisation agricole « cas de la station d'épuration Tizi-Ouzou Est » thèse d'ing Université de Tizi-Ouzou. 54p.

DUCHENE P., 1990. Les systèmes de traitement des boues des stations d'épuration de petites collectivités. N° 09 p 8-9.

DUDKOWSKI, A, 2000.L'épandage agricole des boues de stations d'épuration d'eaux usées urbaines. *Courrier de l'Environnement de l'INRA*, pp. 134-135.

DUDKOWSKI A., 2000. L'épandage agricole des boues de stations d'épuration d'eaux usées urbaines. INRA-ME& S.96p.

DUDKOWSKI A., 2001.Les boues d'épuration agricoles. *Courrier de l'Environnement*.41, pp : 134-135.

ECHAB ; A1998. Réutilisation des boues de stations d'épuration des eaux usées en agriculture : Impact des métaux lourds. Thèse 3e Cycle, Univ. Cadi Ayyad, Fac. Sci. Semlalia, Marrakech, Maroc, p. 80-83 (141 p.).

FAO ; 2003. Irrigation avec des eaux usées traitées, Manuel d'utilisation, FAO, 2003 73p.

FEDERER, C.A ; 1983. Nitrogen mineralization and nitrification : depth variation in four New-England forest soils. *Soil science society American journal*. 47: 1008-1014.

Références Bibliographiques

GAMARASNI M A., 1984. Utilisation agricole des boues d'origines urbaines. Source.Paris (F.R).A F E E, 128 p.

GAID A.K ;1984. L'épuration biologique des eaux usées urbaines .Edition OPU, Alger, Tome 1, 261 p.

GASSEM S ; 2000. Contribution à l'évolution du statut phosphaté dans les résidus organiques (boues – grignon d'olives) après trois mois en bac de végétation. Thèse d'ing. Université de Tizi-Ouzou

GAULTIER JEAN-PIERRE et AL., Devenir des éléments traces métalliques dans les sols du Vexin Français soumis à des épandages des boues ; Dossier de l'environnement de l'INRA n°25.

GIRARD M.C., WALTER C., REMY J.C., BERTHELIN J. et MORTEL J.L., 2005. Sols et environnement. Chapitre 11 : recyclage de déchets sur les sols, valeur agronomique et impacts environnementaux : 262-281

GOMEZ A ;SOLDA P ; LAMBORT C ; WILBERT J ; JUSTE C.,1992. Bilan des éléments tracemétalliques transféré dans les sols sableux après 16 années d'apports continus et connus deboues de station d'épuration et de fumier de ferme en monoculture irriguée de mais.Conv,Min. Env/INRA n°89.,pp :256-257. KAR5107

GUIVARCH A ; 2001. Valeurs fertilisante à court terme du phosphore des boues de station d'épuration urbaines. Thèse Doctorat, Institut de France Polytechniques de Lorraine. 206p

GUY A., 2003. Les boues d'épuration Et leurs perspectives de gestion en Île-de-France p1363.Rapport Adopté par le CESR le04/03/2003.

GRIMAUD L., 1996. La valorisation des boues de station d'epuration en agriculture.Mem. DU. « eau et environnement », D.E.P.,Univ Picardie, Amens, 44 p

HADDOUCHE; 1980. Etude de la valeur fertilisante des boues issues de la station d'épuration de baraki et leur aptitude à libéré l'azote et le phosphore. Thèse d'ing. INA. El – harach.50p.

HAITH, D.A ; 1983. Planning model for land application of sewage sludge. A.S.C.E., Journal of the Environmental Engineering Division, 109: 66-81.

HINEDI ZR., CHANG AC ; LEE RWK ; 1989. **Characterization** of phosphorus in sludge extras using phosphorus-31 nuclear magnetic resonance spectroscopy. Journal of environnement quality 18, 323-329.

HUGUES VB ; 1999. Devenir du phosphore apporté sur les sols et risque decontamination des eaux de surface. Cas de station d'épuration. Thèse Doctorat de l'université de Rennes 1, 231p + annexes

IAURIF ; 2003. Les boues d'épuration urbaines d'Ile de France : enjeux sanitaires etenvironnementaux .Note rapide sur l'environnement

Références Bibliographiques

IMPENSR ; AVRIL C., 1992. Code de bonnes pratiques pour l'utilisation en agriculture de fertilisants et amendements riches en cadmium. Note de synthèse. Unité d'enseignement et de recherche de biologie végétale. Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux, Belgique, Juin. 76p

IRDA, 2004. Effets bénéfiques des boues mixtes appliquées fraîches ou sous forme de composts sur le potentiel de fertilité des sols en grandes cultures. Rapport de recherche, partenariat entre l'INRA et les composts du Québec, 40p.

JARDE E ; 2002. Composition organique de boues résiduaires de stations d'épuration lorraines : caractérisation moléculaire et effets de la biodégradation.

JUSTE G., 1979. Valorisation agricole des boues issues du traitement des eaux usées urbaines. Cebedeau. n°432, pp : 461-467.

JUSTE C ; CATROUX G. ; 1980. Intérêt agronomiques des boues résiduaires et condition préalable à leur utilisation. C.R. Séminaire E.A.S. Bale, pp : 1-24.

JUSTE, C. et P. SOLDA ; 1977. Effets d'applications massives de boues de stations d'épuration en monoculture de maïs : action sur le rendement et la composition des plantes et sur quelques caractéristiques du sol. 3: 147-155.

KHDYER, 1.1. Et C. M. CHO ; 1983. Nitrification and denitrification of nitrogen fertilizers in a soil column. Soil Science Society American Journal, 47: 1134-1139.

KOLLER E., 2004. Traitement des pollutions industrielles eau, air, sols, boues. Ed. Dunod. 424p.

KOLOULEWSKY N., MASSON G., BONING., MASSIANIC C. et PRONE A., 2001. Effets d'un apport de compost de boues de station d'épuration dans un sol d'un vignoble du sud de la France. Revu. Etude et gestion des sols, vol., 8,3, 2001 : 203-210.

KORMANIK R.A., 1990. Technologie transfer seminar on sludge handling and disposal.

KORMANIK, R.A ; 1972. Estimating solids production for sludge handling Water & Sewage Works, P 72-74.

LAAMARI M., 1979. Utilisation des boues résiduaires dans l'agriculture. Cas de la station de Draa -Ben Khadda. Mémoire. Ing. INA, Alger, pp : 17-32.

LARBI BRAHIM ., OUMEDJBEUR FATMA., 2013. Contribution à l'évaluation des effets des boues résiduaires sur les caractéristiques physiques et chimiques d'un sol de vignoble Tadmaït Wilaya de Tizi-Ouzou-Fadel et Houry, 2000.

LE BISSONNAIS Y., 2009. Effets bénéfiques des composts de boues sur la stabilité du sol. Magazine de bout en bou(es) N° 14, décembre 2009.

Références Bibliographiques

- LE CLECH B., 2000.** Agronomie « des bases aux nouvelles orientations ».Edition Synthèses Agricole. Bordeaux.260p.
- LEMERCIER B., 2002.** L'écosystème sol. Revue, techniques culturales simplifiées N° 20 : 8-22
- LINDSAY, W.L ; 1979.** Chemical equilibria in soils. A Wiley-interscience publication, John Wiley & Sons, N.Y. 423 pages.
- LOOSER M. O., PARRIAUX A., BENSIMON M.,** Landfill underground pollution detection and characterization using inorganic traces. Water Research, 33(17), 1999, 3609-3616.
- MAHMA SA., 1995.** Caractérisation physico –chimique des boues de station d'épuration de Touggourt : Intérêt agricole Thèse d'Ingénieur, ITAS, Ouargla .65p
- MANI A ; 2005.**Valorisation des boues résiduares en agriculture : impact des boues sur les propriétés chimiques d'un sol agricole. Cas de boues de station d'épuration de pont de Bougie. Thèse d'ing. Agron. Université de Tizi-Ouzou 57 p.
- MATHIAN R., 1986.** Les procédés physico-chimiques d'épuration des eaux usées urbaines. I.R.C.H.A, documents techniques
- MAYNARD D.N., HOCHMUTH G.J ; 1997.** Knott's Handbook for Vegetable growers. 582p.(http://www.agr.gc.ca/pfra/water/microirr_hm), 4p
- MARTTINEN S. K., KETTUNEN R. H., RINTALA J. A., OCCURRENCE and REMOVAL** of organic pollutants in sewages and landfill leachates. The Science of the Total Environment, 301, 2003, 1-12
- MAZEN A., FAHEED F.A et AHMED A.F., 2010.** Study of potential impacts of using sewage sludge in the amendement of desert reclaimed soil on wheat and Jews mallow plants. Braz. Arch. Biol. Technol. V.53 N°4 : 917-930. July/ August 2010.
- MOREL J. L., 1977.** Contribution à l'étude de l'évolution des boues résiduares dans le sol. Thèse de Docteur Ingénieur, Université de Nancy 1, France, p 117.
- MOLETA R; CANCEL F., 2003.** Méthanisation des déchets organiques .Etude bibliographique. RE. CO. R.D. Etude n°01-0408/1 A, 104 p.
- MOREL J.L. et JACQUIN F ; 1978.** Utilisation agricole des boues résiduares chaulées et non chaulées. Incidences de trois années d'épandage sur la fertilité d'un sol neutre de limon. Ministre de l'environnement, comité xi- sol et déchets solides, 29p
- MRE ;2003.**Ministère des Ressources en Eau, Algérie, 2012.
- N'DAYEGAMIYE A., DRAPEAU A., HUARDS. Et THIBAUT Y., 2004.** Intégration de boues mixtes et de fumier dans des rotations agricoles : réponse des cultures et interaction avec les propriétés du sol. Agro-sol, vol. 15, N°2 : 83-90.

Références Bibliographiques

N'DAYEGAMIYE A., DRAPEAU A., 2009. Influence de la nature des fertilisants apportés sur la dynamique de la structure et les teneurs en carbones et en substances humiques pour un loam argileux sainte- Rosalie. Agro-sol .vol. 20, N°1 : 12-22.

NICOURT C. et BARBIER R., 2009. Boues des villes et boues des champs. Le sol, dossier INRA, Janvier 2009 : 118-119.

ONA ; 2018. Office nationale d'assainissement. Algérie.

O.T.V ; 1997. Traiter et valoriser les boues. Collection O, T, V N° 2, 457p.

OULATI H ; 1978. Impact de l'apport des boues résiduaires sur un sol agricole de la MITIDJA. Thèse d'ing. Université de Tizi-Ouzou. 31p

PEREZ GARCIA V., IGLESIAS JIMENEZ E. & FERNANDEZ FALCON M., 1986. The Agronomic Value of the Sewage Sludge of Tenerife: Physico-Chemical Characteristics of the Refuse-Sludge Compost and Related Products. Agricultural Wastes, 17: 141-152.

POMMEL B ; 1979. La valorisation agricole des déchets: 2) les bouesrésiduaires urbaines. Ministère de l'Agriculture, INRA, Stationagronomique de Bordeaux, France. 70 pages.

RADA A ;1996. Étude de la contamination métallique des sols de la zone d'épandage des eaux usées de la ville de Marrakech (Maroc) : contribution du fond géochimique et des apports anthropogéniques dans le transfert du cadmium dans un système sol-plante. Thèse Doct. État. Univ. Cadi Ayyad, Fac. Sci., Semlalia, Marrakech, Maroc, 153 p.

REDDY G.B., 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 B.E., CARRIERE P.E. & MATSUMOTO M.R., 1991. Applying sludge on agricultural land. Biocycle, 32: 58-60.

SABEY B. R. & HART W. E., 1975. Land application of sewage sludge: Effect on growth and chemical composition of plants. Journal of Environmental Quality, 4: 252-256.

SALH M ; 2003.Procèdes Couplés aux Boues Activées-Ozonisation pour la Réduction dans la Production de Boues : Etude Modélisation et Intégration dans la Filière de Traitement des Eaux'. Thèse de Doctorat, INSA Toulouse.

SAHLSTROM L ; ASPAN A ; BAGGE E ; THAM M L D ; ALBIHN A., 2004. Bacterial pathogen incidences in sludge from Swedish sewage treatment plants. Water Recherche, 38,1989-1994.

SARARUHA 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

Références Bibliographiques

SBIH M ; 1990 .Etude de la biodégradation des boues résiduelles de station d'épuration : effet pour la biodisponibilité du phosphore pour le végétal. Mémoire DAA. INAPG et INRA Grignon
39p.

SCHEINER J.D., 2005. Spéciation du carbone, de l'azote et du phosphore de différentes boues de stations d'épuration au cours de leurs incubations contrôlées dans deux types de sol. Thèse de doctorat en agronomie de l'Institut National Polytechnique de Toulouse. 218 p.

SEDKI A ;1995.Étude écotoxicologique de la contamination de deux chaînes alimentaires terrestres dans la palmeraie périurbaine de la zone d'épandage des eaux usées de la ville de Marrakech. Thèse Doct. État, Univ. Cadi Ayyad, Fac. Sci. Semlalia, Marrakech, Maroc. 140p.

SINGH R.P. & AGRAWAL M., 2008.Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management*, 28: 347-358.

SINGH B R ; NARWAL R P., 1984. Plant availability of heavy metals in in sludge treated soil:II.Metal extractability compared with plant metal uptake.*J.Environ.Quality*,13 (3).pp:344-349.

SOMMERS L.E., 1977. Chemical composition of sewage sludges and analysis of their potential use as fertilizers. *J. Environ.Qual.* 6,pp: 225-229.

SPERANDIO, M., 1998.Développement d'une procédure de compartimentation d'une eau résiduaire urbaine et application à la modélisation dynamique de procédés à boues activées. Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, 221 p.

SUH Y.J. AND. ROUSSAUX P ; 2002. An LCA of Alternative Waste Water Sludge Treatment Scenarios', *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 35, pp. 191 – 200.

TAUZIN, C, JUSTE C ; 1986. Effet de l'application à long terme de diverses matières fertilisantes sur l'enrichissement en métaux lourds des parcelles. Rapport du contrat 4084/93. Ministère de l'environnement, France.

TAMRABET L ; 2011. Contribution à l'étude de la valorisation des eaux usées en maraichage. Thèse de Doctorat en sciences : Université Hadj Lakhdar, Batna Algérie.

TERCE M ; 2000. Les impacts de recyclage des boues de station d'épuration. Ed **INRA**, paris, 10 p.

TERCE M., 2001. Les impacts du recyclage des boues de station d'épuration, INRA ME&S-75338.Paris.

TESSIER A ; 1985. Description de paramètres physico-chimiques, gammes de concentration et signification. Notes de cours pour l'unité 7104 :Potamologie. INRS-Eau, Université du Québec, 92 pages.

THOMAZEAU R., 1981.Station d'épuration, eau potable, eaux usées. Précis théorique et technologique. 435p.

Références Bibliographiques

VERDYB., 1975. L'analyse écologique des boues activées. SGETEC.

WEBBER M.D ; 1984. Epanchage des boues résiduelles sur les sols : une évaluation. Comité d'experts sur l'aménagement du sol et de l'eau, Environnement et agriculture Canada, Ottawa, Canada. 45 pages.

WERTHER J., OGADA T., 1999. Sewage sludge combustion. Progress in Energy and Combustion Science, 25 55–116.

WU D., LIU P., LUO Y., TIAN G et MAHMOOD Q., 2010. Nitrogen transformation during co-composting of herbal residues, spent mushrooms, and sludge.j. Zhajiang. Univ.sci. B (BIOTECHNOL) 201 11(7) : 497-505.

ZEKKAD M ; 1982. Etude de la dynamique de la teneur en métaux dans un sol brun lessivé après utilisation des résidus urbains. Thèse de doctorat pp. 31-66.

ZEKKAD M ; 1982. Etude de la teneur en métaux lourds dans un sol brun lessivé après addition des résidus urbains. Thèse de doc. Ins.Nat. Polytech. De Lorraine. P140.

Annexes

Annexe 01

Tableau 1 : Analyse de la variance du pH

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	4,174	23	0,181				
VAR.FACTEUR 1 (station)	4,116	7	0,588	162,376	0		
VAR.RESIDUELLE 1	0,058	16	0,004			0,06	1,05%

Tableau 2 : Résultats du test de NEWMAN et KEULS du pH

STEP	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES						
Boghni	6,383	A						
DEM	6,243		B					
DBK	5,957			C				
Boukhalfa	5,81				D			
Azzeffoune	5,6					E		
Tadmait	5,587					E		
Est	5,373						F	
Tigzirt	5,05							G

Annexes

Annexe 02

Tableau 1 : Analyse de la variance des teneurs en potassium assimilable

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	11646,66	23	506,376				
VAR.FACTEUR 1 (station)	11619,77	7	1659,967	987,829	0		
VAR.RESIDUELLE 1	26,887	16	1,68			1,296	1,58%

Tableau 2 : Résultats du test de NEWMAN et KEULS du potassium assimilable

STEP	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES					
DEM	105,803	A					
DBK	98,927		B				
Tigzirt	97,51		B				
Boukhalfa	94,877			C			
Azzeffoune	92,73			C			
EST	65,02				D		
Tadmait	62,29					E	
Boghni	39,317						F

Annexes

Annexe 04 : Comparaison des teneurs apportées en matière organique et éléments nutritifs de plusieurs fertilisants

Fertilisations	Teneurs en MO (Kg/t de MS)	Teneurs en NPK (Kg/t ou m ³ de matière brute)		
		N	P ou P ₂ O ₅	K ou K ₂ O
Fumier de bovin	187	5,5 à 6,3	2,4 à 3,7	7,2 à 10,1
Lisier de porcs	45	3,3 à 5	1,8 à 4	1,8 à 3
Boues de STEP	140	4 à 12,1	2 à 13	0,6 à 3,6
Compost de boues	250	10	3,2	9,3
Engrais		50 à 300	50 à 225	100 à 600

(ESCO MAFOR, 2014)

Résumé

Notre étude est portée sur les possibilités éventuelles de valorisation agricole des boues résiduaires urbaines issues de huit stations d'épurations dans la wilaya de Tizi-Ouzou. L'objectif principal est d'évaluer la fertilité phosphatée (P assimilable) et potassique (K assimilable) des boues urbaines utilisées comme amendement organique sur les sols agricoles (arboricultures) de la wilaya.

La caractérisation des boues résiduaires au niveau des huit stations consiste à identifier celles représentant les meilleurs atouts de point de vue valorisation agricole. Pour cela, quelques analyses chimiques sont réalisées et les résultats obtenus sont comparés aux normes telles que le potentiel hydrogène (pH), les teneurs en P assimilable, les teneurs en K assimilable et les concentrations en éléments traces métalliques (ETM).

Les résultats obtenus ont montré que les boues étudiées présentent un potentiel appréciable en P assimilable, une faible teneur en K assimilable et une concentration en métaux lourds inférieure à la norme AFNOR. L'épandage des boues étudiées sur sols agricoles n'entraînent aucun effet néfaste et améliorent la biodisponibilité des éléments fertilisants notamment le phosphore assimilable. Ces caractéristiques peuvent donner à ces boues résiduaires une valeur agronomique très intéressante, permettant ainsi de les recycler et de les valoriser en agriculture. Cependant, leur utilisation doit tenir compte de leur degré d'affinage, de la nature du sol, de l'intervalle de l'épandage et des besoins des cultures.

.Mots clés : Station d'épuration, valorisation agricole des boues, pH, phosphore assimilable, potassium assimilable

Abstract

Our study was focused on possibilities of agricultural recovery of urban waste sludge from eight treatment plants in Tizi-ouzou area. The main objective was to assess content of bio-available phosphate (P) and potassium (K) as fertilizing elements of urban sludge used as organic amendment in Tizi-ouzou agricultural (arboreal crop) soils.

Residual sludge characterization in eight stations was performed to identify those of best assets in terms of agricultural recovery. For this purpose, some chemical analyzes were carried out and results obtained were compared to standard parameters such as hydrogen potential (pH), bio-available P content, bio-available K content and metallic trace elements concentrations (ETM).

Overall results demonstrated that sludge studied have appreciable potential in bio-available P, but low bio-available K content and heavy metal concentration lower than AFNOR standard. The spreading of sludge studied in agricultural soils may not have harmful effect and improves bioavailability of fertilizing elements, in particular phosphorus. These characteristics may provide residual sludge a very attractive agronomic value, suggesting possibility to recycle and recover them in agriculture. However, their use must take into account their ripening degree, soil nature, application interval and crops needs.

Keys-words: wastewater treatment plant, bio-available phosphorus, pH, bio-available potassium, agricultural sludge valorization