

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud MAMMERY de Tizi-Ouzou

*Faculté des Sciences Biologiques et des
Sciences Agronomiques*

Département des sciences Biologiques



Mémoire

de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master II en Biologie

Spécialité: Gestion des Déchets Solides

Thème

*Effet de l'épandage des boues résiduaires urbaines sur la
biodisponibilité du potassium dans un sol alluvial
(Cas d'orangerie de Boukhalfa)*

Encadré par : M^{lle} OMOURI

Réalisé par : M^r YEFSAH Mouloud
M^r MOULAI Hanine

Soutenu le : 03/10/2017

Devant le jury:

M ^r MERROUKI K.	Maitre de Conférences B	UMMTO	Président
M ^{elle} OMOURI O.	Maitre assistante A	UMMTO	Promotrice
M ^{me} BOURBIA MOUAS S.	Maitre de Conférences B	UMMTO	Co-promotrice
M ^r BOUDJEMAA S.	Maitre assistante A	UMMTO	examinateur

Promotion 2016 - 2017

Remerciements

Nous remercions « Dieu Tout Puissant » de nous avoir donné la santé, la patience et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

*Un merci tout particulier à notre promotrice **M^{lle} OMOURI O.** et notre co-promotrice **M^{me} BOURBIA S.***

Qui nous ont proposé le sujet et nous ont dirigé et orienté, nous tenons surtout à témoigner de leur disponibilité, leur positivité et leur motivation, leurs conseils qui nous ont guidés dans l'élaboration de ce mémoire de fin d'étude.

*Nous remercions **Mr MERROUKI K,** qui, malgré son rôle chargé, il a accepté de présider le jury.*

*Nous tenons également à exprimer nos sincères remerciements à l'égard des membres du jury **Mr BOUDJEMAA S.** pour avoir accepté d'examiner et de juger ce travail.*

*Nous tenons aussi à exprimer nos remerciements aux responsables et personnel de la **STEP Est de l'ONA** pour nous avoir accueillis dans leurs établissement.*

*Nous remercions **M^{me} TIBICHE Gh.** et toute l'équipe du laboratoire des sciences du sol au niveau du département d'agronomie à l'**UMMO.***

Nous remercions l'équipe du laboratoire département biologie et agronomie pour leur accueil, leur collaboration et leur disponibilité.

*Nous remercions **M^{lle} ISSAOUN Dj.** qui nous a aidés à réaliser l'analyse statistique des résultats.*

Nous remercions tous les enseignants qui nous ont encadrés durant notre cursus.

*Nous remercions **OUALI KH.** pour son aide précieuse dans la réalisation de notre travail.*

*Nous tenons à exprimer tout au fond de nos cœurs, nos reconnaissances à nos **familles** pour toute leur aide morale et financière.*

Enfin, un grand merci pour tous ceux qui ont participé de près ou de loin dans la réalisation de ce modeste travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents ;

A ma bien aimée ;

A mes chers frères ;

À toute ma famille ;

À tout(e)s mes ami(e)s ;

À mon binôme et sa famille ;

À la promotion 2016-2017.

Mouloud

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents ;

A mes chers frères ;

À toute ma famille ;

À tout(e)s mes ami(e)s ;

À mon binôme et sa famille ;

À la promotion 2016-2017.

Hanine

Liste des Tableaux

- **Tableau 1:** Consistance de la boue en fonction de sa siccité (Rejsek, 2002)..... 10
- **Tableau 2:** Composition des boues selon la filière de traitement des eaux résiduaires urbaines (Rejsek, 2002).....14
- **Tableau 3:** Concentration moyenne en ETM des boues d'épuration (Dudkowski, 2000a)..... 15
- **Tableau 4 :** Les différentes classes de boues 16
- **Tableau 5 :** Classification des boues selon leur aspect physique..... 17
- **Tableau 6 :** Classification des boues en fonction des traitements..... 18
- **Tableau 7 :** Les opérations de traitement des boues et leurs objectifs (Duchene, 1990).....19
- **Tableau 8 :** Les paramètres de la parcelle..... 39
- **Tableau 9 :** Résultats chimiques du sol en fonction des doses et des profondeurs 45
- **Tableau 10 :** Analyse de la variance au seuil de 5% de KHNO_3^- pour les facteurs dose et horizon..... 47
- **Tableau 11 :** Résultats du test de NEWMAN et KEURS pour le KHNO_3^- du sol épandus avec des boues résiduaires (Facteur 1 : dose) 47
- **Tableau 12 :** Résultats du test de NEWMAN et KEURS pour le KHNO_3^- du sol épandus avec des boues résiduaires (Facteur 2 : horizon) 47
- **Tableau 13 :** Analyse de la variance au seuil de 5% de KA pour les facteurs dose et horizon..... 49
- **Tableau 14 :** Résultats du test de NEWMAN et KEURS pour le KA du sol épandus avec des boues résiduaires (Facteur 2 : horizon)..... 49
- **Tableau 15 :** Analyse de la variance au seuil de 5% de Kne pour les facteurs dose et horizon..... 51
- **Tableau 16 :** Résultats du test de NEWMAN et KEURS pour le KA du sol épandus avec des boues résiduaires (Facteur 1 : Doses) 52

Liste des abréviations

- **C/N** : Carbone / Azote
- **k** : Potassium
- **P** : Phosphore
- **Ca** : Calcium
- **Mg** : Magnésium
- **CO₂** : Oxygène
- **pH** : Potentiel d'hydrogène
- **OMS** : Organisation Mondiale de la Santé
- **MM** : Matière Minérale
- **MV** : Matière Volatile
- **MS** : Matière Sèche
- **M.O** : Matière organique
- **°C** : Degré Celsius
- **PCI** : Le pouvoir calorifique inférieur
- **PCS** : Le pouvoir calorifique supérieur
- **DBO₅** : Demande biochimique en oxygène
- **DCO** : Demande chimique en oxygène
- **STEP** : Station de Traitement des Eaux Polluées
- **ETM** : Élément trace métallique
- **MES** : Matières En Suspension
- **CNB** : Comité National des Boues
- **SPDE** : Syndicat professionnel des entreprises de services d'eau et d'assainissement
- **ADEME** : Agence de développement de l'environnement (France)
- **KAISi₂O₆** : Leucite (feldspaths orthose)
- **KAISi₃O₃** : Potassium feldspar
- **CEC** : Capacité d'échange cationique
- **µm** : Micro Mètre
- **RN** : Route National
- **m³/j** : mètre cube par jour
- **Eq/hab** : Equivalent par habitant
- **ONA** : Office National d'Assainissement
- **V₃₀** : volume diluée
- **IB** : L'indice de boue
- **MVS** : Matière volatile sèche
- **kg/m²** : kilo gramme par mètre carré
- **KCl** : chlorure de potassium
- **%** : Pourcentage
- **H** : Horizon
- **D₀, D₁, D₂, D₃** : doses
- **KA** : Potassium Assimilable
- **Kne** : Potassium non échangeable

Listes des Figures

Figure 1 : Représentation schématique d'une filière de traitement des boues (Baudez, 2001)..	20
Figure 2 : Le cycle du potassium dans le sol	26
Figure 3 : Les échanges entre les différentes formes de k^+ (MHIRI, 2002).....	29
Figure 4 : Localisation de la STEP Ouest Boukhalfa via Google Earth 2017	32
Figure 5 : Localisation de la station d'épuration Est via Google Earth 2016	33
Figure 6 : Photo illustrant la détermination de la matière sèche	35
Figure 7 : Photo illustrant le test de décantation V30	36
Figure 8 : Photo illustrant la détermination des matières volatiles sèches.....	37
Figure 9 : Le pH-mètre.....	38
Figure 10 : L'agitateur	38
Figure 11 : Conductimètre	38
Figure 12 : Image satellitaire de la parcelle via Google Earth 2017	39
Figure 13 : Dispositif expérimental d'épandage des boues	40
Figure 14 : Photo illustrant le prélèvement des échantillons de 0 à 20 cm.....	41
Figure 15 : Photo illustrant le prélèvement des échantillons de 20 à 40 cm.....	41
Figure 16 : Séchage des échantillons à l'air libre au laboratoire	42
Figure 17 : Tamisage des échantillons au tamis de 2mm.....	42
Figure 18 : spectrophotomètre	44
Figure 19 : Evolution de potassium $KHNO_3^-$ dans le sol en fonction des doses.....	46
Figure 20 : La distribution du potassium $KHNO_3^-$ dans le sol en fonction des profondeurs....	46
Figure 21 : Evolution du potassium assimilable dans le sol en fonction des doses	48
Figure 22 : La distribution du potassium assimilable dans le sol en fonction des profondeurs	49
Figure 23 : Evolution du potassium non échangeable dans le sol en fonction des doses	50
Figure 24 : La distribution du potassium non échangeable dans le sol en fonction des profondeurs.....	51

Sommaire

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

I. Les Boues.....	3
I.1. Définition d'une boue	3
I.2. Origine et formation des boues	3
I.3. Procédés de traitement des eaux usées et formation des boues	3
I.3.1. Les prétraitements	3
I.3.1.1. Le dégrillage	3
I.3.1.2. Dessablage	3
I.3.1.3 Dégraissage – Déshuilage	4
I.3.2. Le traitement primaire.....	4
I.3.2.1. Coagulation – floculation.....	4
I.3.2.2. Décantation	5
I.3.2.3. Filtration.....	5
I.3.3. Le traitement secondaire	5
I.3.3.1. Les traitements anaérobies	6
I.3.3.2. Les traitements aérobies.....	6
I.3.3.2.1. Les lits bactériens.....	6
I.3.3.2.2. Les boues activées.....	6
I.3.3.2.3. Le lagunage	7
I.3.4. Les traitements tertiaires	7
I.4 .Les différents types de boues	7
I.4.1 .Les boues résiduaires urbaines.....	7
I.4.2 .Les boues biologiques ou secondaires	8
I.5. Caractéristiques des boues	8
I.5.1. Caractéristiques physiques.....	8
I.5.1.1. L'indice de MOHLMAN	8
I.5.1.2. L'indice des boues	8
I.5.1.3 .Teneur en matière minérale.....	8
I.5.1.4. Matière sèche et siccité	9
I.5.1.5. Matière volatile	9
I. 5.1.6. Pouvoir calorifique.....	9
I.5.1.7. Consistance de la boue.....	9
I.5.2. Facteurs caractérisant la structure des boues	10
I.5.2.1 .La viscosité	10
I.5.2.2. Granulométrie	10
I.5.2.3. Nature de l'eau contenue dans la boue.....	10
I.5.3. Caractéristiques chimiques des boues.....	11
I.5.3.1. Acidité des boues	11
I.5.3.2. Demande chimique en oxygène (DCO).....	11
I.5.3.3. Demande biochimique en oxygène (DBO5).....	11
I.5.4. Caractéristique biologique	11
I.5.4.1. Teneur en matières organiques	11
I.5.4.2. Teneur en matières minérales	12
I.5.4.3. Les Micropolluants organiques.....	12
I.5.5. La composition en éléments chimiques des boues	12

I. 5.5.1. L'azote	12
I. 5.5.2 .Le phosphore.....	12
I. 5.5.3. Le potassium	12
I.5.5.4. Le soufre	13
I.5.5.5. Le calcium, le magnésium et le sodium.....	13
I.5.5.6. Les métaux lourds	14
I.6. Classification des boues	15
I.7. Traitement des boues	18
I.7.1. Objectif de traitement	19
I.7.2. Système de traitement des boues	19
I.7.2.1. Traitement de stabilisation.....	20
I.7.2.1.1. Stabilisation biologique	21
I.7.2.1.2. Le compostage	21
I.7.2.1.3. Stabilisation chimique.....	21
I.7.2.2. Le séchage thermique	21
I.7.2.2.1. Réduction de la teneur en eau des boues	22
I.7.2.2.1.1. L'épaississement	22
I.7.2.3. La déshydratation.....	22
I.7.2.4. Les traitement d'hygiénisation.....	22
I.8. Production et destination des boues résiduaires.....	23
I.8.1. Production des boues	23
I.8.2. Destination	23
I.8.2.1. La mise en décharge.....	23
I.8.2.2. Incinération	23
I.8.2.3. Valorisation agricole	23
I.8.2.4. Les avantages et les inconvénients de la valorisation des boues en agriculture	24
II. Le potassium.....	24
II.1. Sources du potassium	24
II.2. Cycle du potassium dans le sol.....	25
II.3. Les forme du potassium dans le sol.....	26
II.3.1. Le potassium assimilable.....	26
II.3.2. Le potassium de la solution	26
II.3.3. Le potassium échangeable	27
II.3.4. Le potassium non échangeable	27
II.4. Equilibre entre les différentes formes de potassium dans le sol.....	28
II.5. Origine du potassium dans le sol.....	29
II.5.1. Le potassium organique.....	29
II.6. Le potassium de la rhizosphère	29
II.7. Rôle du potassium dans la plante	30
II.8. Dynamique du potassium dans le sol	30

Chapitre II: Matériels et Méthodes

I. Les boues résiduaires urbaines.....	32
I.1. Le choix	32
I.2. L'origine	32
I.2.1. Localisation de la STEP de boukhalfa	32
I.3. Caractérisation des boues résiduaires urbaines.....	33
I.3.1. Analyse des boues.....	33
I.3.1.1. Localisation de la STEP Est.....	33

I.3.1.2. Analyses effectuées.....	34
I.3.1.2.1. La siccité	34
I.3.1.2.2. La matière sèche(MS)	34
I.3.1.2.3. Test de décantation (V30).....	35
I.3.1.2.4. Matière volatile sèche (MVS).....	36
I.3.1.3. Analyses effectués au laboratoire	37
I.3.1.3.1. Mesure du pH.....	37
I.3.1.3.2. Conductivité électrique	38
II. Le sol	39
II .1. Le choix	39
II.2. Localisation et caractérisation de la parcelle d'étude	39
III. L'essai in situ	40
III.1. Le dispositif expérimental	40
III.1.1. Le choix du dispositif expérimental	40
III.1.2. L'objectif de l'essai	40
III.1.3. L'installation de l'essai	40
III.2. Echantillonnage (Période et Méthode).....	41
IV. Préparation des échantillons et analyses	41
IV.1. Préparation des échantillons de sol	41
IV.1.1. Séchage	41
IV.1.2. Tamisage	42
IV.2. Analyses chimiques.....	43
IV.2.1. Dosage du potassium assimilable	43
IV.2.2. Dosage du KHNO_3^-	44
V. Méthode statistique.....	44

Chapitre III: Résultats et discussions

I. Caractérisation des boues résiduaires urbaines de la STEP de Boukhalfa	46
I.1. Le pH	46
I.2. La conductivité électrique.....	46
I.3. Le potassium	46
I.3.1. Le KHNO_3^-	46
II. Effet des boues sur le potassium dans le sol.....	46
II.1. Les résultats	46
III. Evolution du KHNO_3^- dans le sol après épandage de boue	47
III.1. Effet de l'apport de différentes doses sur le KHNO_3^-	47
III.2. Effet de la profondeur du sol sur le KHNO_3^-	47
IV. Evolution du potassium assimilable dans le sol après épandage des boues.....	49
IV.1. Effet de l'apport de différentes doses sur le potassium assimilable (KA).....	49
IV.2. Effet de la profondeur du sol sur le potassium assimilable (KA).....	50
V. Evolution du potassium non échangeable (Kne) dans le sol après épandage de boue.....	51
V.1. Effet de l'apport de différentes doses sur le potassium non échangeable (Kne).....	51
V.2. Effet de la profondeur du sol sur le potassium non échangeable (Kne).....	52
VI. Discussion générale	53

VII. Conclusion générale.....	55
--------------------------------------	-----------

Références bibliographiques

Résumés

Les activités humaines génèrent des déchets en quantités de plus en plus élevées, leur gestion pose de gros problèmes. De ce fait, il faut trouver les moyens comment les recycler. Les boues résiduaires, au même titre que les eaux usées dont elles dérivent, peuvent être mis à profit dans les régions où la variation climatique du milieu associée au coût de production ne permettent pas toujours d'utiliser les fertilisants chimiques pour palier à la faiblesse de fertilité des sols cultivés. L'utilisation des boues résiduaires traitées dans ce domaine apparaît comme une alternative attrayante pour augmenter la production (Benmouffok et *al*, 2005; Chatha et *al*, 2002; CNB, 2000; Pescod, 1992; Ripert et *al*, 1990).

Ces dernières années on assiste à une baisse de la production liée à la pauvreté des sols en éléments nutritifs associée à un important déficit hydrique.

Les sols de la région de Kabylie sont pauvres en potassium (Bourbia, 1996). Ce contexte de limitation des ressources en eau et engrais potassique en particulier conduit à réfléchir à des actions innovatrices pour une meilleure valorisation du potassium, du sol et celui apporté, qui intervient sur les fonctions reproductrices et la régulation de l'ouverture des stomates. Selon Cadillon et *al*, (2002), l'épandage des boues sur le sol doit être considéré comme une fertilisation calée essentiellement sur le paramètre « potasse ». L'apport des boues se révèle donc une alternative intéressante aux apports d'engrais chimiques pour l'amélioration de la fertilité et la qualité des sols.

Les boues résiduaires libèrent progressivement les éléments nutritifs et notamment l'azote, le phosphore et le potassium, pour les mettre à la disposition de la plante tout le long du cycle de la culture (Igoud, 2001). La libération de l'azote est fonction des conditions climatiques prévalentes, des quantités de boues apportées et du rapport C/N (Jamil et *al*, 2006 ; Pescod, 1992 ; Barbartik et *al*, 1985).

Le potassium est l'un des éléments les plus abondants de la croûte terrestre, il y attient une concentration moyenne de 2.1 à 2.5 %, il présente un comportement étroitement lié à la minéralogie du sol car c'est un important constituant de nombreux minéraux primaires potassiques (Quemener, 1986). Il est l'un des trois principaux éléments nutritifs des cultures (Bukman et *al*. 1990) et qui est absorbé en quantités relativement importantes par les végétaux (Robert, 1996), dans lesquels il est présent sous forme d'ions K^+ très mobile, dissous dans les tissus intracellulaires, notamment dans la vacuole, ou il s'accumule à des concentrations jusqu'à cent fois supérieures à celle du cytoplasme (Haller et *al*., 1998).

Introduction générale

L'objectif de cette étude est de montrer l'effet de l'épandage des boues résiduaires urbaines de la STEP de Boukhalfa sur la biodisponibilité du potassium dans un sol alluvial (cas d'orangerie de Boukhalfa). L'hypothèse à tester est:

- Les boues ont des effets sur la biodisponibilité du potassium dans le sol.

Dans ce contexte, l'étude est structurée en trois chapitres :

- Le premier chapitre sera consacré à une l'étude bibliographique abordant les généralités sur les boues résiduaires et le potassium dans les sols.
- Le deuxième chapitre, présente le matériel et les analyses utilisées dans cette étude.
- Le troisième chapitre, traitera les résultats obtenus et leur interprétation.

En conclusion, une synthèse des résultats obtenus sera présentée, en insistant sur les résultats les plus pertinents obtenus lors de cette étude, incluant quelques perspectives scientifiques pour clore cette étude.

I. Les boues résiduaires urbaines

I.1. Définition des boues

Ce sont les sédiments résiduaires des installations de traitement ou de prétraitement biologique, physique ou physico-chimique des eaux usées produites par les stations d'épurations (STEP) urbaines ou industrielles (Damien, 2013).

I.2. Origine et formation des boues

Les eaux usées contiennent des déchets grossiers séparables sous l'action des forces de gravité lorsqu'on les laisse séjourner dans un bassin calme, ces phénomènes de décantation donnent naissance à des résidus, dont certains (sable grossier, graisse) sont évacués séparément et dont la majorité constituent une composante inerte appelée boue (Duchene, 1990).

Les boues issues d'une épuration physico-chimique sont dites boues de coagulation. 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, 1988), elles sont riches en résidus formés de réactifs chimiques (Sbih, 1990).

I.3. Procédés de traitement des eaux usées et formation des boues

I.3.1. Les prétraitements

Les eaux brutes subissent avant leur traitement proprement dit, un prétraitement qui comporte un certain nombre d'opérations, uniquement physiques ou mécaniques. Il est destiné à extraire de l'eau brute, la plus grande quantité possible d'éléments dont la nature ou la dimension constitueront une gêne pour les traitements ultérieurs. Il s'agit principalement des déchets volumineux des sables et graviers et des graisses et huiles (Degremont, 1978).

I.3.1.1. Le dégrillage

Le dégrillage a pour but de séparer et d'évacuer facilement les matières volumineuses charriées par l'eau brute, qui pourraient nuire à l'efficacité des traitements (Brame, 1986).

I.3.1.2. Dessablage

Le dessablage a pour but d'extraire des eaux brutes les graviers, sables et particules minérales plus ou moins fines, de façon à éviter les dépôts dans les canaux et les conduits, à

protéger les pompes et autres appareils contre l'abrasion, à éviter de perturber les stades des traitements suivants (Morel, 1977).

I.3.1.3 Dégraissage - Déshuilage

Les opérations de dégraissage et de déshuilage consistent en une séparation de produits de densité légèrement inférieure à l'eau, par effet de flottation naturelle ou assistée, dans une enceinte liquide de volume suffisant.

Le dégraissage est une opération de séparation liquide-solide réalisant un compromis entre une rétention maximale des graisses et un dépôt minimal de boues de fond fermentescibles.

Le déshuilage est une opération de séparation liquide-liquide, est habituellement réservé à l'élimination d'huiles présentes en quantité notable dans les eaux (Duchene, 1990).

I.3.2. Le traitement primaire

Le traitement primaire fait appel à des procédés physiques, avec filtration et décantation plus ou moins aboutit, éventuellement assorti de procédés physico-chimiques, tels que la coagulation – floculation.

I.3.2.1. Coagulation – floculation

La turbidité et la couleur d'une eau sont principalement causées par des particules très petites, dites particules colloïdales. Ces particules, qui peuvent rester en suspension dans l'eau durant de très longues périodes, peuvent même traverser un filtre très fin. Par ailleurs, puisque leur concentration est très stable, ces dernières n'ont pas tendance à s'accrocher les unes aux autres. Pour les éliminer, on a recours aux procédés de coagulation et de floculation.

La coagulation a pour but principal de déstabiliser les particules en suspension, c'est-à-dire de faciliter leur agglomération. En pratique, ce procédé est caractérisé par l'injection et la dispersion rapide de produits chimiques tels que les sels minéraux cationiques.

La floculation a pour objectif de favoriser, à l'aide d'un mélange lent, les contacts entre les particules déstabilisées. Ces particules s'agglutinent pour former un floc qu'on peut facilement éliminer par les procédés de décantation et de filtration (Des jardins, 1990 cité par Tarmoul, 2007).

I.3.2.2. Décantation

La décantation est un procédé qu'on utilise dans, pratiquement, toutes les stations d'épuration et de traitement des eaux (Des jardins, 1990 cité par Tarmoul, 2007). Son objectif est d'éliminer les particules dont la densité est supérieure à celle de l'eau par gravité. La vitesse de décantation est en fonction de la vitesse de chute des particules, qui elle-même, est en fonction de divers autres paramètres tel que le: grosseur et densité des particules (Vilaginés, 2003).

Les matières solides se déposent au fond d'un ouvrage appelé « décanteur » pour former les boues primaires. Ces dernières sont récupérées au moyen de systèmes de raclage.

L'utilisation d'un décanteur lamellaire permet d'accroître le rendement de la décantation. Ce type d'ouvrage comporte des lamelles parallèles inclinées, ce qui multiplie la surface de décantation et accélère donc le processus de dépôt des particules. La décantation est encore plus performante lorsqu'elle s'accompagne d'une floculation préalable (Degremont, 1978).

I.3.2.3. Filtration

La filtration est un procédé physique destiné à clarifier un liquide, qui contient des matières solides en suspension, ainsi retenus par le milieu poreux, s'y accumulent ; il faut donc nettoyer ce milieu de façon continue ou de façon intermittente.

La filtration, habituellement procédé des traitements de coagulation- floculation et de décantation, permettent d'obtenir une bonne élimination de bactéries, de couleur, de turbidité et, indirectement, de certain goûts et odeurs (Des jardins 1990, cité par Tarmoul, 2007).

I.3.3. Le traitement secondaire

Dans la grande majorité des cas, l'élimination des pollutions carbonées et azotées s'appuie sur des procédés de nature biologique, basés sur la croissance de micro-organismes aux dépens des matières organiques « biodégradables » qui constituent pour eux des aliments.

Les micro-organismes les plus actifs sont les bactéries qui conditionnent en fonction de leur modalité propre de développement, deux types de traitements (Vilaginés, 2003).

I.3.3.1. Les traitements anaérobies

Les traitements anaérobies font appel à des bactéries n'utilisant pas de l'oxygène, en particulier, aux bactéries méthanogènes qui conduisent, comme leur nom l'indique, à la formation du méthane à partir de la matière organique, et à un degré moindre de CO₂. Ce type de fermentation est appelée digestion en hydrologie. C'est une opération délicate, qui demande une surveillance importante. En effet, la température doit être maintenue à un niveau très stable et suffisamment élevé. Il faut aussi éviter les écarts brutaux de pH et les substances inhibitrices du développement bactérien, à titre d'exemple : les cyanures, les sels de métaux lourds et les phénols.

Ce système est davantage utilisé pour le traitement des effluents urbains, que pour le traitement des effluents industriels généralement toxiques pour les bactéries (Vilaginés, 2003).

I.3.3.2. Les traitements aérobies

Les bactéries utilisées exigent un apport permanent d'oxygène, elles peuvent être libres (boue activée, lagunage) ou fixées (lit bactérien). On distingue trois méthodes essentielles :

I.3.3.2.1. Les lits bactériens

Le principe de fonctionnement d'un lit bactérien, quelques fois appelé filtre bactérien ou filtre percolateur, consiste à faire ruisseler l'eau à traiter, préalablement décantée, sur une masse de matériau de grande surface spécifique servant de support aux microorganismes épurateurs, qui y forment un feutrage ou un film plus ou moins épais, sous lequel une couche anaérobie peut se développer sous la couche aérobie, si son épaisseur est importante (Degremont, 1978).

I.3.3.2.2. Les boues activées

Les boues activées constituent le traitement biologique aérobie le plus répandu (OMS, 1979). Ce dernier, est appliqué dans la majorité des stations d'épuration des eaux usées en Algérie. Le procédé consiste à provoquer le développement d'une culture bactérienne, dispersée sous forme de flocons (boues activées), dans un bassin brassé et aéré (bassin d'aération) et alimenté en eau à épurer (Degremont, 1978).

I.3.3.2.3. Le lagunage

Lagunage est un système biologique d'épuration, qui consiste à déverser les eaux usées dans plusieurs bassins successifs de faible profondeur, ou des phénomènes naturels de dégradation font intervenir la biomasse qui transforme la matière organique. La matière polluante, soustraite aux eaux usées se trouve en grande partie dans la végétation et les sédiments accumulés, et en faible partie dans l'atmosphère sous forme de méthane et d'azote gazeux (Grosclaude, 1999).

I.3.4. Les traitements tertiaires

Les traitements tertiaires regroupent tous les traitements complémentaires visant à affiner la qualité de l'effluent ayant subis les traitements physiques, physico-chimiques et biologiques. Leur utilisation s'impose lorsque la nature des milieux récepteurs recevant l'eau dépolluée l'exige (Degremont, 1978). Les traitements tertiaires englobent, principalement, l'élimination de l'azote, l'élimination du phosphore et la désinfection, mais aussi le traitement des odeurs.

I.4. Les type de boues

Selon l'origine, on pourra distinguer les types de boues suivantes :

I.4.1. Les boues résiduaires urbaines

Les eaux usées urbaines sont constituées des eaux usées domestique, des eaux usées provenant d'activités non domestiques, éventuellement raccordées et des eaux pluviales si le réseau de collecte est unitaire. En 2001, la production annuelle de boues d'épuration d'origine urbaine représentait environ 1million de tonnes de matières sèches, soit environ 5 millions de tonnes brutes (Ifen, 2001).

La quantité de boue produite croît régulièrement avec l'augmentation du nombre de stations d'épuration et de la population raccordée ainsi qu'avec l'amélioration des systèmes d'assainissement et l'évolution des exigences réglementaires en matière d'émissions dans les milieux naturels. Les types de boues d'épuration produites dépendent du type de procédé de traitement des eaux et des équipements de traitements des boues.

I.4.2. Les boues biologiques ou secondaires

Ce sont les boues issues de clarificateurs ou décanteurs après traitement biologique, que se soit en culture libre (boues actives) ou en culture fixée (lits bactériens ou biologique). Elles sont donc constituées essentiellement de corps bactériens et de leurs sécrétions, elles sont de couleur sombre, très organique (75%), plus homogènes que les boues primaires et ont moins d'odeur que les précédentes (Duchene, 1990 et Debba, 1998).

I.5. Caractéristiques des boues

Les caractéristiques des boues dépendent fortement de la charge polluante de l'effluent traité ainsi que des techniques d'épuration mise en place. Une distinction se fait ainsi en fonction du traitement du quel proviennent, d'où trois types de boues sont repérées (Satin et Selmi, 2006).

I.5.1. Caractéristiques physiques

I.5.1.1. L'indice de MOHLMAN

L'indice de **MOHLMAN** (ou Sludge Volume Index) se définit comme étant le volume occupé après décantation de 30 minutes d'un échantillon de boues correspondant à 1gramme de matière sèche (Rodier, 2009).

I.5.1.2. L'indice de boues

L'indice de boues (ou Diluted Sludge Volume Index) est défini à partir de tests de décantation permettant d'obtenir des volumes de boues compris entre 100 et 250 ml (Rodier, 2009).

I.5.1.3. Teneur en matière minérale

La teneur en matière minérale (MM) est calculée selon la formule suivante, à partir des matières volatiles (Coulibaly, 2010).

$$\text{MM(\%)} = 100 - \text{MV}$$

I.5.1.4. Matière sèche et siccité

La boue est essentiellement constituée d'eau et de matière sèche (MS), cette dernière est exprimée soit en mg de boues soit en pourcentage, elle est déterminée par la pesée après séchage de la boue à l'étuve à 105°C ou par Balance infrarouge. Une boue brute a 10% de siccité aura une humidité de 90% (Bechac, 1987 ; Rejsek, 2002).

I.5.1.5. Matière volatile

Elle est mesurée par la différence entre le poids de boue sèche à 105°C et celui de cette même boue après chauffage jusqu'au poids constant à 550°C, cette teneur varie de 60 à 85% des matières sèches (Jamonet, 1987 ; collection OTV, 1997).

I.5.1.6. Pouvoir calorifique

La teneur en matière organique des boues leur confère une aptitude à la combustion, ce qui permet de les incinérer. On peut définir deux pouvoirs calorifiques :

- Le pouvoir calorifique inférieur (PCI)
- Le pouvoir calorifique supérieur (PCS)

Ce pouvoir calorifique s'exprime en kg de boue ou de matière volatile en K.cal/kg de MV (Lassée, 1985).

I.5.1.7. Consistance de la boue

C'est une donnée obligatoire à connaître pour toute manipulation des boues. La consistance est un état physique dépendant de la siccité. Le tableau 1 illustre la consistance et siccité des boues.

Tableau 1: Consistance de la boue en fonction de sa siccité (Rejsek, 2002)

Consistance de la boue	Siccité en %
Boues liquides	De 0 à 10%
Boues pâteuses	De 10 à 25%
Boues solides	>25 %
Boues sèches	>85%

I.5.2. Facteurs caractérisant la structure des boues

I.5.2.1. La viscosité

Les boues urbaines sont considérées comme des véritables systèmes colloïdaux, dont la forte stabilité est déterminée par la nature des propriétés de la surface des colloïdes et par l'interaction entre les particules. Les boues ne sont pas des liquides newtoniens, on mesure leur viscosité en fonction de la contrainte de cisaillement (viscosité de Bingham), cette viscosité permet de définir leurs caractères thixotropiques, qui est important pour leur transports (A.F.E.E, 1974).

I.5.2.2. Granulométrie

La granulométrie mesure la taille et étudie la répartition statistique, selon la grosseur des éléments d'une substance pulvérisant (Hachette et Livre, 2000). L'analyse granulométrique s'effectue jusqu'à 80 μm par tamisage du matériau par voie sèche ou par voie humide (Ladjel, 2004).

I.5.2.3. Nature de l'eau contenue dans la boue

L'eau représente 95% de la masse de la boue. Dans une boue urbaine elle est sous deux états :

- libre : assez facilement éliminable par la filtration
- liée ou combinée : comprend l'eau hydratation colloïdale, l'eau capillaire, l'eau cellulaire et enfin l'eau chimique.

Cette eau ne peut être éliminée que par la chaleur, conditionnement thermique, séchage ou incinération (Coulibaly, 2010).

I.5.3. Caractéristiques chimiques des boues

I.5.3.1. Acidité des boues

Le pH est un paramètre important pour l'utilisation ultérieure des boues en agriculture. Il détermine partiellement la charge électrique des particules solides et, par conséquent, influe sur la stabilité colloïdale. Dans le cas des boues digérées par la voie anaérobie, la fermentation se fait dans un milieu légèrement alcalin le pH doit être proche de la neutralité. Une chute de pH en dessous de 6,5 indique un déséquilibre de la digestion. En cas de la stabilisation aérobie, le pH sera acide (Ladjel, 2004).

I.5.3.2. Demande chimique en oxygène (DCO)

La demande chimique en oxygène est la quantité d'oxygène en g/l, qui est consommée par les matières oxydables, elle représente la quantité d'oxygène nécessaire pour la dégradation, par voie chimique des matières organique et des matières minérales oxydables (Collection OTV, 1997). La DCO permet d'apprécier la quantité des matières organiques dans les boues, et éventuellement leur fermentation possible. La DCO figure parmi les indicateurs permettant de contrôler le bon fonctionnement d'une STEP.

I.5.3.3. Demande biochimique en oxygène (DBO₅)

La demande biochimique en oxygène indique la quantité d'oxygène consommé par les microorganismes, pour réduire la fraction biodégradable en 5 jours d'incubation à 20°C (Ladjel, 2004).

I.5.4. Caractéristiques biologiques

I.5.4.1. Teneur en matières organiques

La concentration en matière organique peut varier de 30 à 80 %. La matière organique des boues est constituée de matière particulaire éliminée par gravité dans les boues primaire, des lipides (6 à 19% de matière organique), des polysaccharides, des protéines et des acides aminés (jusqu'à 33 % de la matière organique), de la lignine, ainsi que des produits de métabolisation et des corps microbiens résultant des traitements biologiques (kaki et al., 1986; Inoue et al., 1996; Adem, 2001; Jard et al., 2003 In Amir, 2005).

Le carbone organique présente la plus grande partie de la matière organique des boues résiduaire, c'est donc un élément important pour une valorisation agricole. La teneur en carbone se situe entre 20 et 30% de MS, ce carbone est issu surtout des corps microbiens et des produits de leurs métabolisme (Degremont, 1966 ; Benmouffok, 1980).

I.5.4.2. Teneur en matières minérales

Les éléments les plus couramment rencontrés sont: Silice, alumines, carbonates et phosphates, à l'exception des boues minérales d'industries spécifiques ont ainsi leur importance pour préciser la qualité agricole d'une boue épandue, la silice est un élément défavorable. Par ailleurs les chlorures, essentiellement solubles, sont peu appréciés en cas d'utilisation des cendres de boues incinérées en valorisation dans le béton (Tauzin, Juste, 1986).

I.5.4.3. Les Micropolluants organiques

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 tels que le plomb, chrome, cuivre, manganèse, nickel, arsenic, cadmium et mercure (Suh et Roussaux, 2002).

I.5.5. La composition en éléments chimiques des boues

I.5.5.1. L'azote

La concentration en azote varie de 1 à 7%, les plus fortes teneurs sont observées dans le cas des boues liquides (7 à 8%), alors que les boues déshydratées ont des teneurs qui varient entre 2 à 6% (Koller, 2004).

I.5.5.2. Le phosphore

Les teneurs en P des boues dépendent des caractéristiques des eaux usées et des traitements mis en œuvre. Les boues primaires sont généralement moins riches en P que les boues biologiques qui contiennent des corps microbiens à teneur élevée en P (Sommers, 1977; Kirkham, 1982; Jokien, 1990; Sommelier et al, 1996).

I.5.5.3. Le potassium

C'est l'élément le moins représenté dans les boues dix fois moins que la teneur en azote. Le déficit en potassium des boues résulte de sa solubilisation et dans son entraînement dans l'effluent épuré. Par conséquent, les apports en potassium par les boues sont pratiquement négligeables. Mais la minime quantité contenue semble être rapidement assimilable (King et Morris, 1972; Sabey et Hart, 1975; Benmouffok, 1980).

I.5.5.4. Le soufre

Les boues sont caractérisées par leurs richesses en soufre dont les teneurs varient entre 0,8 et 1,5%. Une proportion de 25 à 70% s'y trouve sous forme minérale : sulfure, soufre élémentaire, thiosulfates et poly thionates (Anonyme, 1988).

I.5.5.5. Le calcium, Le magnésium et le sodium

Les boues se caractérisent par une teneur élevée en calcium, il se trouve probablement sous forme relativement mobile puisque plusieurs auteurs signalent un accroissement des teneurs en calcium des horizons du sol. Les teneurs en magnésium varient de 0,3 à 1% et sont indépendantes du type de boue (Juste et Solda, 1997). Le niveau du sodium dans les boues d'épuration relativement important; cependant il est rapidement entraîné par le lessivage (Benmouffok, 1980), et d'après (Anonyme, 1988), les teneurs en Na restent inférieures à 1%.

Le tableau ci-dessous illustre composition des boues selon la filière de traitement des eaux résiduaires urbaines.

Tableau 2: composition des boues selon la filière de traitement des eaux résiduaires urbaines (Rejsek, 2002).

Composants	Décantation primaire	Traitement biologique	Aération prolongée	Lagunage	Traitement Chimique
Matière organique%	55-65	70-85	60-75	45-60	35-55
N total% MS	2,3-3	4-6	4-5	2-3	1,5-2
P%MS	1-,5	2,5-3	2-2,25	1,5-,5	1,5-3
K%MS	0,2-0,3	0,2-0,3	0,2-0,3	0,2-0,3	0,1-0,2
C% MS	33-40	38-50	33-40	25-35	20-30
Ca% MS	5-15	5-15	5-15	5-15	5-30
Mg% MS	0,4-0,8	0,4-0,8	0,4-0,8	0,4-0,8	1,7-4,5
Pouvoir fermentescible	++	++	+	-	(++)(-)
Contamination bactériologique	++	++	+	-	(++)(-)

I.5.5.6. Les métaux lourds

Les boues d'épuration ont des propriétés agronomiques utiles dans le domaine de l'agriculture. Leur utilisation doit tenir compte des besoins nutritionnels des plantes sans toutefois compromettre la qualité des sols ni celle des eaux superficielles et souterraines.

En effet, certains métaux lourds présents dans les boues d'épuration peuvent être toxiques pour les plantes et pour l'homme.

Lorsque la concentration d'un ou de plusieurs métaux lourds dans les sols dépasse les valeurs limites, l'épandage des boues est interdit (Coïc et Coppenet, 1989).

Le tableau 3 illustre les concentrations moyennes en ETM des boues d'épuration

Tableau 3: Concentrations moyennes en ETM des boues d'épuration (Dudkowski, 2000a)

ETM	Valeurs limites (mg/Kg MS)	Moyenne (mg/Kg de MS)
Cd	20*	5,3
Cr	1000	80
Cu	1000	334
Hg	10	2,7
Ni	200	39
Pb	800	133
Zn	3000	921

I.6. Classification des boues

La classification des boues, est établie en fonction de plusieurs paramètres : nature du traitement, la teneur en eau (siccité). Les tableaux 3,4 et 5 montrent à titre indicatif une classification élaborée selon (Collection OTV, 1997).

Tableau 4 : les différentes classes de boues

Boues de classe A	boues primaires boues primaires physico-chimiques boues de forte et très forte charge
Boues de classe B₁	boues biologique en eau brute boues de faible charge boues d'aération prolongée
Boues de classe B₂	boues biologiques en eau décantée boues de faible charge
Boues de classe C	boues mixtes de type A+B ₂
Boues de classe D	boues stabilisées biologiquement boues de digestion anaérobie mésophile boues de digestion anaérobie mésophile

Les boues peuvent être classées selon leur aspect physique (Tableau 5)

Tableau 5 : Classification des boues selon leur aspect physique

Appellation	Nature	
Boues liquides Elles présentent une concentration en matière sèche (MS) comprise entre 3 et 10%. On peut également exprimer cette concentration en g/l	Boues Liquides	Siccité de 3% (épaississeur statique ou hersé)
	Boues liquides égouttées	Siccité de 6% (tables d'égouttage)
Boues pâteuses Leur siccité (% en poids de MS) est comprise entre 10 et 25%	Non chaulées	Siccité de 10 à 18% (épaississement et filtre à bandes)
	Chaulées	Siccité de 10 à 18% (épaississement et filtre à bandes, chaulage). Le chaulage permet une stabilisation et un conditionnement des boues indispensables à leur valorisation agricole.
Boues solides Leur siccité dépasse 20% de MS	Chaulées	Siccité de 30 à 35 % (épaississement, filtre-pressé avec conditionnement à la chaux et au chlorure ferrique)
	Digérées chaulées	Siccité de 25 à 35% (épaississement, digestion, centrifugeuse avec chaulage éventuel)
Boues sèches Siccité de 95% (épaississement, digestion, centrifugeuse et séchage thermique)		

Les boues de STEP peuvent également être différenciées selon le traitement dont elles sont issues (tableau 6)

Tableau 6 : Classification des boues en fonction des traitements

Appellation	Nature
Boues issues du traitement primaire des eaux usées, dites «fraîches »	Elles sont produites par une simple décantation des matières en suspension (MES) contenues dans les eaux usées. 70% de MES peuvent ainsi être retenues. Avec l'évolution de la conception des stations, ce type de boues est en train de diminuer.
Boues issues du traitement physico-chimique des eaux usées	Elles sont formées par l'agglomération des matières organiques particulières ou colloïdales contenues dans les eaux usées. Cette agglomération est obtenue grâce à l'addition d'aluminium. 90% de MES peuvent ainsi être captées. Séparées par décantation, les boues obtenues renferment une part importante de sels minéraux issus des eaux brutes et de l'agent coagulant.
Boues issues du traitement biologique des eaux usées	Elles sont constituées par les résidus de bactéries «cultivées dans les ouvrages d'épuration. Ces bactéries ont pour rôle d'éliminer une partie de la matière organique contenue dans les eaux usées en les digérant. Pour maintenir, l'activité biologique de la station à un bon niveau, une partie de la masse des bactéries ou « biomasse en excès » doit être soutirée régulièrement, entretenant ainsi la dynamique de reproduction bactérienne.
Boues mixtes	Mélange de boues primaires et biologiques.

I.7. Traitement des boues

Le traitement des boues est défini comme l'ensemble des opérations visant à modifier les caractéristiques des boues en excès afin de rendre leurs destinations finales fiables et sans nuisance. Les boues subissent le traitement de déshydratation et de stabilisation avant être rejetées dans le milieu naturel ou réutilisées à des fins agricoles ou énergétiques (Blondeau, 1985).

I.7.1. Objectifs de traitement

Les traitements spécifiques des eaux usées engendrent une matière organique hautement fermentescible. Les objectifs des différents traitements de cette matière secondaire sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 7 : Les opérations de traitement des boues et leurs objectifs (Duchene, 1990).

Opérations	Buts
Stabilisation	Réduire la fermentescibilité des boues pour atténuer ou supprimer les mauvaises odeurs
Concentration	Éliminer une partie de l'eau interstitielle afin d'éviter son transport
Stockage	Assurer une capacité tampon harmonisant les besoins d'extraction et les possibilités d'évacuation à l'extérieur
Homogénéisation	Donner au destinataire finale un produit connu et relativement constant
Conditionnement	Modifier les caractéristiques de la boue afin de faciliter la séparation des phases solides et liquide
Déshydratation	Augmenter la siccité afin de rendre le produit solide ou pâteux

I.7.2. Système de traitement des boues

Telle qu'elles apparaissent au cours du traitement des eaux usées, les boues d'épuration nécessitent un traitement préalable et ce dans le but de réduire leur volume et d'éviter la putréfaction des matières organiques facilement décomposables (Brame et Lefevre, 1977).

La figure ci-dessous illustre le système de traitement des boues

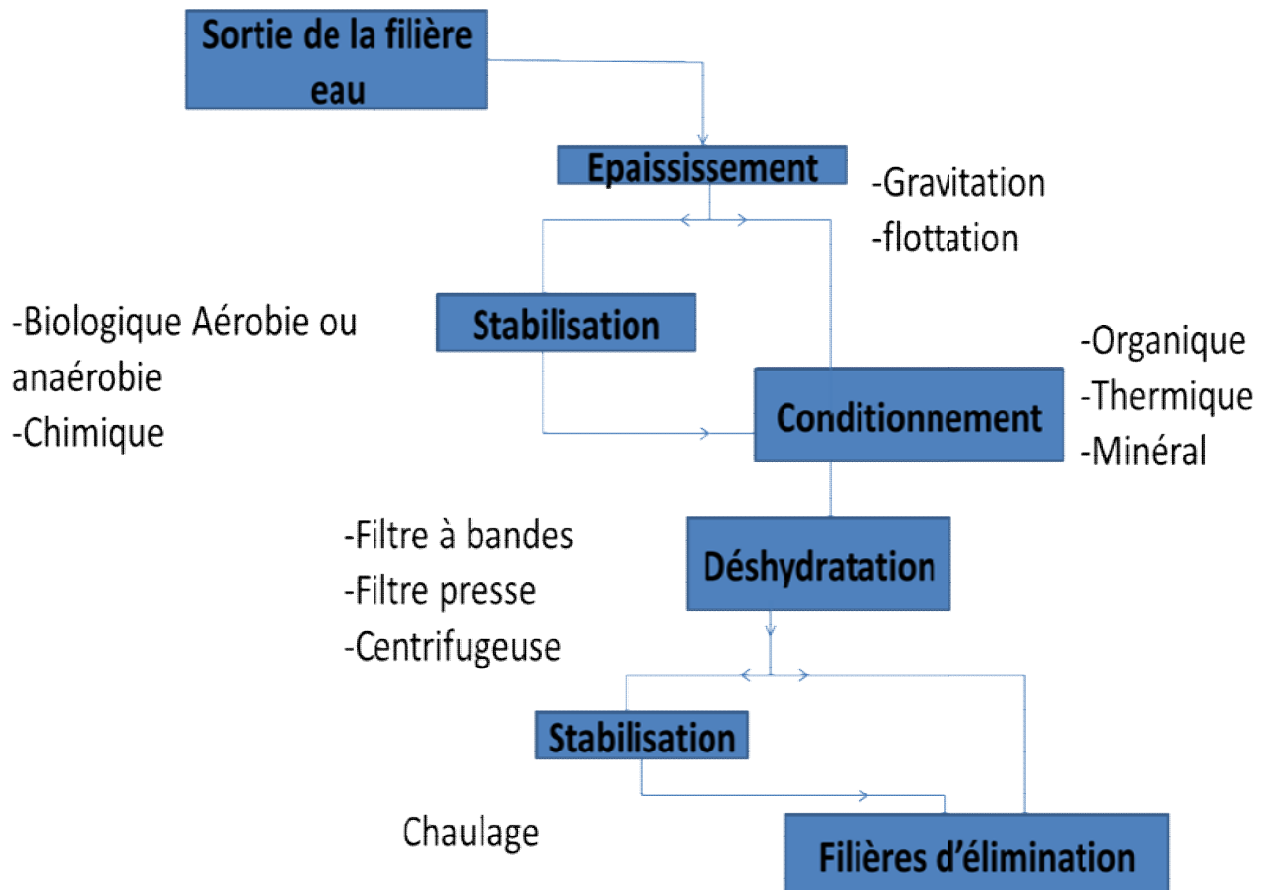


Figure1: Représentation schématique d'une filière de traitement des boues (Baudez, 2001).

On distingue trois grands types de traitement :

I.7.2.1. Traitement de stabilisation

Ce mode de traitement consiste soit à forcer l'évolution des boues jusqu'à une minéralisation assez poussée c'est la digestion; soit une interruption de la vie au sein des boues, il s'agit de la stabilisation physico- chimique (Blondeau, 1985).

La notion de stabilisation renseigne sur le niveau d'odeur de la boue (absence d'odeur, ou odeur faible, moyenne, forte). A noter qu'une boue peut être traitée, tout en n'étant pas stabilisée au sens défini ci-dessus (Ministère de l'Environnement Française, 1999). Les traitements de stabilisation utilisés sont de type biologique, chimique ou thermique. Ils s'appliquent aux boues mixtes fraîches, aux boues secondaires ou à l'ensemble des boues afin de réduire leur fermentescibilité et limiter, voire annuler, les nuisances olfactives (Koller, 2004).

I.7.2.1.1. Stabilisation biologique

Elle réduit la teneur des boues en matières fermentescibles. La stabilisation biologique se fait soit par voie aérobie dans les bassins d'aération, jusqu'à l'obtention des boues à teneur non négligeable en oxygène et biologiquement stable. La consommation d'énergie de ce procédé ne permet pas d'envisager son utilisation de manière systématique pour les boues d'origine urbaines (Alexandre, 1979). Soit par voie anaérobie dans des digesteurs avec production d'un biogaz riche en méthane et on obtient des boues digérées, encore appelées stabilisées anaérobies. Pour maintenir l'activité biologique de la station à un bon niveau, une partie de la masse des bactéries ou biomasse en excès doit être prélevée, soutirée régulièrement, entraînant ainsi la dynamique de reproduction bactérienne (CNB, 2001).

I.7.2.1.2. Le compostage

Le compostage constitue un procédé particulier de stabilisation biologique aérobie. Il se réalise de préférence sur des boues déjà déshydratées d'une façon à économiser l'approvisionnement en support de compostage. Les boues compostées ont un aspect de terreau et présentent une structure solide; elles sont stables. On constate actuellement, un fort regain d'intérêt pour cette technique en raison des nouvelles données réglementaires et économiques concernant la gestion des déchets. Le compostage se pratique dans des stations de moyenne taille et ne représente que 2% des tonnages des boues (O.P.E.C.S.T, 2001).

I.7.2.1.3. La stabilisation chimique

Elle bloque l'activité biologique, et donc l'évolution de la boue, par adjonction d'une quantité importante de chaux (10 à 50% de la matière sèche, en général 30%) élevant le pH au-delà de 12 (Koller, 2004). Ce traitement apporte un appoint en calcium qui peut être bénéfique, si la boue sera valorisée (Gamrasni, in Nakib, 1986).

I.7.2.2. Le séchage thermique :

Le séchage thermique des boues revêt un effet temporaire de stabilisation (par absence d'eau), son intérêt est la réduction des volumes et des odeurs. Le séchage se fait soit par action de soleil soit celle de chaleur (SPDE, 2006).

I.7.2.2.1. Réduction de la teneur en eau des boues

Pour réduire les volumes à manipuler, différents procédés sont mis en œuvre comprenant, par ordre croissant d'efficacité de coût, d'épaississement, de déshydratation et de séchage (ADEME, 1996).

I 7.2.2.1.1. L'épaississement

L'épaississement des boues a pour objectif de limiter le volume de boues à transporter sur les aires de séchage, il conditionne l'état des boues à envoyer sur les lits de séchage. L'épaississement est du type gravitaire raclé à entraînement central avec les caractéristiques géométriques. Il doit comporter en permanence, une tranche d'eau en surface afin d'éviter les odeurs. Il vise à augmenter la siccité des boues. Par conséquent, réduire leur volume, sans pour autant modifier le caractère liquide de la boue (Anred, 1988 ; Collection OTV, 1997 ; Bechac, 1987). Les intérêts de l'épaississement sont multiples :

- A capacité égale, augmentation du temps de séjour dans les cuves de stockage des digesteurs aérobie et anaérobies.
- Amélioration de la sécurité d'exploitation, en particulier dans les installations d'eaux résiduaires urbaines, les boues des décanteurs primaires peuvent être pompées très liquide.
- Amélioration de la production des dispositifs de déshydratation, lits de séchage, filtre sous vide, filtre presse, centrifugeuse, (Degrement, 1972 ; Thoman, 1983).

I.7.2.3. La déshydratation

Il correspond à une augmentation forte de siccité, modifie l'état physique des boues, en passant de l'état liquide à l'état pâteux ou solide.

Le traitement des boues est complété par la déshydrations, qui a pour but d'éliminer le maximum de l'eau résiduelle. Cette technique, conduit à l'obtention d'un déchet solide, facilement manutentionable et de volume réduit (Nakib, 1986).

I.7.2.4. Les traitements d'hygiénisation

L'hygiénisation est un traitement qui réduit à un niveau non détectable les agents pathogènes présents dans la boue. L'hygiénisation des boues ne s'impose que dans certains contextes d'utilisation agronomique. La plupart des boues épandues ne sont pas hygiénisées, la maîtrise du risque sanitaire reposant de façon satisfaisante sur l'application de règles de bonnes pratiques (Arrêté du 8 Janvier 1998).

I.8. Production et destination des boues résiduaires

I.8.1. Production des boues

La production de boues résiduaires dans les stations d'épuration urbaines pour les pays menant des politiques d'assainissement des eaux usées urbaines représente d'importants tonnages. En Algérie, les rejets annuels d'eaux usées sont estimés à près de deux millions de m³ provenant de station d'épuration qui produisent quelque 260000 m³ de boues par jour (Hamichi et Benabi, 1992). En Europe, la production annuelle est d'environ 7,7 millions tonnes et aux Etats-Unis et Canada 8,8 millions de tonnes (Mugnir, 1999).

I.8.2. Destination des boues

Les éliminations finales des boues de station d'épuration sont, la mise en décharge, l'incinération et la valorisation agricole.

I.8.2.1. La mise en décharge

La mise en décharge contrôlée consiste en un enfouissement des boues (souvent mélangées avec des ordures ménagères). Les boues doivent être préalablement stabilisées et déshydratées avec une humidité maximale de 70% (Lassez, 1985).

I.8.2.2. Incinération

Les boues seules ne sont pas auto combustibles, elles nécessitent des fours spéciaux et un mélange avec d'autres déchets tels les déchets ménagers. L'élimination des cendres et des mâchefers exigent une décharge contrôlée de classe 1. Cette technique reste aussi néfaste de point de vue écologique et environnemental puisqu'elle contribue en plus du gaspillage de matières organiques utiles pour le sol à la diffusion de gaz très toxiques (NO, CO, SO, dioxine, etc.) qui ont fait l'objet de réglementations spécifiques (Mininni G; Sbrilli A; Guerriero E; Rotatori M, 2004).

I.8.2.3. Valorisation agricole

Cette pratique, en usage de plus de 30 ans, constitue une solution particulièrement favorable à l'environnement car elle offre l'opportunité de recycler la M.O nécessaire au sol, de plus, Les boues représentent un fertilisant peu onéreux, qui permet à l'agriculteur de réduire ses charges en engrais et fertilisant classiques. Quelque soit sa forme (boues liquides, pâteuses, solides ou sèches), la valorisation agricole doit être précédée d'une enquête préalable et s'entourant de tous les précautions scientifiques, techniques et réglementaires (Collection OTV, 1997).

I.8.2.4. Les avantages et les inconvénients de la valorisation des boues en agriculture (Collection OTV, 1997).

Les avantages :

- Les boues sont riches en fertilisants naturels (phosphore, Azote), en oligo-éléments (zinc, cuivre).
- Elle offre l'opportunité de recycler la matière organique nécessaire au sol.
- Les boues représentent un fertilisant peu coûteux par apport aux engrais.
- Ils améliorent les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols.
- Ils agissent comme un catalyseur de biologie du sol.

Les inconvénients :

- Les boues ont une forte teneur en éléments –traces métalliques.
- Les risques sanitaires liés à leur utilisation.
- L'odeur des boues constitue un gêne pour l'utilisateur et le voisinage.

II. Le Potassium

Le potassium est un élément majeur de la lithosphère qui atteint une concentration moyenne de 1,58% (Quemener, 1984 ; Robert, 1992). Sa teneur dans les sols se situe généralement entre 0,2 et 3,3% ; dans les sols alcalins, elle peut atteindre 2,5 à 6,7% (Scheffer et Schachtsabel, 1967). C'est un élément fertilisant dont le comportement géochimique peut apparaître a priori le plus lié à la composition minéralogique des sols (Robert et Trosmé, 1975). Il est en effet, abondant aussi bien dans les minéraux primaires (feldspaths potassiques et micas) de taille limon ou sable, que dans certains minéraux argileux composant la fraction argile du sol (illite) (ANONYME, 2008).

II.1. Sources du potassium dans le sol:

Le potassium est assez retenu par le sol. Il ne descend que 2 ou 3 cm par an, à cet égard, l'apport à l'avance est nécessaire pour qu'il soit disponible au niveau des racines (Tisdal et al. 1975).

80-90% de l'alimentation potassique de la plante proviennent :

- Des matières organiques : restitution potassique contenue dans les résidus des cultures, par décomposition des fumiers et minéralisation secondaire de l'humus.
- Des attaques des minéraux silicatés par des mycorhizes des racines des plantes qui ont la capacité de libérer les cations K^+ .

-Les K^+ libérés par écartement des feuilles d'argile après épuisement des ions K^+ échangeables dans la solution du sol.

-Des engrais potassiques soluble assimilables par la plante (ANONYME, 2011).

II.2. Cycle de potassium dans le sol :

D'après Schwartz et al. (2005), le potassium se trouve essentiellement combiné au $(KAlSi_2O_6)$, les feldspaths orthose $(KAlSi_3O_8)$ et des micas, dont la muscovite. Le complexe adsorbant joue un rôle principal dans la biodisponibilité du potassium très soluble qu'il ait été libéré des minéraux primaires ou apporté par la matière organique et fertilisants minéraux. En effet, si le potassium n'est pas fixé par l'insuffisance des sites d'échange il est entraîné en profondeur.

Les engrais potassiques fournissent des cations K^+ , ce qui induit leur augmentation dans la solution de sol (moreL, 1996). D'après Soltner(2003), les résidus des cultures ainsi que les fumiers, lisiers, et purins se décomposent en libérant du potassium.

Devenir de potassium dans le sol :

- Absorbés par de nouvelles cultures.
- Adsorbés sur le complexe argilo-humique.
- Perdu par lessivage, surtout si le sol est sableux.
- Fixés ou rétrogradés à l'intérieur des feuillets d'argile.

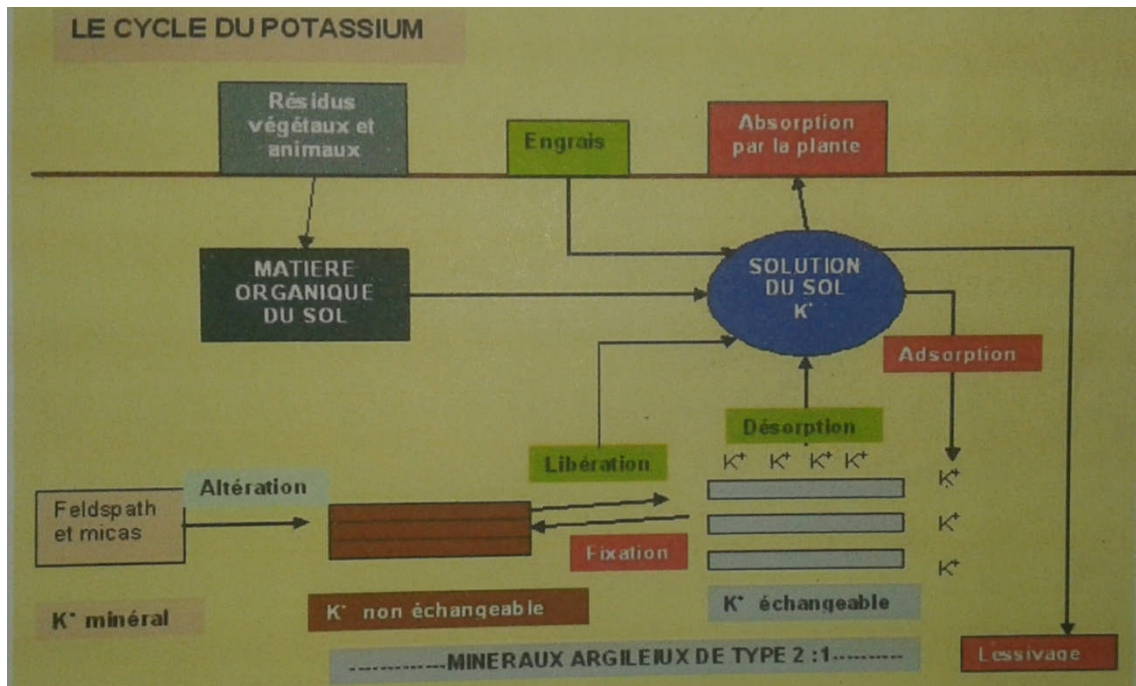


Figure 2: Le cycle du potassium dans le sol

II.3. Les formes du potassium dans le sol :

La distinction entre les différentes formes de potassium dans le sol repose, pour l'agronome sur le degré de leur disponibilité à l'égard des cultures (Mhiri, 2002).

Il est nécessaire de connaître la dynamique du potassium dans le sol et les modalités de l'alimentation potassiques des plantes. Dans le sol, le potassium se trouve sous quatre formes principales de valeur inégale pour la plante. Celles-ci seront traitées ci-après en allant des formes immédiatement disponibles pour la plante à celles qui le sont le moins, soit respectivement : le potassium assimilable, le potassium non échangeable, le potassium à l'intérieur des réseaux cristallins (Anonyme, 2011).

II.3.1. Le potassium assimilable :

Le potassium assimilable se trouve à l'état ionique K^+ dans la solution du sol et à l'état adsorbé sur les colloïdes, toutefois, seule une faible proportion (de 6 à 10%) du potassium requis par les plantes est obtenue directement par le contact entre les racines et les particules du sol (Lafond et al. 1992).

II.3.2. Le potassium de la solution :

Il s'agit du potassium sous forme de K^+ qui est en solution dans l'eau du sol. La plante l'absorbe rapidement, mais la solution est renouvelée par mise en solution du potassium

échangeable. Quand les plantes puisent leurs besoins en potassium du sol par absorption racinaire, les sols argileux réapprovisionnement plus rapidement la solution du sol en cet élément que les sols sableux (Bertrand et Gigou, 2000).

Cette fraction du potassium est la plus faible dans le sol. La vitesse de réapprovisionnement de la solution du sol est une caractéristique intrinsèque du sol. Cette capacité est appelée le « pouvoir tampon » (Bertrand et Gigou, 2000).

II.3.3. Le potassium échangeable :

Le cation du potassium participe à des échanges de cations, il est retenu sur le complexe adsorbant par des interactions électrostatiques (Calvet, 2003). Cette fraction représente généralement 1 à 10% de potassium total (Morel, 1989). Le potassium échangeable dépend de la CEC du sol. En général, il présente des valeurs élevées dans les sols à texture fine et plus basses dans les sols sableux et pauvres en matière organique (Moughli, 2000).

Sur les surfaces externes et les bords des feuillets des particules de minéraux argileux et des substances humiques, les cations K^+ retenus sur les argiles peuvent être échangés très facilement puisqu'ils occupent des positions immédiatement au contact de la solution de sol, leur échange est pratiquement instantané (Calvet, 2003).

Les cations potassiques des substances chimiques, des surfaces externes et des bords des feuillets des argiles sont facilement échangeables. Dans l'espace inter foliaire des minéraux argileux de type smectite les échanges de cation peuvent avoir lieu et leur cinétique est déterminée par la diffusion moléculaire des cations dans ces espaces, en conséquence, leur mobilisation est plus lente

Le potassium échangeable est généralement utilisé comme mesure du potassium assimilable (Bertrand et Gigou, 2000).

II.3.4. Le potassium non échangeable :

Les ions potassium anhydres, situés en position inter foliaire, sont considérés comme non-échangeables, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas extraits par une solution à 1N d'acétate d'ammonium. Cependant, de nombreux auteurs ont montré que ce potassium inter foliaire, participe à la nutrition en potassium des plantes (Barré, 2007). D'une façon générale la refixation du potassium par les minéraux secondaires argileux des sols empêche l'entraînement du potassium vers la profondeur et assure donc une meilleure réserve en potassium pour les plantes (Bonneau, 1997).

Le potassium non échangeable ou bien encore, potassium de réserve ou potassium non extractible à l'acétate d'ammonium, occupe plusieurs compartiments du sol est mal défini ; cette fraction non homogène correspond à l'existence d'un pouvoir fixateur à l'égard du potassium (Morel, 1996).

Les ions K^+ peuvent passer des surfaces externes aux surface internes des feuillets d'argile de type montmorillonites ou illites. S'il s'agit d'illite, les ions ainsi fixés deviennent difficilement échangeables (Soltner, 2003).

D'après Girard et al. (2005), le potassium non échangeable représente un réservoir considérable dans la plupart des sols, excepté les sols les plus altérés (sols tropicaux). (Girard et al. 2005). Cette fraction appelée aussi potassium « fixé » ou bien rétrogradé, constitue un volant de réserve (Mhiri, 2002). Cette fraction est la plus importante, très peu utilisable, constitue la réserve en potassium du sol (Callot et al. 1982). Diverses études ont montré que le potassium non échangeable pouvait être utilisé à proximité des racines, il est une situation où la plante parait s'alimenter totalement à partir de potassium non échangeable ; au cours de l'épuisement d'un sol, le potassium échangeable tend vers une valeur planché (Quemener, 1984).

Les fractions cristallines et volcaniques sont généralement riches en potasse (2 à 7% dans les feldspaths du granite), mais cette potasse se trouve pratiquement sous forme insoluble donc pas inutilisable par la plante. Toutefois sous l'action des agents atmosphériques et des racines, une petite fraction pourrait être mise à la disposition des plantes. Cette forme est très lentement libérée en cours du processus d'altération (Schvartz et al. 2005).

II.4. Equilibre entre les différentes formes de potassium dans le sol :

Le potassium reste rarement en solution, il se crée un double équilibre : d'abord entre le potassium de la solution du sol et le potassium échangeable, qui est fixé sur les sites d'échanges, puis entre les sites d'échanges et les latices des argiles entre lesquelles le potassium ionique est fixé (Lafond et al. 1992).

Le comportement du potassium dans le sol est régi par les équilibres existant entre ses différentes formes. Les conditions d'approvisionnement du végétal sont contrôlées par les équilibres complexes adsorbant-solution du sol, potassium non échangeable-potassium du complexe adsorbant (Robert, 1992).

Selon (Hisenger, 2002 in Girard et al. 2005), si la concentration du potassium en solution est abaissée en dessous d'un seuil très faible de l'ordre de 1 à 10 μ m (Hisenger, 2002 in Girard et al. 2005), les micros divisions des cristaux, l'ouverture des feuillets permettent le passage partiel de la forme fixée à la forme échangeable (Duchaufour, 1991). Vis-à-vis de ce potassium libéré des minéraux primaires ou apporté par la fertilisation, le complexe adsorbant des sols joue un rôle primordial (Robert, 1996). La figure ci de sous nous indique les échanges entre les différentes formes du potassium.

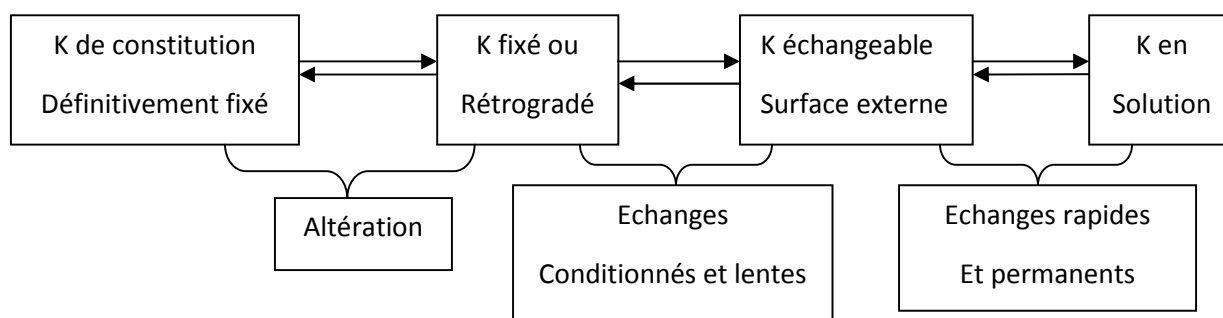


Figure 3 : Les échanges entre les différentes formes de K⁺ (Mhiri, 2002)

II.5. Origine du potassium dans le sol

II.5.1. Le potassium organique :

Contenu dans les résidus de cultures parfois en quantités importantes et se comportant à l'identique d'un engrais potassique (Yara, 2009).

Le potassium des résidus végétaux est presque exclusivement du K⁺ libéré dans le sol, dès la mort des cellules. Dans ce cas, la minéralisation de la matière organique n'a pas donc d'influence (Anonyme, 2011).

Le potassium est libéré dans la phase liquide et fixé sur la phase solide du sol ou prélevé par les racines ou les micro-organismes (Morel, 1996 ; Sparks, 1987 in Habbi, 2007). Il est à noter que, par rapport au potassium minéral, la fraction de potassium organique est quantitativement de moindre importance sauf dans le cas des sols purement organiques.

II.6. Le potassium de la rhizosphère :

Les plantes montrent également des adaptations, cela leur permet de prendre plus de potassium de la solution quand l'offre par le sol est limitée (Shi et al, 2004). L'activité racinaire induit la libération du potassium inter foliaires d'un mica tri octaédrique, conséquent

a l'affaissement des feuillets et l'épuisement du potassium de la solution du sol (Hinsinger et Jaillard, 1993 ; Hinsinger et al. 2005). Les mycorhizes aussi sont capables d'extraire du potassium des roches silicatées (Soltner, 2003).

Le prélèvement est fortement variable, en raison de la dynamique du potassium influencé par divers processus dans la rhizosphère (Rajkane, 2000). Violente (1998), Turpaul et al. (2006) signalent que le potassium assimilable dans la rhizosphère de plusieurs cultures était plus élevé par rapport au sol distal contrairement à Hinsinger, (2001), qui souligne que dans la rhizosphère la concentration du potassium disponible peut être inférieure à celle du sol global, explique que l'appauvrissement en ions phosphate, potassium et ammonium signifie que les concentrations de ces ions peuvent être extrêmement faible à la surface des racines. Ainsi, dans le cas du potassium la concentration passe de quelques centaines de moles à des concentrations milli molaires (Chaillou, 2008).

I.7. Rôle du potassium dans la plante :

Le potassium n'a pas un rôle plastique mais joue un rôle dans la régulation de la croissance végétale (Gaucher, 1968 ; Morel, 1996). Cet élément est très mobile dans la plante et est rapidement distribué dans les différents organes du végétal. Il joue un rôle fondamental dans l'absorption des cations, dans l'accumulation des hydrates des protéines, l'organisation de la cellule, le maintien de la turgescence de la cellule et la régulation de la l'économie de l'eau des plantes (régulation des stomates).Le potassium est considéré comme un agent catalytique de la synthèse des glucides, des protéines et de l'azote (Morard, 1974 ; Bertrand et Gigou, 2000). Ainsi que le transport des oligo-éléments comme le fer (Lafond, 1992).

Le potassium est un élément de résistance des plantes au gel et à la sécheresse, c'est un activateur du système enzymatique. Il est essentiel pour le transfert des assimilés vers les organes et réserve (bulbes et tubercules). Dans toutes les conditions de stress, l'apport du potassium permet de corriger les perturbations éventuelles (Skiredj, 2005). Il joue un rôle dans la régulation de la croissance végétale (Morel, 1996).

I.8. Dynamique du potassium dans le sol :

Dans le sol, le comportement du potassium est régi par les équilibres existant entre ses différentes formes. Les conditions d'approvisionnement du végétal sont contrôlées par les équilibres complexe absorbant-solution du sol, potassium non échangeable-potassium du complexe adsorbant (Robert, 1992). Le pouvoir d'un sol à maintenir le niveau du potassium dans la solution du sol est défini comme le pouvoir tampon du sol (Pal et Durge, 1989).

Acquaye, (1973) définit le pouvoir tampon comme étant le transfert entre les formes de potassium dans le sol. Dans le sol au repos, ces formes sont en équilibre entre elles, mais il existe entre chaque phase des relations plus ou moins réversibles qui vont intervenir dès l'instant où l'on va modifier les quantités d'une ou plusieurs formes, par un apport d'engrais, ou par les prélèvements racinaires (Bosc, 1988). Un ensemble de réactions se produit alors, impliquant un déplacement de l'équilibre initial.

Après une fertilisation, la teneur en potassium de la solution augmente, un équilibre s'établit rapidement entre la forme soluble et la forme échangeable, mais une partie du potassium subira une fixation pour augmenter la teneur en K de réserve (Quemener, 1986). Lors d'un prélèvement racinaire, si la concentration en potassium en solution venait à diminuer à un niveau critique, il se produira une libération du potassium non échangeable des positions inter foliaires des minéraux pour compenser les quantités perdues (Hinsinger, 1998). De nombreuses expériences ont montré que le pouvoir tampon est en relation avec le rapport entre le potassium échangeable et la capacité d'échange cationique (K/CEC) (Addiscott, 1970). Quand le pouvoir tampon diminue, le rapport K / CEC dénommé taux de saturation en potassium augmente.

I. Les boues résiduaires urbaines :

I.1. Le choix :

Notre choix est basé sur la disponibilité, proximité et leur richesse en éléments nutritifs, et aussi proximité de la STEP ce qui permet de réduire les coûts de transport. Aussi, leurs teneurs en métaux lourds largement inférieures à celles admises dans les sols (ONA, 2014).

I.2. L'origine :

Les boues utilisées proviennent de la STEP de Boukhalfa.

I.2.1. Localisation de la STEP de Boukhalfa :

La station d'épuration de Boukhalfa est située à l'ouest de la ville 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 diverge vers Oued Sebaou au nord.

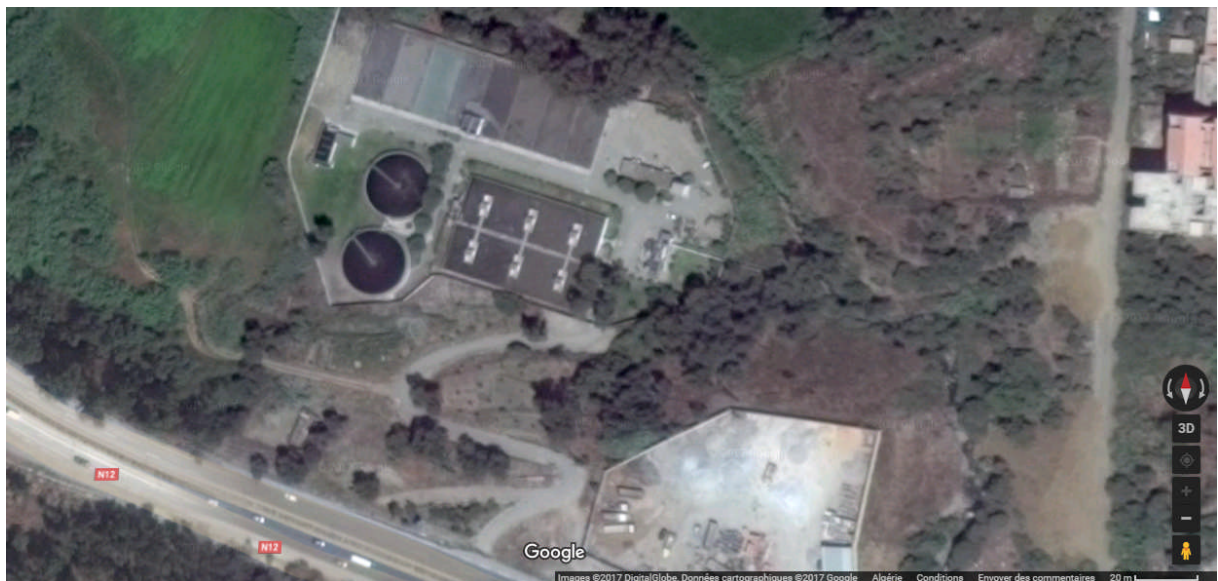


Figure 4: Localisation de la STEP Ouest Boukhalfa via Google Earth 2017

La station d'épuration Ouest de Boukhalfa traite les effluents domestiques de la partie ouest de l'agglomération de Tizi-Ouzou, et les déverse vers l'oued Sebaou, elle s'étale sur une superficie d'un ha environ et possède une capacité de 25000 équivalent habitants correspondant à un volume d'eau usée traitée de $3750\text{m}^3 / \text{j}$.

I.3. Caractérisation des boues résiduaires urbaines :**I.3.1. Analyses des boues :**

A fin de réaliser quelques analyses, nous avons fait un stage d'une durée d'une semaine au niveau de la STEP Est de Tizi-Ouzou localisée selon la figure 5, où nous avons suivi le procédé de traitement des eaux usées et effectué quelques analyses sur la boue produite par la STEP de Boukhalfa (localisée selon la figure 4).

I.3.1.1. Localisation de la STEP EST

La STEP Est de Tizi-Ouzou (Figure 5), est localisée à 3 km à l'Est de la ville de Tizi-Ouzou, réalisée par l'entreprise « hydro aménagement FOREMHYD », mise en service en juillet 2000, la zone Est et Sud de la ville de Tizi-Ouzou y sont raccordées. Elle utilise le procédé d'épuration à boues activées (moyenne charge) qui traite une eau usée domestique, sa capacité est de 120 000(eq/hab), le débit est de 18 000(m³/j), les eaux usées épurées sont rejetées au niveau du Oued de Sebou (ONA, 2011). Ces boues résiduaires qui proviennent de cette station sont caractérisées chaque année par l'ONA de point de vue métaux lourds.



Figure 5 : Localisation de la station d'épuration Est via Google Earth 2016

I.3.1.2. Analyses effectuées

Quatre paramètres ont été déterminés au laboratoire de la station à savoir: la siccité, la matière sèche (MS), test de décantation (V30), matière volatile sèche (MVS) et quatre analyses au niveau de laboratoire de département d'agronomie à savoir le pH, CE, KHNO_3^- et KA.

I.3.1.2.1. La Siccité :

1- On introduit dans une coupelle en porcelaine de poids connu (P_0), une quantité de boue.

2- On pèse de nouveau la coupelle : c'est le poids (P_1).

- La différence (P_1-P_0) correspond au poids de boue humide.

3- On place la coupelle dans une étuve à 105°C jusqu'à évaporation totale de l'eau.

4- On refroidit au dessiccateur puis on pèse c'est le poids (P_2).

- La différence ($P_2- P_0$) détermine le poids de MS.

La siccité est le pourcentage de MS par rapport au poids de boue humide.

$$\text{Siccité} = \frac{P_2 - P_0}{P_1 - P_0} \times 100$$

I.3.1.2.2. La matière sèche(MS)

La concentration en matière sèche permet de connaître la quantité de boue, quel que soit son niveau de concentration dans la filière de traitement, on l'obtient par déshydratation.

Le protocole consiste à :

-Prélever des échantillons ; verser un volume V dans un bécher

-Peser un micro-filtre (P_0), effectuer une filtration sur bécher, mettre le micro-filtre dans une coupelle et sécher à l'étuve à 105°C .

-Mettre à refroidir dans le dessiccateur puis peser le micro-filtre(P_1).

Par la suite, calculer selon la formule suivante :

$$\text{MS} = (P_1 - P_0) \times 1000 / V \text{ (g/l)}$$



Figure 6 : Photo illustrant la détermination de la matière sèche

I.3.1.2.3. Test de décantation V30

La détermination de l'indice de boue nous permet d'apprécier l'aptitude de la boue à la décantation et prévenir d'éventuelles pertes de boues liées au dépassement de la capacité du clarificateur. Le protocole utilisé est le suivant :

- Prélever des échantillons après 15 minutes (au moins) du fonctionnement de l'aérateur.
- Remplir deux cônes IMHOFF de 1000ml posés sur un support stable après avoir mélangé le contenu des bouteilles en les agitant.
- Noter après 30 minutes de décantation le niveau de la boue, c'est le V30.
- Faire une dilution (si nécessaire).

L'indice de boue est calculé comme suite :

$$\text{IB} = \text{V30/MS} \times \text{facteur de dilution}$$



Figure 7: Photo illustrant le test de décantation V30

I.3.1.2.4. Matière volatile sèche (MVS)

Le contrôle de ce paramètre permet de connaître la stabilité de la boue et son aptitude à divers traitement (déshydratation, incinération), suivant le protocole :

- Prélever des échantillons au niveau de lit de séchage
- peser les coupelles à vide (P0), puis mettre à l'étuve à T°= 105° C pour un premier séchage
- laisser refroidir les coupelles, et peser (P2)
- Mettre dans un four de 550°C (une calcination)
- Laisser refroidir un bon moment
- peser les coupelles une dernière fois (P3)

La concentration des MVS est calculée selon la formule suivante :

$$\text{MVS} = ((P_2 - P_3) / (P_2 - P_0)) \times 100$$



Figure 8: Photo illustrant la détermination des matières volatiles sèches

I.3.1.3. Analyses effectués au laboratoire

I.3.1.3.1. Mesure du pH :

Le pH est une des caractéristiques fondamentales d'un sol amendé par des boues, il donne une indication de l'acidité d'une substance. L :

Mode opératoire :

- Peser 10 g de boue tamisée à 2 mm et les introduire dans le flacon d'agitation.
- Ajouter 50 ml d'eau distillée dégazée et agiter pendant 30 minutes.
- Laisser reposer pendant 2 heures.
- Etalonner le pH-mètre avec les solutions d'étalonnages à pH 7 et à pH 9.
- Agiter la suspension à la main, mesurer le pH en prolongeant l'électrode dans la suspension. Lire la valeur quand la lecture s'est stabilisée (cela demande 30 à 60 secondes).



Figure 9 : Le pH-mètre



Figure 10 : L'agitateur mécanique

I.3.1.3.2. Conductivité électrique :

Elle a été mesurée dans un extrait dilué avec un rapport aqueux 1/5 à l'aide d'un conductimètre. Peser 20g de sol et transvasé-le dans un erlen mayer, à la quelle 50ml d'eau distillée sont ajoutées, après agitation durant 2 heures, on laisse reposer 30 minute. La solution est ensuite filtrée.



Figure 11 : Conductimètre

II. Le sol :

II.1. Le choix

Proximité de la parcelle, type de sol (qualité physique, chimique et biologique) et aussi c'est une parcelle qui répond aux conditions exigées par l'ONA de point de vue localisation

II.2. Localisation et caractérisation de la parcelle d'étude :

Notre parcelle se situe selon Google Earth (figure 12) est caractérisée par (tableau 8)



Figure 12: Image satellitaire de la parcelle via Google Earth 2017

Tableau 8 : Les paramètres de la parcelle

Paramètres	Données
Lieu-dit	Boukhalfa
Domaines	Freres Oumllil
Coordonnées	X:36°45'01.77"N
	Y:04°00'49.81"E
Topographie	Plat
Nombre de profil culturel	1
Type culture	Oranger
Type d'apport	Boues active biologiquement
Doses apportées	Différentes doses (D ₀ , D ₁ , D ₂ et D ₃)

III. L'essai in situ :

Notre travail a été mené durant une période allant de fin mars au mois de mai, dans des conditions naturelles, sur une parcelle d'oranger située à Boukhalfa.

III.1. Le dispositif expérimental :

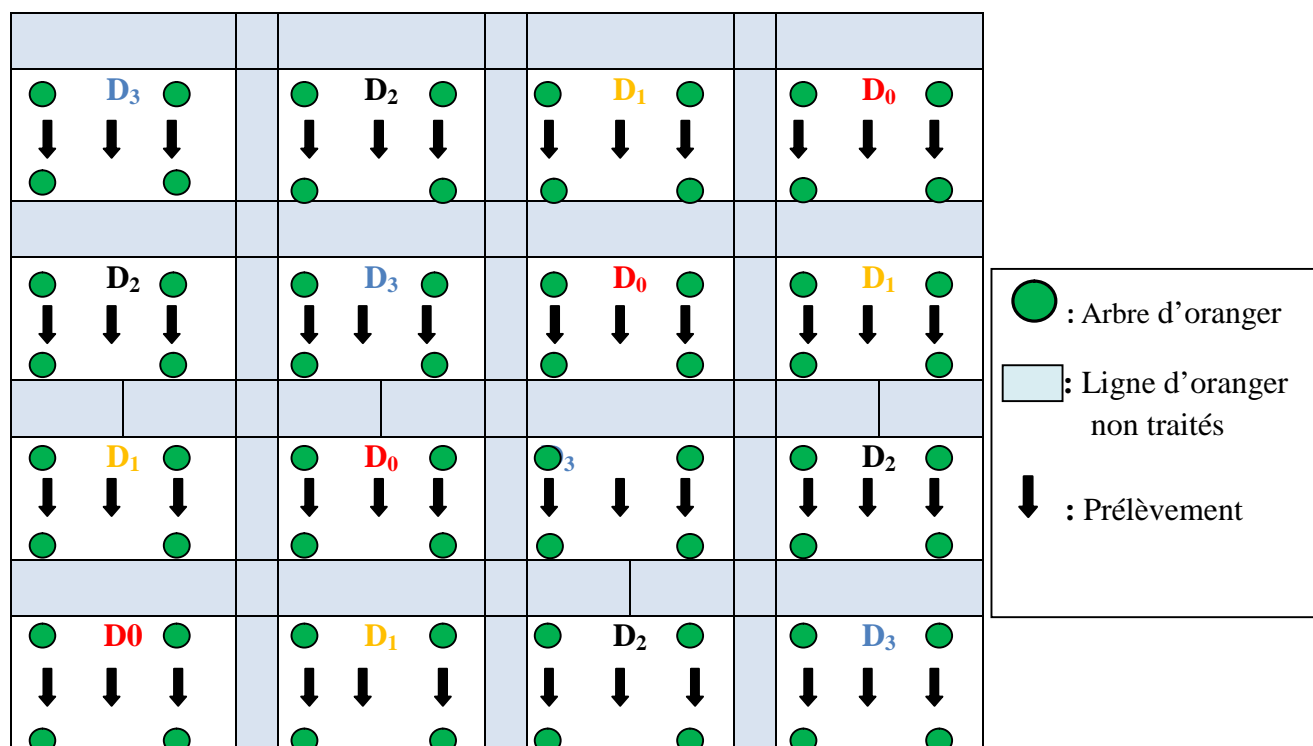


Figure13 : Dispositif expérimental d'épandage des boues

III.1.1. Le choix du dispositif expérimental:

Le dispositif mis en place est de type en bloc aléatoire complet (voir figure 12 et 13)

III.1.2. L'objectif de l'essai :

Le but de notre étude c'est d'étudier l'effet de l'épandage de différentes doses de boues sur la biodisponibilité du potassium dans un sol alluvial.

III.1.3. L'installation de l'essai :

L'essai expérimental a été mené en plein champ d'oranger qu'on a devisé en 4 blocs, séparés par une ligne d'arbre non traitée. Chaque bloc est devisé en 4 micro parcelles, et chacune d'elle a une superficie de (11m × 11m) avec 4 orangers. Chaque micro parcelle a reçu une dose d'épandage différente sur une profondeur de 20cm. Le nombre de répétition est de 4 (Figure 13) :

III.2. Echantillonnage (période et méthode):

L'échantillonnage du sol a été effectué au mois de Mai 2017, six semaines après l'épandage. L'échantillonnage a été réalisé selon les étapes suivantes :

- 1- Choix des points d'échantillonnage (délimitation) illustré par le schéma du dispositif (figure 13)
- 2- Prélèvement des échantillons avec une tarière pédologique au niveau de 3 points et à deux niveaux de profondeur {0 à 20cm et 20 à 40cm} (figures 14 et 15).
- 3- Les échantillons prélevés dans chaque micro parcelles sont bien mélangés pour obtenir un échantillon représentatif.



Figure 14: Photo illustrant le prélèvement des échantillons de 0 à 20 cm



Figure 15: Photo illustrant le prélèvement des échantillons de 20 à 40 cm

IV. Préparation des échantillons et analyse :

IV.1. Préparation des échantillons de sol :

Les échantillons prélevés sont acheminés dans des sachets étiquetés au laboratoire où ils ont subi; le séchage à l'air libre et le tamisage au tamis 2mm (figures 17 et 18).

IV.1.1. Le séchage :

Consiste à étaler les échantillons sur du papier journal, chaque horizon sur une feuille tout en laissant de l'espace entre eux pour éviter toute contamination, puis fragmenter les mottes de terre à la main et homogénéiser, et en dernier on les laisse sécher à l'air libre le temps qu'il faut.



Figure 16 : Séchage des échantillons à l'air libre au laboratoire

IV.1.2. Le tamisage :

Faire passer le sol à travers un tamis de 2mm. La fraction inférieure à 2mm est appelée terre fine fera l'objet de certaines analyses chimiques. Ils sont par la suite conservés dans des boîtes ou sachets jusqu'à l'utilisation.

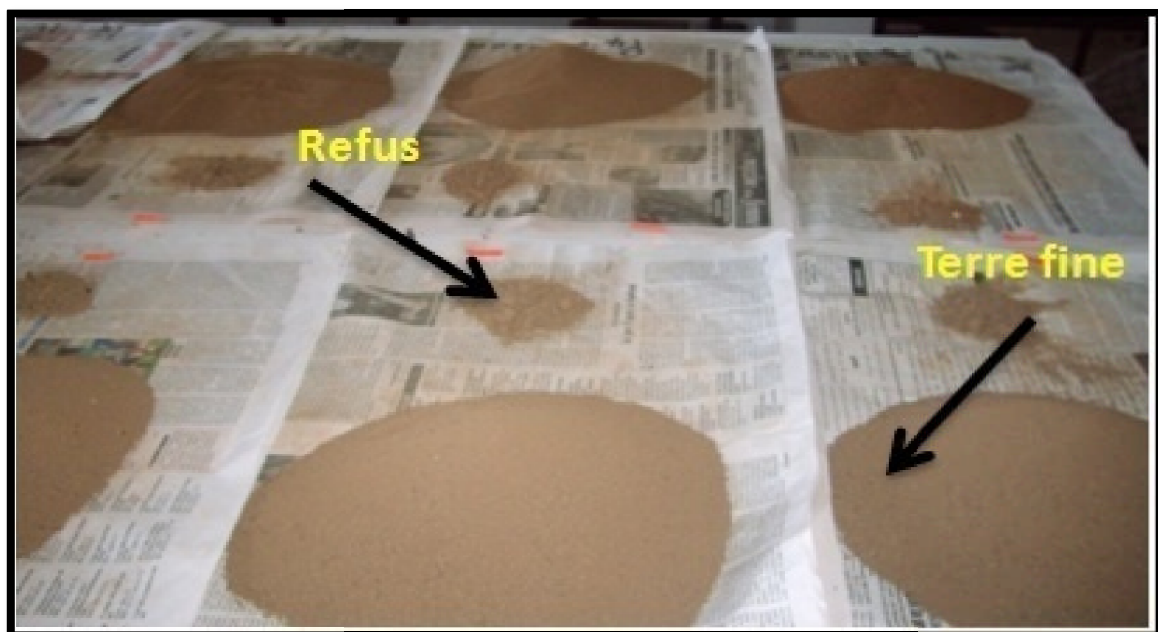


Figure 17 : Tamisage des échantillons au tamis de 2mm.

IV.2. Analyses chimiques :**IV.2.1. Dosage du potassium assimilable :****Principe**

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 spectrophotomètre à flamme.

Mode opératoire**Réactif**

- Solution d'acétate d'ammonium 1N. Introduire 77,08 g d'acétate d'ammonium dans une fiole de 1000 ml, compléter 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 7, il faut l'ajuster avec l'acide ou la base correspondants (acide acétique ou hydroxyde d'ammonium).
- KCl pour la préparation de la gamme d'étalonnage.

Matériel

- Fiole d'agitation de 200 ml.
- Fiole jaugées de 50 ml et de 100 ml.
- Spectrophotomètre à flamme.

Extraction du potassium assimilable

- Peser 5g de terre et les placer dans une fiole d'agitation 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.
- Après le passage de la gamme d'étalonnage, passer l'échantillon au spectrophotomètre à flamme.

IV.2.2. Dosage du KHNO_3^-

- Peser 2,5 g de terre et les placer dans les erlens.
- Ajouter 25 ml de la solution acide nitrique.
- Mettre sur les plaques chauffantes pendant 10 minutes.
- Filtrer la suspension dans des fioles de 25 ml compléter au trait de jauge à l'eau distillée.
- Doser par un spectrophotomètre.



Figure 18: spectrophotomètre

V. Méthodes statistique :

A fin d'évaluer l'impact des boues résiduairees sur les propriétés chimiques des sols de parcelle traitée, les résultats obtenus sont soumis à une analyse de la variance à à deux facteurs au seuil $P= 5\%$ en utilisant le logiciel STAT BOX.

Si la probabilité (P) est :

- $P > 0,05$: Les variables ne montrent aucune différence significative.
- $P \leq 0,05$: Les variables montrent une différence significative.
- $P \leq 0,01$: Les variables montrent une différence hautement significative.
- $P \leq 0,001$: Les variables montrent une différence très hautement significative.

I. Caractérisation des boues résiduaires urbaines de la STEP de Boukhalfa

I.1. Le pH :

Le pH de la boue étudiée est de 7,8, ce qui indique que la boue est alcaline, d'où cette boue ne peut être apportée à un sol alcalin.

I.2. La conductivité électrique :

La salinité de la boue est de 2,19ms. Cette valeur n'est pas une contrainte quand à l'utilisation agricole de la boue étudiée puisqu'elle n'engendre pas la salinisation du sol.

I.3. Le potassium :

I.3.1. Le KHNO_3^- :

La teneur de la boue en KHNO_3^- est de 0,33 %, cette valeur se situe dans la fourchette des normes trouvées par (Lacée, 1985). Et qui se situent entre 0,16 et 0,4%.

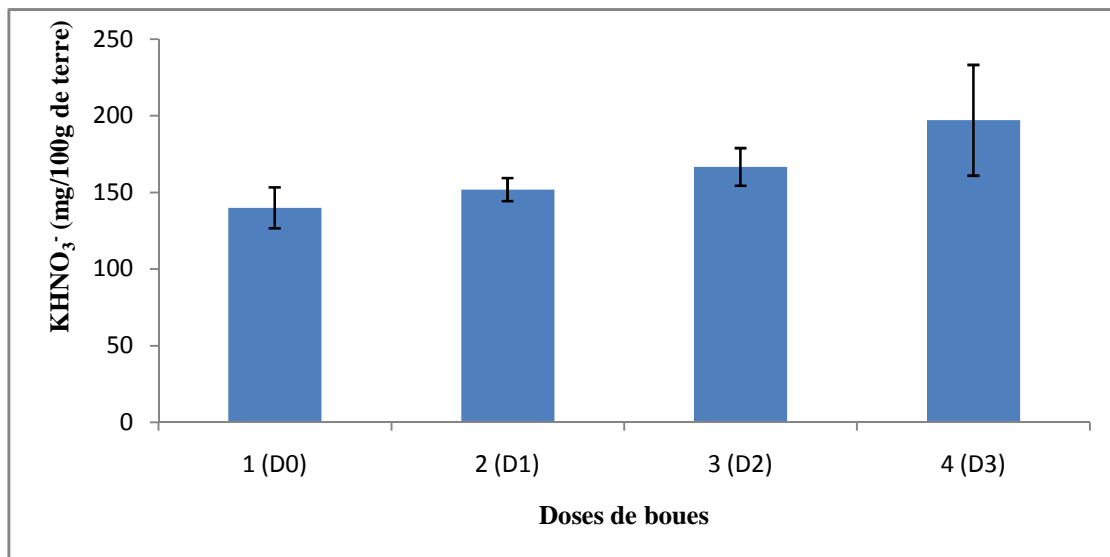
II. Effet des boues sur le potassium dans le sol étudié

Les résultats des analyses chimiques du sol étudié sont présentés dans le tableau(9).

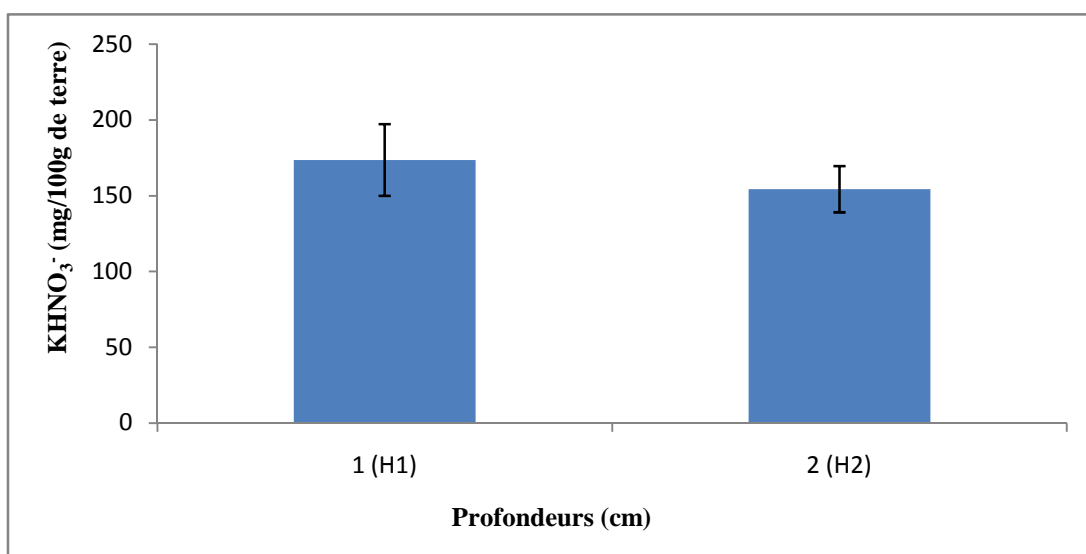
II.1. Les résultats

Tableau 9 : Teneur en potassium du sol en fonction des doses et des profondeurs

Doses	Profondeur (cm)	KHNO_3 (mg)	KA (mg)	Kne (mg)
D0	0 - 20	149,16	40,00	109,17
	20 - 40	130,83	37,49	93,34
D1	0 - 20	163,74	45,41	118,33
	20 - 40	139,99	30,00	110,00
D2	0 - 20	172,08	46,08	126,00
	20 - 40	161,25	43,74	117,50
D3	0 - 20	209,16	52,91	156,25
	20 - 40	184,99	41,25	143,75

III. Evolution de KHNO_3^- dans le sol après épandage de boue :**III.1. Effet de l'apport de différentes doses sur KHNO_3^- :****Figure 19 : Evolution du KHNO_3^- dans le sol en fonction des doses**

D'après les résultats obtenus figure 19, nous remarquons que la teneur des sols en KHNO_3^- augmente d'une façon très hautement significative ($p=0,00022$) (tableau10) avec l'augmentation des doses de boues dans le sol de 139,99mg/100g de terre pour D₀ à 197,07mg/100g de terre pour D₃.

III.2. Effet de la profondeur du sol sur le potassium KHNO_3^- :**Figure 20 : La distribution du KHNO_3^- dans le sol en fonction des profondeurs**

Les teneurs en KHNO_3^- diminuent d'une façon significative ($p=0,02069$) (tableau10) de l'horizon de surface (0-20cm) qui est de 173,53mg/100g de terre à l'horizon de profondeur (20-40cm) qui est de l'ordre de 154,26mg/100g de terre (**Figure 20**).

Tableau 10 : Analyse de la variance au seuil de 5% de KHNO_3^- pour les facteurs dose et horizon

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	29620,69	31	955,506				
VAR.FACTEUR 1	14596,21	3	4865,403	9,878	0,00022		
VAR.FACTEUR 2	2971,289	1	2971,289	6,033	0,02069		
VAR.INTER F1*2	232,145	3	77,382	0,157	0,9235		
VAR.RESIDUELLE 1	11821,05	24	492,544			22,193	13,54%

Le test NEWMAN et KEULS fait apparaitre:

- Pour le facteur dose, deux groupes homogènes A et B. Les doses D_0 , D_1 et D_2 appartiennent au groupe B, et dose D_3 appartient au groupe A (Tableau 11).

Tableau 11 : Résultats du test de NEWMAN et KEURS pour le KHNO_3^- du sol épandus avec des boues résiduaires (Facteur 1 : dose)

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES	
4	D3	197,076	A	
3	D2	166,663	B	
2	D1	151,868	B	
1	D0	139,995	B	

Tableau 12 : Résultats du test de NEWMAN et KEURS pour le KHNO_3^- du sol épandus avec des boues résiduaires (Facteur 2 : horizon)

F2	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES	
1	H1	173,536	A	
2	H2	154,264	B	

- Pour le facteur horizon, deux groupes homogènes A et B. L'horizon H1 appartient au groupe A, et l'horizon H2 appartient au groupe B (Tableau 12).

IV. Evolution du potassium assimilable dans le sol après épandage des boues

IV.1. Effet de l'apport de différentes doses sur le potassium assimilable (KA) :

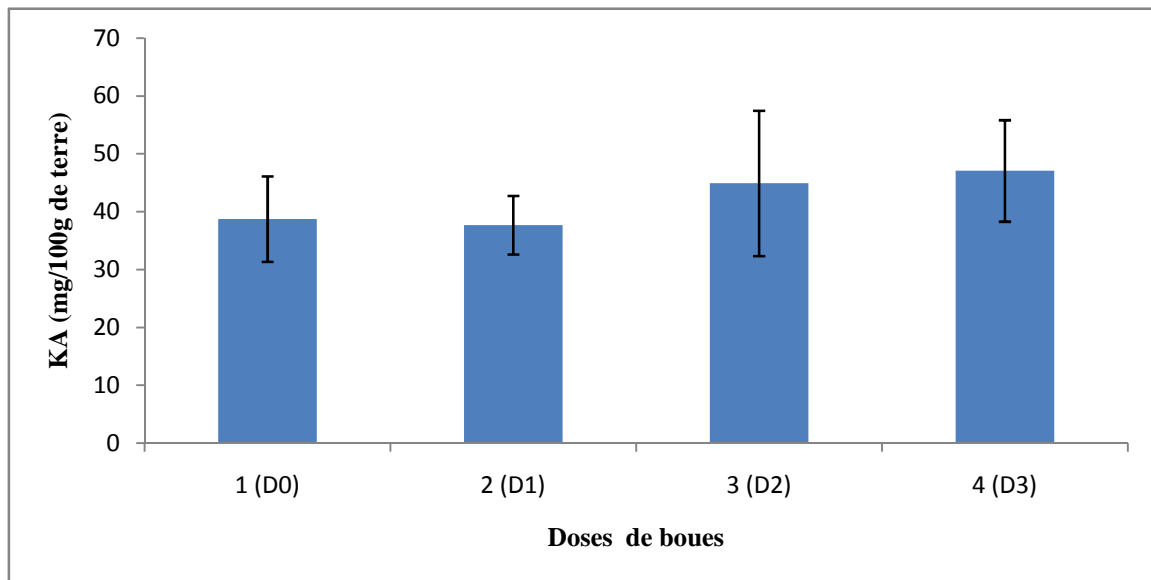


Figure 21 : Evolution du potassium assimilable dans le sol en fonction des doses

D'après les résultats obtenus figure 21, nous remarquons que la teneur des sols en potassium assimilable augmente d'une façon non significative ($p=0,16586$) (tableau13) avec l'augmentation des doses de boues dans le sol de 38,74mg/100g de terre pour D₀ à 47,07 mg/100g de terre pour D₃.

IV.2. Effet de la profondeur du sol sur le potassium assimilable (KA) :

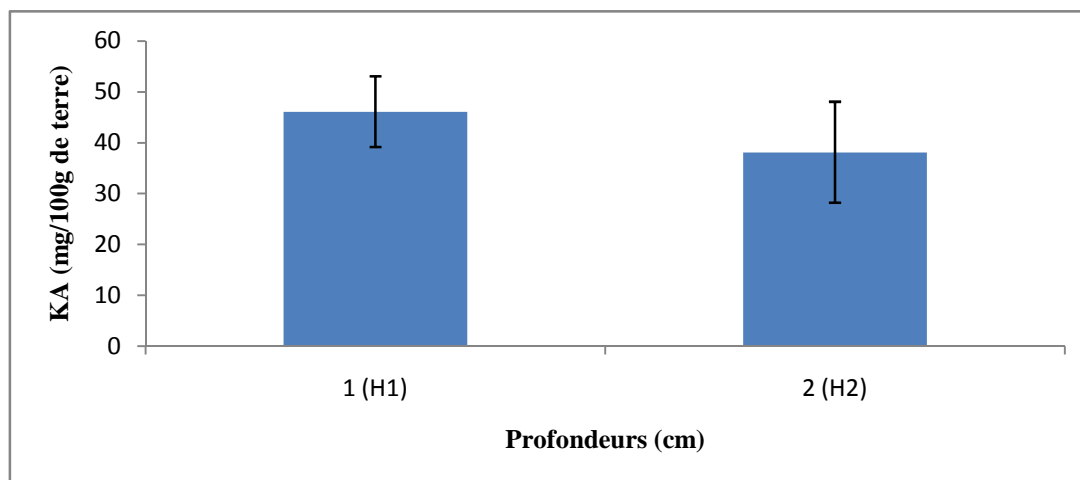


Figure 22: La distribution du potassium assimilable dans le sol en fonction des profondeurs

Les teneurs en KA diminuent d'une façon significative ($p=0,02567$) (tableau13) de l'horizon de surface (0-20cm) qui est de 46,09mg/100g de terre à l'horizon de profondeur (20-40cm) qu'est de l'ordre de 38,11mg/100g de terre (**Figure 22**).

Tableau 13 : Analyse de la variance au seuil de 5% de KA pour les facteurs dose et horizon

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	3479,038	31	112,227				
VAR.FACTEUR 1	506,157	3	168,719	1,839	0,16586		
VAR.FACTEUR 2	509,525	1	509,525	5,554	0,02567		
VAR.INTER F1*2	261,471	3	87,157	0,95	0,43382		
VAR.RESIDUELLE 1	2201,885	24	91,745			9,578	22,75%

Tableau 14 : Résultats du test de NEWMAN et KEURS pour le KA du sol épanchés avec des boues résiduaires (Facteur 2 : horizon)

F2	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES
1	H1	46,099	A
2	H2	38,119	B

Le test NEWMAN et KEULS fait apparaître:

- Pour le facteur horizon, deux groupes homogènes A et B. L'horizon H1 appartient au groupe A, et l'horizon H2 appartient au groupe B (Tableau 14).

V. Evolution du potassium non échangeable (Kne) dans le sol après épandage des boues

V.1. Effet de l'apport de différentes doses sur le potassium non échangeable (Kne) :

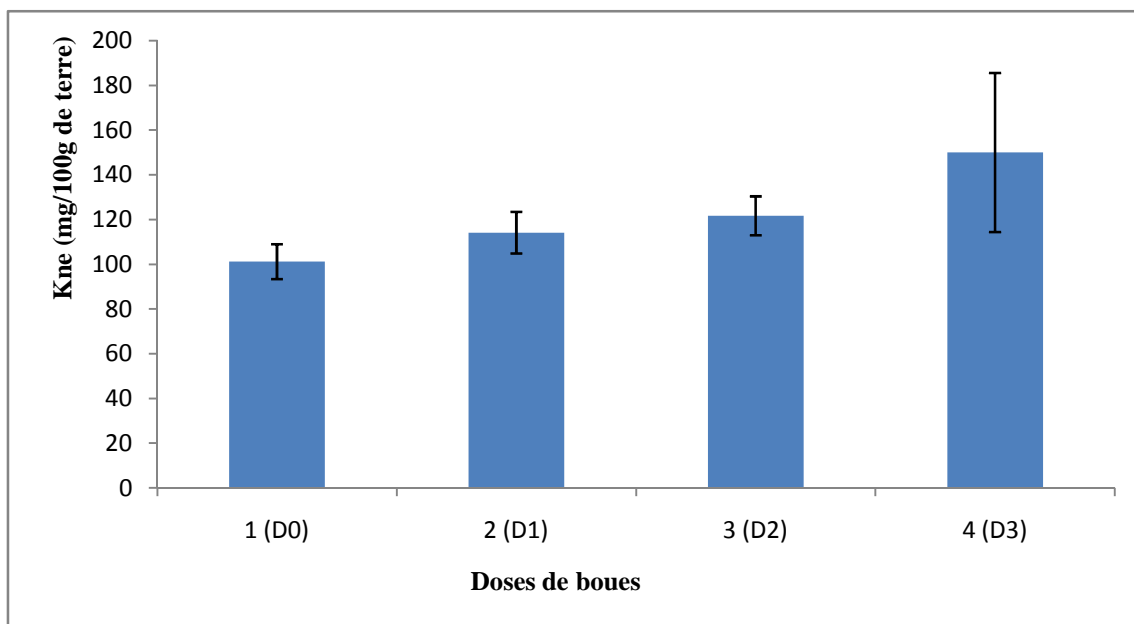


Figure 23 : Evolution du potassium non échangeable dans le sol en fonction des doses

D'après les résultats obtenus figure 23, nous remarquons que la teneur des sols en potassium non échangeable augmente d'une façon très hautement significative ($p=0,00086$) (tableau15) avec l'augmentation des doses de boues dans le sol de 101,25mg/100g de terre pour D₀ à 149,99mg/100g de terre pour D₃.

V.2. Effet de la profondeur du sol sur le potassium non échangeable (Kne) :

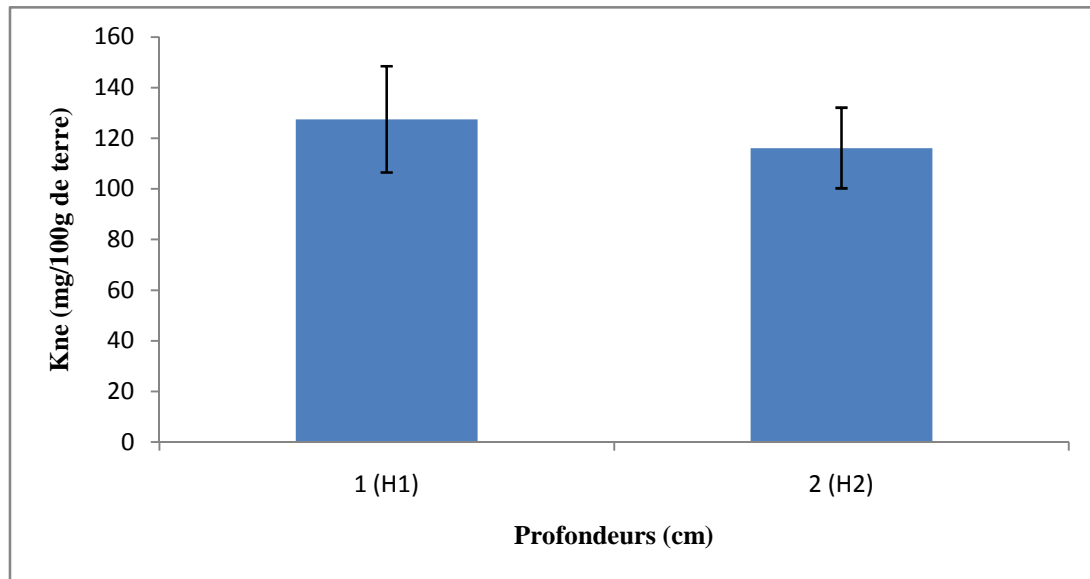


Figure 24: La distribution du potassium non échangeable dans le sol en fonction des profondeurs

Les teneurs en Kne diminuent d'une façon non significative ($p=0,13463$) (tableau15) de l'horizon de surface (0-20cm) qui est de 173.53mg/100g de terre à l'horizon de profondeur (20-40cm) qu'est de l'ordre de 154.26mg/100g de terre (**Figure 24**).

Tableau 15 : Analyse de la variance au seuil de 5% de Kne pour les facteurs dose et horizon

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	21714,76	31	700,476				
VAR.FACTEUR 1	10205,87	3	3401,958	7,842	0,00086		
VAR.FACTEUR 2	1019,971	1	1019,971	2,351	0,13463		
VAR.INTER F1*2	77,289	3	25,763	0,059	0,9798		
VAR.RESIDUELLE 1	10411,62	24	433,818			20,828	17,10%

Le test NEWMAN et KEULS fait apparaitre:

- Pour le facteur dose, deux groupes homogènes A et B. Les doses D_0 , D_1 et D_2 appartiennent au groupe B, et dose D_3 appartient au groupe A (Tableau 16).

Tableau 16 : Résultats du test de NEWMAN et KEURS pour le KA du sol épandus avec des boues résiduaires (Facteur 1 : Doses)

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES	
4	D3	149,999	A	
3	D2	121,752		B
2	D1	114,164		B
1	D0	101,251		B

VI. Discussion générale :

Les résultats de l'essai réalisé sur le terrain ont montré que toutes les formes du potassium dosées (KHNO_3^- , KA et Kne) augmentent avec l'augmentation des doses de boues et diminuent avec la profondeur du sol.

Les teneurs KHNO_3^- sont élevées dans les sols amendés et proches de celles trouvées par Bourbia (1996) qui a travaillé sur sol alluviaux de la région de Tadmaït. Cette richesse ne peut être expliquée que par la nature du sol, En effet le sol étudié est un sol alluvial, ayant subi des crues qui ont enrichi le sol en éléments chimiques, en particulier le potassium.

De même, ces teneurs élevées en potassium peuvent être attribuées à l'amendement en fumier des sols (communication de l'agriculteur) et observation du fumier en surface du sol mais d'une façon non homogène.

L'effet de l'apport de boues résiduaires urbaines sur la biodisponibilité du K a été observé et l'apport a augmenté les formes de K biodisponible (KHNO_3^- , KNH_4 et Kne).

En effets, les boues résiduaires apportées contiennent du K, et leur apport ont amélioré le taux de KNH_4 (KA) de 24% au niveau de profondeur (0-20cm) pour la dose D₃, de 14% pour la dose D₂.

Les sols de surface de (0-20cm) ont mieux bénéficiés des apports des boues, vu que la boue a été incorporée aux sols de la couche superficielle (0-20cm) autorisée par l'ONA, cette profondeur d'épandage est limitée à 20cm pour que les polluants que contient les boues n'atteignent les eaux des nappes souterraines, et aussi que c'est au niveau de cette profondeur que les racines des végétaux prélèvent les éléments nutritifs indispensables à leur croissance.

En effet, malgré l'effet significatif le long des profondeurs, celui reste limité, il est de 9% pour le niveau (0-20cm) et de 14% pour le niveau (20-40cm) pour les doses D₂ et D₃ respectivement.

La fertilité potassique du sol étudié s'est améliorée avec l'apport des boues résiduelles, la dose D₃ est celle qui a donné l'augmentation la plus importante en KNH₄ (assimilable). En effet, l'épandage des boues sur sol sableux améliore le taux du potassium (Bahri, A et al ; 1987). Aussi Igoud (2001) confirme la richesse des boues en potassium par un suivi d'analyse foliaire qui n'a montré aucune carence en cet élément pour le Pin maritime. Cependant, les teneurs en Kne ne pourraient pas être à l'origine de la diminution de la stabilité structurale. En effet, le K en concentration élevée devient un ion dispersant. Ce sol étant sableux, le taux d'argile faible, taux de matières organique faible (voire travaux de Hadjab et Ikene, en cour de réalisation) des apports très élevées en K pourrait engendrer une dégradation de la structure d'où il serait souhaitable d'apporter d'autres sources de matières organiques, et aussi d'appliquer des moyens culturaux de conservation de la fertilité physique de ces sols par exemple : une couverture végétale, mulching...etc.

Notre travail s'inscrit dans le cadre de la valorisation des boues résiduaires urbaines issues de station d'épuration de Boukhalfa et son effet sur la fertilité chimique du sol. Plus précisément, de l'effet de l'épandage des boues résiduaires urbaines sur la biodisponibilité du potassium assimilable et non échangeable dans un sol alluvial (cas d'orangerie de Boukhalfa).

L'épandage de la boue sur le sol à des doses différentes a montré :

- Une augmentation du KHNO_3^- potassium assimilable et du potassium non échangeable dans le sol.
- L'augmentation de la teneur des trois formes de potassium est plus importante dans les horizons (0-20cm) que (20-40cm) du sol amendé par rapport au témoin.

L'effet de dose sur l'augmentation de la biodisponibilité du potassium dans le sol est significatif.

A l'issue de ce modeste travail, les apports de boues résiduaires présentent une opportunité importante, capables d'améliorer la fertilité potassique du sol.

Notre étude n'est qu'une contribution à la valorisation agricole des boues résiduaires urbaines et la fertilité du sol. D'où il serait intéressant de multiplier les études et d'installer des dispositifs expérimentaux, pour tester plusieurs doses de boue et suivre l'évolution de ces paramètres chimiques à long terme.

En perspectives d'un approfondissement de cette thématique de recherche, il est souhaitable de compléter ce travail par :

- ✓ Les essais de longue durée, avec des apports raisonnés.
- ✓ Quantifier les teneurs en potassium à fin de suivre l'évolution de cet élément dans le sol.
- ✓ Quantifier les teneurs en polluants métalliques et organiques pour veiller sur la qualité du sol.
- ✓ Une augmentation du nombre d'échantillons et de répétition.
- ✓ Un diagnostic hydrologique, pédologique et biologique.

Référence Bibliographique

1. **Abiven S., 2004:** Relation entre matières organiques apportées, dynamique de leur décomposition et évolution de la stabilité structurale du sol. Thèse du doctorat de l'EM SAR. 228p.
2. **Adem, 1996 :** La valeur azotée des boues résiduaire de station d'épuration urbaine. 336p.
3. **Alain Damien, 2013 :** Guide de traitement des déchets. Réglementation et choix des procédés. 6^{ème} Edition, p137.
4. **Alexandre D., 1979 :** Valorisation des boues, utilisation en agriculture.
5. **Amir S., 2005 :** Contribution a la valorisation de boue de station d'épuration par compostage : devenir des micropolluants métalliques et organiques et bilan humique du compost, thèse de doctorat Faculté des Sciences Semlalia Marrakech.
6. **Angers D. A. & Caron J., 1998 :** Plant-induced changes in soil structure: processes and feedbacks. *Biogeochemistry*, pp42, 55-72.
7. **ANONYME in CHIKIROU, 2011 :** Caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques du sol global, rhizosphérique sous figuier (*Ficus carica* L) de Nezla (Timizart) .P68-70.
8. **Anonyme, 1988:** La valorisation agricole des boues des stations d'épuration urbaines, publication N°23.A.N.R.E.D. Angers(France) 117p.
9. **Anred, 1988 :** La valorisation agricole des boues de la station d'épuration. Cahier technique. 23.117p. Argentina. soil & tillage research, 54,31-39.
10. **Arrêté du 08 janvier 1998 :**fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boue sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées. Journal Officiel du 31/01/1998, 1563-1571.
11. **Arrêté du 8 janvier 1998 :** fixant prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées. Journal Officiel du 31-01-1998, 1563-1571.
12. **Association française pour l'étude des eaux ; 1974 :** Utilisation agricole des boues d'origine urbaine, synthèse bibliographique. Centre national de documentation et d'information sur l'eau, 2 rue de Madrid, 75008 Paris.
13. **Bahri A., 1987:** Utilization of treated wastewaters and sewage sludge in agriculture in Tunisia. Vol 67, pp: 233-244.

Référence Bibliographique

14. **Barbartik A., Lawarabnce JR., Sikpra J., & Colacicco D., 1985:** Factors affecting the mineralization of nitrogen in sewage applied to soil. *Am. J. SOIL. Sci.* 49: 1403-146.
15. **Barré P., 2007 :** Interaction plantes-minéraux argileux dans une perspective écologique. Thèse de doctorat en écologie, Science de la terre de L'UPMC. 122p.
16. **Basic F., Kusic I., Mesic M., Nestroy O., & Butorac A., 2004:** Tillage and crop management effects on soil erosion in central Croatia. *Soil & Tillage Research*, **78**, 197-206.
17. **Baudez JC ; 2001 :** Rhéologie et physico-chimie des boues résiduaires pâteuses pour l'étude
18. **Bechac; 1987:** Traitement des eaux usées (2ème édition). P281
19. **Beckett P.H.T., 1970 :** Le potassium fixe et les effets résiduels des engrais potassique. Soils sciences laboratoire. Oxford, Grande Bretagne.
20. **Benmouffok A ., Allili N., Djebala L., Akil A. & Medjani A. 2005:** Caractérisation et valeur agronomique des boues issues d'épuration des eaux usées (cas de la station d'épuration de tizi ouzou Est, Algerie), Watmed2 (Marrakech), 4p.
21. **Benmouffok A., 1994 :** Caractérisation et valorisation agricole des boues résiduaires de Draa Ben Khada (Algérie), cahier Agricultures 1994 ;3 :295-9p295-299.
22. **Benmouffok A., 1994 :** Caractérisation et valorisation des boues résiduaires de Draa Ben khedda. Cah .Agric.3ème édition J.L Eurotexte.P297.
23. **Benmouffok A., 1980 :** Contribution a l'emploi des boues résiduaires en culture maraichères. Thèse d'ing INA. Alger 36p.
24. **Berchiche C.; Ladjimi S, 2010:** Contribution à l'étude de la valorisation et de la caractérisation des boues résiduaires issues de la station d'épuration Est de Tizi-Ouzou. Essai expérimental
25. **Bertrand R., et Gigou J., 2000 :** La fertilisation des sols tropicaux, Ed. Maisonneuve et Larose, Paris. 397p.
26. **Blondeau F ; 1985 :** traitement centralisé des boues T.S.M l'eau, n°6, JUIN PP 231-242.
27. **Bonneau M., et Souchier B., 1997 :** Constituants et propriétés du sol, T2 ; Ed. Masson ; 459p
28. **Bourbia Mouas S., 1996 :** Biodisponibilité du potassium dans la rhizosphère de *Olea europea*

Référence Bibliographique

29. **Brame V., Iefevre G., 1977** :Aspects qualitatifs de l'utilisation agronomique des boues résiduelles des stations d'épurations .Bull. d'AFES N°3 ,pp :125-140 .
30. **Brame, 1986** : Les procédés physico-chimiques d'épuration des eaux usées urbaines documents techniques A.F.E.E France.
31. **Bukman O et al., 1990**: Agriculture et fertilization: les engrais, leur avenir. Ed division de l'agriculture, Norskhydro, Olso, Norvège. 258p.
32. **Cadillon M et al., 2002** : La valorisation agronomique des margines, société du canal de province et d'aménagement de la région provençale.
33. **Callot G., Chamayou H., Maertens C et Salsec L., 1982** : Les interactions sol/racine. Ed I.N.R.A Paris. 325p.
34. **Calvet R., 2003** : Le sol propriétés et fonctions. T2 : Phénomènes physiques et chimiques application Agronomiques et Environnement. Ed. France Agricole. 510-511pp.
35. **Chaillou S., 2008** : Développement racinaires, fonctionnement de la rhizosphère. 2p.
36. **Chatha TH., Haya R. Latif I. 2002**: Influence of sewage sludge and organic manures application on wheat yield and heavy metal availability. Asian J. Of plant Sciences 1(2):pp79-81.
37. **Coïc, Y ; Coppenet M, 1989** : Les oligo-éléments en agriculture et élevage. Incidences sur la nutrition humaine. Paris : INRA Ed.114p.
38. **Collection OTV (omnium de traitement et de valorisation) ,, 1997** : Traiter et valoriser les boues. Collection N°2, Edition technique et documentation. Lavoisier, Paris .457p .
39. **Collection OTV. , 1997** : Ouvrage collectif. Traiter et valoriser les boues. Collection OTV. N°2. 457P.
40. **Comité National des Boues (CNB), 2001** : Les boues d'épuration municipales et leur utilisation en agriculture collection « valorisation agricole des boues d'épuration ». Ed. Ademe. France.
41. **Comité National des Boues(CNB) 2000**: Les boues d'épuration municipales et leur utilisation en agriculture. Dossier Doc. Agence de l'environnement de la maîtrise de l'énergie (Ademe) 59p.
42. **Coulibaly Mohand Alfatihou, 2010** : Contribution à l'analyse des eaux usées urbaines de la nouvelle station d'épuration Est de Tizi-Ouzou p34.
43. **Davidescu D., 1981**: Le potassium en agriculture. Revue de la potasse section 16 n°8.

Référence Bibliographique

44. **Debba MB., 1998** : Contribution à l'étude des boues résiduelles. Intérêt agronomique et effets des polluants dans le sol et le végétal. Mémoire de magistère en science agronomique université de Mostaganem.180p.
45. **Degremont, 1966** : Mémento technique de l'eau.
46. **Degremont, 1972** : Mémento technique de l'eau.
47. **Degremont, 1978** : Mémento technique de l'eau : 8^{ème} édition. Edition Technique et Documentation Lavoisier, 1200p
48. **Denis B., 2000** : Guide des analyses en pédologie ,2^{ème} édition revue et augmentée .édition I.N.R.A, Paris, France.
49. **Des jardins, cité par fateh tamoul 2007**: Détermination de la pollution résiduelle d'une station d'épuration par lagunage naturel « cas de la lagune de beni-messous » institut des sciences de la mer et de l'Aménagement du Littoral – DEUA 2007
50. **Dexter, A. R. 1997**: Physical properties of tilled soils .Soil and tillage research.43, 41-63
51. **Dridi B. et Toumi C., 1999** : Influence d'amendements organiques et d'apport de boues sur les propriétés d'un sol cultivé. Edition et Gestion des sols 6. 1. pp7-14.
52. **Duchaufour PH ., 1977** : pédogenèse et classification pédologique (II) Edition Masson Paris ,477p.
53. **Duchaufour PH., 1991** : Introduction à la science du sol : Sol, végétation, environnement 6^{ème} Ed. De l'abrégé de pédologie. Masson, Paris. 491p.
54. **Duchene, 1990** : Amélioration du traitement de l'azote des effluents.
55. **Dudkowski A, 2000a** : L'épandage agricole des boues de station d'épuration d'eau urbaines courrier de l'environnement de l'INRA. Octobre 2000, pp 134-135.
56. **Ehlers W; Kopke U; Hesse F & Bohm W, 1983**: Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil & Tillage Research*, 3, 261-275.
57. **Faucard J, 1994** : Filière pépinière de la production et de la plantation technique et documentation, édition Lavoisier Paris 428p
58. **Ferreras L.A., Costa J.L., Garcia F.O & Pecoran C. 2000**: effect of no tillage on some soil physical properties of structural degraded pertocalcic paleudoll od southern "pampa"of Fertilisantes sur l'enrichissement en métaux lourds des parcelles. Rapport du contrat 4084/93.
59. **Garcia Orenes F.; Guerrero C. ; Matarx-Solera J.; Navarro-Pedreno J. ; Gomez I. ; et Mataix-Beneto J., 2005** : Factors controlling the aggregate stability and bulk

Référence Bibliographique

- density in two different degraded soil amended with biosolides. Soil and Tillage Research. V. 82. Issue 1.pp.65-76.
60. **Gaucher G., 1968** : Traité de pédologie agricole, le sol et ses caractéristiques agronomiques. Ed. Dunod Paris 382p.
61. **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.
62. **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, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 360p.
63. **Girard M C ., Walter C., Remy J C., Berthelin J et Morel J L., 2005**: Sol et environnement. Ed. Dunod, Paris. 816p.
64. **Grant, C. A. & Lafond, G. P. 1993**. The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on a clay soil in southern Saskatchewan. Canadian Journal of Soil Science, 73, 223-232.
65. **Grosclaude G., 1999** : L'eau : usage et polluants. Edition INRA, 210p.
66. **Guiraud G, 1977** : Evolution de l'azote du sol en présence des boues résiduelles, Orleone, Min, Environt.
67. **Habbi R., Nachat Y., 2007** : Variation des propriétés chimiques, minéralogiques et la biodisponibilité du potassium dans les sols rhizosphérique et globaux sous oliviers. Thèse d'ing UMMTO. 101 p.
68. **Hammel, J. E., 1989**. Long-term tillage and crop rotation effects on bulk density and
69. **Heller R., Esnault R., Lance C. 1998** : Physiologie végétal : Nutrition. 5^{ème} Ed. Dunod, Paris, 323p.
70. **Hill R. L., 1990**: Long-term conventional and no-tillage effects on selected soil physical properties. Soil Science Society of America Journal, pp54, 161-166.
71. **Hinsinger P., 2001** : Interaction chimiques entre racines et minéraux du sol, conséquence sur l'altération des minéraux et la nutrition des végétaux ; Thèse en vue d'obtenir l'habilitation à diriger des recherches, Univ. De Montpellier, 147p.
72. **Hinsinger, 2002 in Girard et al., 2005** : Sol et environnement. Ed. Dunod, Paris. 816p.

Référence Bibliographique

73. **Hussein KH. Ahmed. Hussein A. FAURY et Abdel-hadj., 2010:** Study of sewage sludge use in agriculture and its effect on plant and soil. Agriculture and its effect on plant and soil. Agriculture and Biology journal of North America.1 (5), pp.1044-1049.
74. **Ifen, 2001:** Plus de 60% des boues d'épuration municipales ont été épandues en 1989 sur 2% des sols agricoles. Les données de l'environnement, N° 63, Février 2001, 4 page.
75. **Igoud S., 2001 :** Valorisation des boues résiduelles issues des stations d'épurations urbaines par leur épandage dans les plantations forestières. Rev. Energ. Resi : Production et Valorisation_ Biomasse, pp: 69-74.
76. **Jamil M., Qacim M. & Umar M., 2006:** Utilization of sewage sludge as organic fertilizer in sustainable agriculture. J. Of Applied Sc. 6(3):531-535.
77. **Jamonet B., 1987 :** Le traitement des boues résiduelles. Université des sciences et technique du Languedoc. Montpellier.
78. **Jocteur Monrozier L., 2001 :** Conséquence de l'anthropisation des sols. Les Boues quels risques? Colloque Marseille, 5 avril 2001. Mounement Nationa de lutte pour l'Environnement.
79. **Jokien, 1990:** "Effet of phosphorus precipitation chemical on characteristics and agricultural value of municipal sewage sludges » Characteristics of Ca, Al and Fe precipitated sewage sludges " Act Agri. Scand. 40 :123-129.
80. **Juste et Solda, 1997 :** Effets d'application massive de boue de station d'épuration en monoculture de maïs : action sur le rendement et la composition des plantes et sur quelques caractéristiques du sol ; pp147-155.
81. **King L.D., Morris H.D., (1972):** land disposal of liquid sewage sludge.-J. Envir. Qual., pp.325-329.
82. **Kirkham, 1982:** Agricultural use of phosphorus in sewage sludge » dans: Adv.In agron. page 129-163.Elsevier.
83. **Koller E, 2004 :** Traitement des pollutions industrielles eau, air, sols, boues. Ed 2004, pp 4-22.
84. **Ladjel, 2004 :** L'exploitation des eaux usées urbaines dans la station d'épuration CFMA-Boumerdes.
85. **Lafond R., Cauchan C. et Durruc JP., 1992 :** Pédologie forestière. Ed. ISBN. Canada. 146p.
86. **Lassée C ,1985:** Analyse des boues tome1, généralité et analyse physique : Etude synthèse.

Référence Bibliographique

87. **Lassée C, 1985** : Analyse des boues A.F.E.E.Tome₁ ; 137p, Tome₂ ; 127p
88. **Legret M ,1984** : Les métaux lourds dans les stations d'épuration ,valorization agricole et extraction des métaux toxiques . Bull Maison Labo pp ,35-40 .
89. **Lindsay et Logan, 1998**: Field response of soil physical properties to sewage sludge. Journal of Environmental Quality, 27, pp 534-542.
90. **Loue A, 1980** : Le potassium et le maïs. Ingénieur Agronome I.N.A. Département d'Agronomie de la SCPA Mulhouse. France
91. **Mengel et al in Loue, 1980** : Dossier K₂O, SCPA n° 17.
92. **Metzger L, Levanon D. et Mingelgrin U., 1985**: the effect of sewage sludge on soil structural stability. Microbiological Aspects. Soil Science of America Journal. Vol. 51 N°2, pp. 346-351.
93. **Mhiri A., 2002** : Le potassium dans les sols de Tunisie. Atelier sur la gestion de la fertilité potassique, Aquis et perspectives de la recherche. Institut national agronomique de Tunisie.
94. **Mininni G; Sbrilli A; Guerriero, E; Rotatori M, 2004**: « Dioxins and furans
95. **Morard P., 1974** : Rôle physiologique du potassium chez les végétaux. Biologie, humus, santé de la population 3/49. Revue de la potasse n°10.Berne (suisse).8p.
96. **Morel J.L. 1977** : contribution a l'étude de l'évolution des boues résiduaire dans le sol. These de doctorat, Nancy, 11 p
97. **Morel R., 1989** : Les sols cultivés .Ed. Tec. Et doc.
98. **Morel R., 1996** : Les sols cultivés ; Ed. Lavoisier ; Paris ; 389p.
99. **Morel, 1996 ; SPARKS, 1987 in Habbi, 2007** : Variation des propriétés chimiques, minéralogiques et la biodisponibilité du potassium dans les sols rhizosphérique et globaux sous oliviers. Thèse d'ing. U.M.M.T.O.101p.
100. **Morel, R. 1996** : Les sols cultivés ; Ed. Lavoisier ; Paris ; 389p.
101. **Moughli L., 2000** : Fertilité des sols et contrôle de la pollution. Institut agronomique et vétérinaire, Hassan II, Rabat, Maroc. Département des sciences du sol. www.iav.ac.ma. 6p.
102. **Moughli L., 2000 ; in Chikirou L., 2011** : Caractéristiques physiques, chimiques, et minéralogiques du sol global, rhizosphérique sous figuier (ficus carica L) de Nezla(TIMIZART).
103. **Mugnir A A.1999** : « Gestion des boues : les agriculteurs au service des villes » .Edi-besançon ,colleque , octobre 1999 .

Référence Bibliographique

104. **Nakib M, 1986:** Contribution à l'étude des possibilités d'utilisation des eaux usées et des boues d'épuration en agriculture Thèse de Magistère. INA, Alger, 81p.
105. **O.P.E.C.S.T; 2001:** Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé, par Miquel G. Rapport n°261.pp100-261.
106. **OMS (Organisation Mondiale de la Santé) ., 1979 :** Recommandation pour la surveillance sanitaire des zones côtières à usage récréatif et des zones conchylicoles. Bureau régional de l'OMS pour l'Europe, Copenhague, 168p.
107. **Pescod M.B, 1992:** Wastewater treatment and use in agriculture. Publication FAO, irrigation & drainage N° 47. 117p.
108. **Pommel, 1979 :** Valorisation agricole des boues résiduaire. Cycle formation permanente 8p.
109. **Proton, 2005 in Chikirou, 2011 :** Caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques du sol global, rhizosphérique sous figuier (*Ficus carica* L) de Nezla (Timizart) .P67.
110. **Quemener J, 1986:** Important factors in potassium balance sheets : Proc. 13th Congr. Int. Pot ash. Reims. 41p.
111. **Quemener J., 1984 :** Les états du potassium dans le sol et conséquence sur l'alimentation des plantes. C.R.A Agro de France n° 11 : 1377-1390 pp.
112. **Quemener J., 1984 :** Les études du potassium dans le sol et conséquences sue l'alimentation des plantes. CRAagr. De France n° 11 : pp 1377-1392.
113. **Rajkane v K., 2000 :** Interaction de sol et de racine dans la prise. Projet contenu. Fords scientifiques nationaux hongrois des recherches n°035274.3p.
114. **Rejsek F., 2002:** Analyse des eaux. Aspects réglementaires et techniques. Ed CRDP d'Aquitaine. France : 358p.(P241-242-243)
115. **Rhoton, F. E., Bruce, R. R., Buehring, N. W., Elkins, G. B., Langdale, C. W. & Tyler, D. D. 1993:** Chemical and physical characteristics of four soil types under conventional and notillage systems. Soil & Tillage Research, 28, 51-61.
116. **Ripert C., Tiercelin JR., Navarot C., Klimo E., Gajarszki G., Cadillon M., Tremea L. & Vermes L. 1990 :** Utilisation agricole et forestière des eaux usées domestiques. Bulletin technique du Cemagref.79.18p.
117. **Robert M. et Trocmes., 1975 :** Le potassium dans la pédologie. Ed Masson 4598p.

Référence Bibliographique

118. **Robert M., 1992:** K- fluxes in soils in relation to parent materiel and pedogeneses in tropical temperates and arid climatis. Procceeding of 23rd colloquin of the international potash institute held at prague: 27-44pp.
119. **Robert M., 1996 :** Le sol : interface dans l'environnement, ressource pour le développement. 3^{eme} cycle et recherche. Collection sciences de l'environnement.
120. **Robert, 1992 ; Pal et Durge, 1989 ; Acquaye, 1973 ; Bosc, 1988 ; Quemener, 1986 in Bourbia Mouas S, 1996 :** Biodisponibilité du potassium dans la rhizosphère de *Olea europea L.*
121. **Rodier J, 2009 :** L'analyse de l'eau, 9^{eme} Edition. P1579
122. **Sabey B.R., Hart W.E., (1975):** Land application of sewage sludge, effects on growth and chemical composition o plants.- J. Envir.Qual., 4, pp.252-256.
123. **Sbih M., 1990 :** Etude de la biodégradation des boues résiduares de station d'épuration: effet pour la biodisponibilité du phosphore pour le végétal. Mémoire DAA. INAPG et INRA Grignon 39p.Scenarios', Ressources, Conservation and Recycling, Vol. 35, pp. 191 – 200.
124. **Scheffer E. et Schachtschabel., 1967 :** Les éléments nutritifs dans le sol : le potassium. Revue de la potasse, section 4, 1-3pp.
125. **Schwartz et al., 2005; in Chikirou L., 2011 :** Caractéristiques physiques, chimiques, et minéralogiques du sol global, rhizosphérique sous figuier (*ficus carica L*) de Nezla(TIMIZART).
126. **Shi W. Wang X. and Yan W., 2004:** distribution petters of available P and K in rape rhizosphère in relation to genotypic deference Plant and Soil 261. pp 11-16.
127. **Skiredj A, 2005 :** Besoins des plantes en eaux et éléments nutritifs Département d'Horticulture /IAV Hassan II / Rabat/Maroc.1p. (www.fertigation.com)
- soilimpedance in Nothern Idaho. *Soil Science Society of America Journal*, 53, 1515-1519.
128. **Soltner D., 2003 :** Les bases de la production végétales. Tome 1 le sol et sont amélioration 23^{eme} Ed. Science et techniques agricoles 472p.
129. **Soltner D., 2000 :** les bases de la production végétale T1 : le sol. 22^{eme} édition science et technique agricole Maine et Loire France 457p.
130. **Sommelier et al., 1996 :** La valeur phosphatée des boues résiduares des stations d'épuration urbaines. Ademe. Edition, Angers.

Référence Bibliographique

131. **Sommers, 1977:** «Chemical composition of sewage sludges and analysis of their potential use as fertilizers » journal of environment quality, pp 225-232.
132. **SPDE, 2006 :** Syndicat professionnel des entreprises de services d'eau et d'assainissement
133. **Stengel P; Douglas J T ;Guérif J; Goss M J; Monnier G & Cannell R Q, 1984.**
134. **Suh Y.J. et Roussaux P., 2002:** An LCA of Alternative Waste Water Sludge Treatment
135. **Surajet Mondal ^a, D.D.Singh ^b, A. k Patra ^b, B, S Dwivedi ^b 2015:** Changes in soil quality in response to short-term application of municipal sewage sludge in a type laplustept render compe- Wheat cropping system. Environnemental Nationtechnology, Monitoring et Management Vol.4 pp.37-41.
136. **Tauzin, C., Juste C., 1986 :** Effets de l'application à long terme de diverses matières.
137. **Tebrüge f., Düring r.a., 1999.** Reducing tillage intensity, a review of results from a long term study in Germany. *Soil & Tillage Research*, 53: 15-28.
138. **Tester CF., Sikora LJ., Taylor JM. & Parr JF. 1982 :** N Utilization by tall fescue from sewage sludge, compost amended soils. *Agro. J.*74:1013-1018.
139. **Thoman C, 1983 :** Les possibilités d'utilisation des eaux usées en agriculture - technique et documentation. pp 10-16.
140. **Tisdale et al., 1975 ; in Chikirou L., 2011 :** Caractéristiques physiques, chimiques, et minéralogiques du sol global, rhizosphérique sous figuier (*ficus carica L*) de Nezla(TIMIZART).
141. **Turpault M P., Gobran G R., et Bonnaud P., 2006 :** Temporal variations of rhizosphere and bulk soils chemistry in Douglas fir stand. Elsevier geoderma.
142. **Unger. P. W. & Jones, O. R., 1998:** Long-term tillage and cropping systems affect bulk.
143. **Vilaginès.R ,2003 :** eau, environnement et santé public.174p.
144. **Violante P., Adamo P., Felleca G et Palmiero F., 1998:** N, K and P distribution in rhizosphere and bulk soils of field grown maize. Symp.N°43, 16^{eme} congres mondial des sciences du sol de Montpellier (France). 7p
145. **Yara, 2009 :** Dynamique du potassium (<http://Fert.Yara.fr> library/attachement/crop).

Résumé:

Les activités humaines génèrent des déchets en quantités importantes, leur gestion pose de gros problèmes. De ce fait notre étude est basée sur l'analyse chimique des éléments nutritifs présents dans les boues résiduaires, prélevées au niveau de la STEP de Boukhalfa située à l'Ouest de la ville de Tizi-Ouzou, cette étude permet de connaître l'effet d'épandage sur la fertilité potassique du sol (cas de l'oranger de Boukhalfa).

L'expérimentation a été menée dans un champ d'oranger. Le terrain étudié a été divisé en 4 blocs, et chaque bloc divisé en 4 micro-parcelles dont nous avons ajouté une dose différente d'épandage.

Les prélèvements ont été réalisés à l'aide d'une tarière pédologique à deux niveaux de profondeurs (0 à 20 cm) (20 à 40 cm), les quelles nous avons effectuées des analyses au niveau de laboratoire du sol du département d'agronomie.

L'expérience a montré l'augmentation de KHNO_3^- d'une façon hautement significative les trois formes de potassium : K assimilable, KHNO_3^- et K non échangeable, avec des proportions différentes.

L'apport en boues résiduaires a engendré une amélioration de la teneur en potassium bio disponible dans le sol.

Mots clés : boues résiduaire – STEP - épandage – potassium – bio disponible.

Summary:

Human activities generates large quantities of waste, their management contribute to major problems, thereby our study, is based on chemical analysis of nutrients in sewage sludge, taken from the STEP of Boukhalfa, located west of the town of Tizi-Ouzou. This study allows to know the effect of spreading on soil fertility (case of the orange tree of Boukhalfa).

The experiment was carried out in an orange field. The study site was divided in 4 blocks divided into 4 micro plats of which we added a different dose of spreading.

The samples were taken using a pedological tariere in two levels (0-20 cm) and (20-40cm), to which we carried out analyzes at the soil laboratory of the department agronomic.

The experience demonstrates the increase of KHNO_3^- , potassium available and the non-exchangeable in varying proportions.

The contribution of the sewage sludge led to an improvement of the bio available potassium content in the soil.

Keywords: sewage sludge - STEP – spreading - potassium - biodisponible.

Chapitre I:
Synthèse bibliographie

*Chapitre II:
Matériel et méthode*

Chapitre III:
Résultats et discussion

Introduction générale

Références bibliographiques

Conclusion générale et perspectives