



ROYAUME DU MAROC
INSTITUT AGRONOMIQUE ET VETERINAIRE HASSAN II – RABAT

MEMOIRE DE TROISIEME CYCLE

Pour l'obtention du Diplôme d'ingénieur d'Etat en Agronomie

Option : Sciences du Sol

Intitulé du Sujet :

**Gestion des boues des stations d'épuration au Maroc :
Quantification, caractérisation et options de traitement et
de valorisation**

Présenté et Soutenu publiquement par :

Melle HAMDANI Imane

Devant le jury composé de :

Pr. CHIANG Claude	UCL / Belgique	Président
Pr. SOUDI Brahim	DSS / IAV Hassan II	Rapporteur
M. MAHI Mustapha	DAE / ONEP	Examineur
M ^{me} NAJIM Khadija	CU / Suissi – Rabat-	Examineur
M. KRIM Hassan	DERD / Rabat	Examineur
Pr. NAIMI Mustapha	DSS / IAV Hassan II	Examineur
Pr. ALAOUI Si Bennasseur	DAAP / IAV Hassan II	Examineur

- Juillet 2008 -

Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II – B.P. 6202 – Instituts, 10101 Rabat
Tél : (037) 77 17 58/59/45 ou 77 07 92 ; Fax : (037) 77 81 38 ou 77 58 38
Site web : www.iav.ac.ma

Dédicaces

Le présent travail est une immense gratitude à ma maman QISSI Zahra et mon papa HAMDANI El Bachir, pour l'amour avec lequel ils m'ont entouré, leur confiance en moi et en mes capacités, leur tendresse et leur affection à l'infini.

Sans eux, je n'aurai pu arriver à ce stade ; leurs sacrifices et concessions ont été sans limites depuis mon jeune âge.

Ils ont toujours cru en moi, et pour cela je ne cesserai de les remercier toute ma vie.

Merci mes très chers parents.

A ma très chère et unique sœur, HAMDANI Najoua, qui a cru en moi depuis l'APESA, son accompagnement et son soutien pour moi n'ont fait qu'augmenter jour après jour et année après année le long de mon cursus à l'IAV Hassan II.

Son amour et sa tendresse sont incomparables, la distance qui nous sépare n'a jamais été un obstacle pour elle, au contraire elle a toujours été présente par son sourire, son attention envers moi, ses encouragements, son affection et sa tendresse qu'elle n'a jamais hésité à me les donner.

Que Dieu te garde Najoua et exauce tous tes rêves

Aux familles QISSI et HAMDANI avec tout mon amour et mon respect

A ma très chère amie Nadia, qui m'a supporté et m'a soutenue, qui m'a permis de vivre et goûter au plaisir d'une amitié d'un autre genre. Tu as été marraine de ce travail depuis qu'il n'a été qu'ébauche de travail, tu as cru en moi et tu m'as supporté.

Pour tous les bons et mauvais moments qu'on a vécu toutes les deux, je te dédie ce travail, t'espérant beaucoup de succès et de réussite

A mes deux très chères amies Leila et Ibtissam, pour leur confiance en moi, leur amour et leur soutien durant toutes mes années de formation à l'IAV, Même durant les durs moments, vous n'avez jamais douté en mes capacités. Vous m'avez soutenu, cru en moi et surtout vous m'avez tant aimé.

Votre amitié m'est un précieux cadeau...Merci

A tous mes chers amis : Mounia, Djazia, Simo, Hamza, Adil, merci de m'avoir permis de vivre pleines de belles choses.

Je vous souhaite de très belles carrières

Je dédie ce travail à Aziz, qui a été témoin des dernières étapes de mon travail, malgré la distance, pour sa belle compagnie, son soutien et sa bonne humeur. Merci d'avoir réparé mon fichier.

Je te dédie ce travail et te souhaite très bonne continuation là où tu es

Remerciements

*Je tiens à remercier vivement notre **Professeur SOUDI Brahim**, de m'avoir encadré et guidé durant cette année, pour ses précieux conseils et remarques constructives qui m'ont permis de réaliser le présent travail.*

*Avec sa méthode et logique particulières dans le travail, le **Professeur SOUDI Brahim** m'a permis de rendre ce travail plus cohérent au fur et à mesure.*

*Mon estime et ma haute considération à l'égard de notre **Professeur SOUDI** augmentent jour après l'autre.*

*Je remercie le **Professeur CHIANG Claude**, qui n'a pas cessé de nous aider le long de notre séjour à l'Université Catholique de Louvain La Neuve en Belgique.*

Son aide a été sur le plan professionnel et humain ; il nous a été un parrain le long de notre séjour.

Je le remercie de même, d'avoir accepté la présidence du jury

*Mes remerciements s'adressent aussi au **Professeur DUFÉY Joseph**, pour son accueil à l'Université Catholique de Louvain La Neuve, son aide et sa sympathie sans limites.*

*Un grand merci à **Anne**, technicienne au laboratoire où j'ai effectué les différentes analyses des boues à l'UCL en Belgique, sa précieuse aide et ses conseils m'ont permis de mieux manipuler les différents procédés d'analyse.*

*Je remercie **Monsieur MAHI Mustapha** du DAE de l'ONEP de nous avoir guidé à choisir les différents STEP de la présente étude, et de l'honneur qu'il me fait en acceptant de faire partie du jury du présent travail.*

*Un grand merci aux **chefs d'exploitation des différentes STEPs** visitées, pour le temps et l'attention qu'ils ont accordé à l'égard de mon travail.*

*Mes remerciements s'adressent aussi à **Monsieur Krim Hassan**, pour l'aide qu'il m'a porté, et d'avoir accepté de faire partie du jury.*

*Je remercie notre **Professeur NAIMI Mustafa** pour ses encouragements le long de cette année, et d'avoir accepté de faire partie du jury.*

*Mes remerciements s'adressent aussi à nos chers Professeurs du Département des Sciences du Sol ; **Pr. BAGHDAD, Pr. HILALI, Pr. MOUGHLI, Pr. TAYAA**, qui nous accompagné le long de notre spécialité au sein du DSS.*

Merci à Monsieur Taybi, Monsieur Korkote, Monsieur Omar, Madame Nadia, Madame Malika, Madame Hassania et tout le staffe du département des sciences du sol pour toute l'aide qu'ils nous ont apporté, et pour tous ceux et celles qui ont participé à la réalisation de ce travail, de près ou de loin.

Mes sincères remerciements aux membres du jury :

Madame NAJIM

Professeur ALAOUI Si Bennasseur

D'avoir accepté d'honorer le jury par leur présence dans le but d'examiner et discuter le présent travail.

Résumé

Le programme national d'assainissement liquide prévoit une augmentation du taux d'épuration des eaux usées pour atteindre les 60% à l'horizon 2015.

L'épuration des eaux usées génère, d'une part, une eau assainie et propre rejetée dans le milieu récepteur ou prête à être réutilisée, et d'autre part d'énormes quantités de boues résiduelles qui doivent avoir un débouché sûr environnementalement et faisable économiquement.

Les boues d'épuration sont des déchets qui, selon le catalogue marocain des déchets, annexe de la loi 28-00, appartiennent à la classe des déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel.

La technique la plus appropriée à la gestion des boues d'épuration au Maroc est leur valorisation en agriculture après leur compostage ou co-compostage avec d'autres types de déchets agronomiques, ou après un autre traitement permettant leur usage en agriculture.

Le compostage des boues d'épuration nécessite une bonne caractérisation physico-chimique de ces dernières.

Le principal but du présent travail a été de procéder à une caractérisation physico-chimiques de vingt trois échantillons de boues d'épuration, prélevés des stations d'épuration des eaux usées au Maroc.

Les paramètres analysés sont la teneur en matière organique, carbone total et azote total), ainsi que les éléments fertilisants (macro éléments, méso éléments, oligo éléments et éléments bénéfiques) et les éléments traces métalliques.

Le second objectif a été de faire un essai de quantification des boues à l'échelle nationale, en se basant sur les différents objectifs fixés par le programme national d'assainissement liquide (PNA), ayant donné une quantité totale de 241205 tonnes/an à l'horizon 2015.

En effet le PNA affecte directement la production des boues des stations d'épuration des eaux usées, puisqu'il prévoit l'augmentation du nombre de STEPs à l'échelle nationale pour atteindre les 260 stations d'épuration à l'horizon 2015.

Le troisième objectif a porté sur l'étude des différentes techniques et options de traitement et de valorisation des boues, ayant conclu à ce que la valorisation des boues d'épuration en agriculture des est la solution la plus adaptée au contexte marocain.

Mots-clés : Boues d'épuration, paramètres physico-chimiques, éléments fertilisants, éléments traces métalliques, valorisation agricole, compostage, co-compostage.

Abstract

The national program of water sanitation plans to reach 60pc of sewage treatment by the year 2015.

Sewage treatment generates, firstly, treated wastewater discharged in the natural or marine environment, or ready to be reused, secondly, a huge quantities of sewage sludge, requiring an adequate management; environmentally safe and economically feasible.

The Moroccan catalogue of wastes, associated to the 28-00 on solid wastes law, classifies sewage sludge in the section of wastes coming from management wastes installations, sewage treatment plants off-site and water preparation intended to human consumption and to industrial use.

The appropriate technical of sewage sludge management, is their valorisation in agriculture, after composting, co-composting with other organic wastes or after an adept treatment.

However, sewage sludge composting requires their physicochemical characterization.

The main objective of this work consists to characterize the physical-chemical parameters (content of organic matter, total Carbone and total Nitrogen), fertilizing elements and chemical micropolluants, of twenty three samples of sewage sludge, coming from nine sewage treatment plants in Morocco

The second objective was to estimate the quantities generated by sewage treatment plants in Morocco, on the basis of objectives of the national program water sanitation, which gave a total quantity of 241205 tonnes/an by the year 2015.

Actually, the national program water sanitation affects directly sewage sludge production; it plans an increasing in the number of sewage treatment plants, which will reach 260 one by the year 2015.

The third objective concerned the study of the different technical and options of sewage sludge recycling, which conclude that composting or co-composting is the appropriate technical of management of sewage sludge in Morocco.

Key words: sewage sludge, physicochemical parameters, fertilizing elements, chemical micropolluants, valorisation in agriculture, composting, co-composting.

ملخص

يرمي البرنامج الوطني لتطهير السائل إلى رفع نسبة تصفية المياه العادمة إلى رفع نسبة تصفية المياه العادمة إلى 60 % في أفق سنة 2015

تنتج تصفية المياه العادمة من جهة مياهها نقية ترمى في الوسط الطبيعي أو يعاد استعمالها و من جهة أخرى كميات هائلة من الأوحال المتبقية من تصفية المياه العادمة و التي يجب أن تلقى منفذا آمنا بيئيا و مجديا اقتصاديا

تعتبر الأوحال المتبقية من تصفية المياه العادمة نفايات ; حسب الدليل المغربي للنفايات ، مرفق القانون 00-28 حول النفايات تنتمي هذه الأوحال إلى قسم النفايات الالئية من تجهيزات تدبير النفايات ، من محطات معالجة المياه العادمة و من تحضير المياه الموجهة للاستهلاك من طرف الإنسان و المياه داث الاستعمال الصناعي

انسب تقنية لتدبير الأوحال المتبقية من تصفية المياه العادمة هي إعادة تدويرها في الزراعة بعد تسميدها لوحدها أو تسميدها مع أنواع أخرى من النفايات العضوية ، أو بعد معالجة أخرى تسمح باستعمالها في الزراعة

الهدف الأساسي لهذا العمل هو تحديد الخصائص الفيزيائية و الكيميائية لثلاثة و عشرين عينة من الأوحال المستخرجة من مختلف محطات معالجة المياه العادمة

العناصر المحللة هي محتوى المواد العضوية ، الكربون ، الازوت ، المواد المغذية و المعادن الثقيلة

الهدف الثاني هو محاولة تحديد كميات الأوحال المتبقية من تصفية المياه العادمة على المستوى الوطني ، معتمدين في ذلك على الأهداف المسطرة من طرف البرنامج الوطني لتطهير السائل ، و التي اعطت كمية 241205 طن في السنة في أفق سنة 2015

إن البرنامج الوطني لتطهير السائل يؤثر مباشرة على انتاج هذه الأوحال لأنه يرمي إلى رفع عدد محطات معالجة المياه العادمة إلى 260 في أفق سنة 2015

أما الهدف الثالث فقد ركز على دراسة مختلف التقنيات و خيارات معالجة و إعادة تدوير الأوحال ، و التي خلصت إلى أن إعادة تدوير أوحال محطات معالجة المياه العادمة في الزراعة هي الحل الأنسب للسياق المغربي

Tables des matières

<i>Dédicaces</i>	I
<i>Remerciements</i>	III
Résumé.....	V
Abstract.....	VI
ملخص	VII
Tables des matières	VIII
Liste des abréviations.....	X
Liste des Symboles	XI
Liste des tableaux	XII
Liste des figures	XIV
Introduction générale	1
<i>Revue Bibliographique</i>	3
Introduction	4
I. Interrelation eaux usées et boues résiduaires	4
1. Origine et définition des boues résiduaires.....	4
2. Types de boues résiduaires.....	5
3. Types de traitements d’eaux résiduaires	5
4. Traitements d’eaux usées au Maroc	6
5. Qualité des eaux usées du Maroc.....	8
6. Contexte réglementaire des boues résiduaires au Maroc.....	8
II. Production, Méthodes de quantification et Caractéristiques des boues d’épuration .	9
1. Production des boues par type de traitement	9
2. Moyen d’estimation de la production des boues résiduaires (GLS, 2002)...	10
3. Caractéristiques des boues des stations d’épuration des eaux usées	11
III. Options techniques de traitement, d’élimination et de valorisation	15
1. Traitement des boues résiduaires	16
2. Elimination des boues résiduaires	17
3. Valorisation des boues résiduaires en agriculture	19
IV. Coûts du compostage des boues d’épuration.....	29
1. Coûts internes	30
2. Coûts externes.....	30
3. Indicateurs de coûts relatifs à la mise en place de la technologie de compostage des boues déshydratées en Tunisie.....	30
V. Expériences internationales en matière de gestion des boues d’épuration	31
1. Expérience de l’Allemagne	32
2. Expérience de la Tunisie.....	33
VI. Etude de cas du Maroc : 9 stations d’épuration des eaux usées	36
1. Problématique de gestion des boues résiduaires.....	36
2. Quantification des boues résiduaires au Maroc.....	37
3. Autre méthode de quantification des boues résiduaires au Maroc	38
<i>Matériels et Méthodes</i>	40
1. Description et objectifs du travail	41
2. Méthodologie	41
3. Plan du travail.....	41

I.	Identification des 9 stations d'épuration des eaux usées	42
II.	Enquêtes réalisées au niveau des STEP	45
1.	STEP de Taourirt	45
2.	STEP de Tafoghalte	45
3.	STEP de Mriret.....	46
4.	STEP d'Ain Taoujdate.....	47
5.	STEP de Bouregreg.....	47
6.	STEP de Drarga.....	48
7.	STEP de Skhirat	48
8.	STEP d'Agadir	49
9.	STEP de Tiznit.....	50
III.	Méthodes et Procédés d'analyse des boues d'épuration.....	50
	Introduction.....	50
1.	Description des échantillons de boues	50
2.	Description des méthodes et procédés d'analyses des échantillons de boues	53
	<i>Résultats et discussions</i>	59
	Introduction	60
1.	Paramètres physico-chimiques.....	60
2.	Composition en éléments fertilisants des boues.....	64
3.	Composition en éléments traces métalliques	68
4.	Expérience de minéralisation en conditions contrôlées sur des échantillons de sols amendés	72
5.	Propositions d'optimisation du co-compostage des boues avec des déchets verts et des déchets ménagers.....	75
6.	Options de gestion de boues adaptées au Maroc	78
	<i>Conclusions et recommandations</i>	81
	<i>Références Bibliographiques</i>	84
	<i>Annexes</i>	90

Liste des abréviations

ADEME	Agence de Développement de l'Environnement et Maitrise de l'Energie
AFNOR	Association française de normalisation
DGCL	Direction générale des collectivités locales
ONEP	Office national de l'eau potable
ONAS	Office national d'assainissement (Tunisie)
OTV	Filiale de Veolia Eau
PNAL	Programme National d'Assainissement Liquide
GTZ	Coopération technique Allemande
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
USEPA	United States Environmental Protection Agency
ANGeD	Agence Nationale de Gestion des déchets (Tunisie)
ANRED	Agence Nationale pour le Recyclage des Déchets
MATEE	Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement
HCP	Haut Commissariat au Plan
RAMSA	Régie Autonome Multi-Services d'Agadir
EAWAG	Institut Suisse fédéral pour l'aménagement, l'épuration et la protection des eaux
FAO	Food and Agriculture Organization

Liste des Symboles

DBO₅	Demande biologique en oxygène pour une durée de 5 jours
DCO	demande chimique en oxygène
ETM	Eléments traces métalliques
MES	matières en suspension
MS	matière sèche
STEP	Station d'épuration des eaux usées
MO	Matière organique
CE	Conductivité électrique
C/N	Rapport carbone sur azote total
CTO	Composés traces organiques
Hab	Habitant
EH	Equivalent habitant
J	Jour

Liste des tableaux

Tableau 1 : Types de procédés de traitement des eaux usées.....	6
Tableau 2 : Différents types de plans et programmes en vigueur au Maroc.....	7
Tableau 3 : STEP régies par l'ONEP. (ONEP, 2006).....	8
Tableau 4 : Classification des eaux usées au Maroc (ONEP-GTZ, 1998).....	8
Tableau 5 : Production de boues à partir de différents procédés de traitement des eaux usées (GLS, 2002).....	9
Tableau 6 : Production de boues de quelques pays du monde (ADEME, Cornell Institute of wastes management et ONAS, 2006).....	10
Tableau 7 : Classes de boues d'épuration (OTV, 1998)	11
Tableau 8 : Paramètres chimiques des classes de boues d'épuration (OTV, 1998).....	11
Tableau 9 : Germes pathogènes des boues d'épuration (Soudi, 2007)	11
Tableau 10 : Charge en micro-organismes pathogènes dans les boues d'épuration	12
Tableau 11 : Différenciation entre oligo-éléments et éléments toxiques	13
Tableau 12 : Valeurs limites des éléments traces métalliques selon la norme NF U 044-041	13
Tableau 13 : Sources des ETM concentrées dans les boues d'épuration dans les boues.....	14
Tableau 14 : Fourchettes de variation des éléments traces métalliques en g/t de matière sèches (Adler, 2001)	14
Tableau 15 : Techniques de traitement par stabilisation	16
Tableau 16 : Techniques de traitement par épaissement.....	16
Tableau 17 : Techniques de traitement par déshydratation.....	17
Tableau 18 : Techniques de traitement des boues par co-incinération	19
Tableau 19 : Mode de co-incinération des boues selon leur siccité.....	19
Tableau 20 : Taux de minéralisation d'azote selon le type de boues (ADEME, 2001).....	20
Tableau 21 : Composition et teneurs en éléments nutritifs dans les boues d'épuration (ANRED, 1988)	21
Tableau 22 : Température et durée d'exposition nécessaires à la destruction des pathogènes (Noble et Roberts, 2003 ; Lucero-Ramirez, 2000 ; Golueke, 1991 ; Déportes, 1995	26
Tableau 23 : Atouts et limites des principales techniques de compostage des boues d'épuration.	28
Tableau 24 : Avantages et inconvénients du compostage des boues d'épuration.....	29

Tableau 25 : Coûts internes	30
Tableau 26 : Coûts relatifs à la mise en place de la technologie de compostage des boues en Tunisie (Rapport final du plan d'action pour la gestion des boues d'épuration, ONAS-KFW, 2006).....	31
Tableau 27 : Périodes marquantes de la gestion des boues d'épuration en Tunisie.....	33
Tableau 28 : Solutions de gestion des boues d'épuration proposées par le plan d'action de gestion de boues d'épuration en Tunisie (ONAS-KFW, 2006)	35
Tableau 29 : STEP visitées et procédés de traitement des eaux usées utilisés.....	42
Tableau 30 : STEP dont la gestion est déléguée à des concessionnaires et régies.....	43
Tableau 31 : Caractéristiques des boues échantillonnées.....	51
Tableau 32 : Quantités de boues calculées dans les différentes STEP visitées.....	53
Tableau 33 : Grands groupes de boues selon le rapport C/N (Bachelier, 1983).....	55
Tableau 34 : Résultats de la siccité des échantillons de boues.....	60
Tableau 35 : pH et CE des différents échantillons de boues	61
Tableau 36 : Teneurs en C, N, C/C et MO des différentes boues	62
Tableau 37 : Moyennes des teneurs d'éléments majeurs des boues.	64
Tableau 38 : Teneurs moyennes en MgO, K ₂ O et P des boues marocaines (Assobhei et Mountadar, 2006).....	65
Tableau 39 : Résultats d'analyses de boues résiduaires (Igoud, 2001).....	66
Tableau 40 : Comparaison des teneurs en nutriments de différents fertilisants (EAWAG)	66
Tableau 41 : Classes attribuées aux éléments fertilisants	66
Tableau 42 : Notations attribuées aux différentes boues.....	67
Tableau 43 : Teneurs en ETM des boues d'épuration.....	69
Tableau 44 : Valeurs limites réglementaires en ETM et moyennes enregistrées dans les différentes boues	69
Tableau 45 : Caractéristiques des sols.....	73
Tableau 46 : Résultats de minéralisation d'azote pour les boues d'épuration	74
Tableau 47 : Teneurs en C et N total de l'eucalyptus	76
Tableau 48 : Teneurs moyennes en C et N total des boues prélevées des différentes STEPs .	76
Tableau 49 : C/N du compost final	77

Liste des figures

Figure 1 : Types de boues d'épuration	5
Figure 2 : Prévisions de production des eaux usées au Maroc (CSE, 1999).....	7
Figure 3 : Option de gestion des boues d'épuration.....	15
Figure 4 : Lit de séchage des boues résiduaires de la STEP de Bouregreg.....	22
Figure 5 : Séchage de boues d'épuration en lits plantés en roseaux	23
Figure 6 : Principe de Compostage (Soudi, 2001)	24
Figure 7 : Courbe de compostage (Thèse de F. Francou, 2003)	25
Figure 8 : Méthode de gestion des boues d'épuration en Allemagne (Synthèse des données présentées dans le rapport final du plan d'action pour la gestion des boues des STEP en Tunisie par Ghariani F., Soudi B., Baumgart H-C., Hoffman SS., Bolle F-W, ONAS-KFW 2006).....	32
Figure 9 : Filières rattachées aux trois voies de gestion des boues résiduaires en Tunisie (Synthèse issue du Rapport final, plan d'action de gestion des boues d'épuration, par	35
Figure 10 : Projection de la production des boues au Maroc (T/an)	38
Figure 11 : Projection de la production des boues au Maroc selon le procédé de traitement des eaux usées (Source : Soudi, Benosmane, Gredigk-Hoffman, 2006).....	39
Figure 12 : Situation géographique des 9 STEPs étudiées.....	44
Figure 13 : Appareil de mesure de C et N totaux.....	56
Figure 14 : Attaque par acide perchlorique.....	57
Figure 15 : Mesure des éléments majeurs et éléments traces métalliques par attaque totale...	58
Figure 16 : Richesse en éléments fertilisants des différentes boues d'épuration.....	68
Figure 17 : Comparaison entre les teneurs moyennes des boues sèches et les valeurs limites réglementaires de la Tunisie.....	70
Figure 18 : Comparaison entre les teneurs moyennes des boues sèches et les valeurs limites réglementaires de l'Union Européenne	70
Figure 19 : Electrode à ammonium.....	74
Figure 20 : Evolution du nombre des œufs d'Ascaris et de l'humidité des boues d'épuration lors du traitement des boues en lit de séchage.	77

Introduction générale

La gestion des déchets est un secteur qui revêt une grande importance et constitue une préoccupation majeure des collectivités locales, ceci est motivé par le danger que peuvent générer les déchets, tous types confondus, à court, moyen et long terme si ils ne trouvent pas un débouché ou une destination économiquement faisable et environnementalement durable et sans nuisances.

La promulgation de nouvelles lois et textes réglementant le secteur des déchets au Maroc, est la conséquence directe de cette prise de conscience et cette volonté du gouvernement marocain d'agir face à l'augmentation exponentielle des quantités des déchets.

Les boues résiduelles, sous-produits issus des traitements des eaux usées, font partie de ces déchets qui nécessitent une mise en place d'un plan de leur gestion, puisque leur production est en perpétuelle évolution, surtout avec la vision du Plan National de l'Assainissement Liquide et d'Épuration des Eaux Usées (PNA), qui prévoit à l'échelle de 2015 la mise en place de 260 stations d'épuration des eaux usées.

Ces prévisions fixées par le PNA, ont été ajustées à la croissance démographique, le développement de l'urbanisation, de l'industrialisation et l'évolution des modes de consommation.

Ces développements socio-économiques nécessitent l'utilisation de grandes quantités d'eau, induisant l'évolution en quantité et en qualité des rejets des eaux usées, requérant ainsi leur traitement avant leur rejet dans le milieu récepteur.

Les eaux usées rejetées par les populations urbaines et rurales comprennent plusieurs types de substances complexes parfois, dangereuses d'autres fois.

En effet les rejets domestiques qui étaient, des décennies auparavant, simples dans leur composition, se sont enrichis de produits plus complexes avec l'évolution du niveau de vie de la population, les réseaux d'assainissement, quant à eux, recueillent des rejets industriels, commerciaux ou artisanaux aux caractéristiques très diverses et les eaux de pluie, lessivent des surfaces croissantes de bitume et de toitures, se chargeant de produits minéraux et organiques, augmentant ainsi le flux polluant à traiter, surtout lorsqu'il s'agit d'un réseau unitaire.

Actuellement au Maroc, il n'existe pas encore de stratégie de gestion des boues d'épuration. Ceci peut s'expliquer par le fait que le rythme d'assainissement liquide était assez lent, ce qui ne peut pas générer des quantités appréciables de boues. En outre, l'essentiel de boues actuellement au Maroc se trouve dans les bassins de traitement de seaux usées.

Mais avec l'avènement du plan national d'assainissement liquide, il est nécessaire de mettre en place un plan de gestion des boues d'épuration.

Ne trouvant une destination réglementée lorsqu'elles sont évacuées, les boues sont essentiellement séchées et déposées à proximité des stations d'épuration ou dans les décharges publiques (cas de la STEP de Drarga) ou dans certains cas épandus au sol (cas de la STEP de Skhirat).

Sinon les boues restent dans les bassins de traitement des eaux usées.

La gestion des boues au Maroc nécessitera en premier lieu leur caractérisation, afin de mieux choisir leurs destinations finales et en second lieu un mécanisme de coordination entre l'office national de l'eau potable (ONEP), régies, concessionnaires et les communes urbaines et rurales doit être mis en place.

La nature et la composition des boues résiduaires varient d'une station d'épuration à l'autre, il est donc nécessaire de procéder à une caractérisation physico-chimique de chaque boue à part, afin de pouvoir traiter chaque cas indépendamment de l'autre.

Le présent travail s'insère dans cette vision globale de gestion des boues des stations d'épuration des eaux usées, puisqu'il a pour objectif :

- ▶ La caractérisation physico-chimique de boues des stations d'épuration des eaux usées représentatives, pour avoir une idée sur la composition en différents éléments chimiques.
- ▶ Quantification des boues des différentes stations d'épuration étudiées ainsi que la production à l'échelle nationale.
- ▶ Filières de traitement et valorisation des boues adaptées au contexte du Maroc.

Revue Bibliographique

Introduction

Les boues résiduelles des stations d'épuration des eaux usées constituent actuellement une problématique économique et environnementale à l'échelle nationale.

Les craintes quant à leurs destinations finales ne cessent d'augmenter dans les milieux scientifiques et professionnels au Maroc, se traduisant par des études et symposiums récents, traduisant ainsi le souci de la communauté scientifique et la prise de conscience des professionnels du secteur de l'obligation de mettre en place un plan de gestion de ces boues d'épuration.

Dans ce contexte, la caractérisation physico-chimique des boues d'épuration est une étape indispensable, qui permet d'évaluer leur qualité et mieux choisir leurs débouchés ou destinations finales.

Le recyclage des boues d'épuration via une valorisation agricole ; comme le compostage est une solution optimale pour les conditions pédo-climatiques du Maroc ; d'une part le compost des boues permet d'hygiéniser les boues surtout des germes pathogènes et d'autre part, il permet un apport de la matière organique au sol et d'autres éléments fertilisants disponibles aux plantes.

La caractérisation physico-chimique permet aussi de contrôler les teneurs en éléments traces métalliques après apport des boues au sol.

I. Interrelation eaux usées et boues résiduelles

1. Origine et définition des boues résiduelles

Le traitement des eaux usées génère suite aux prétraitements (première phase de traitement des eaux au sein d'une station d'épuration) trois types de sous-produits :

- ▶ Détritus grossiers
- ▶ Sables et argiles
- ▶ Huiles et graisses

Toutefois, le traitement des eaux usées génère en plus de ces sous-produits, des boues résiduelles, qui ont été définies de différentes façons, on optera ici pour la définition donnée par OTV (1998) : « Les boues sont l'ensemble de ce qui reste des traitements des eaux usées résiduelles ; qui est constitué de matières très liquides et boueuses. On appelle communément boues d'épuration les sédiments résiduelles issus du traitement des eaux usées »

Les boues d'épurations sont donc les principaux déchets produits par une station d'épuration, ces sédiments résiduelles sont constitués de bactéries mortes et de matière organiques minéralisée.

Les boues sont tout ce qui se dépose après chaque étape de traitement des eaux usées, elles rassemblent donc toutes les matières contenues auparavant dans les effluents traités.

2. Types de boues résiduaires

Les boues issues directement d'une station d'épuration des eaux usées, sans avoir subi de traitement, peuvent être divisées en trois grands types (ADEME 2001 et OTV 1997).

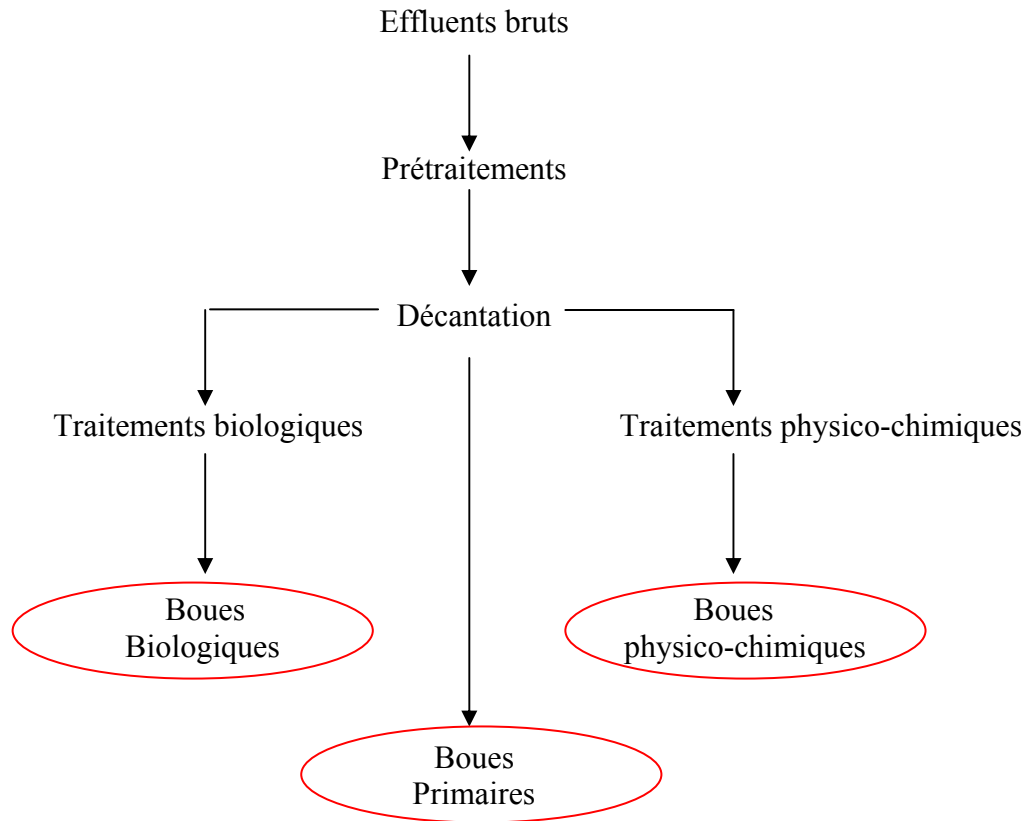


Figure 1 : Types de boues d'épuration

Ces boues subiront ensuite différents traitements, en fonction de leur destination finale choisie et de leur nature et origine.

3. Types de traitements d'eaux résiduaires

Le traitement des eaux usées a pour but la dépollution des effluents bruts produits par les ménages, les industriels et les opérateurs commerciaux avant leur rejet dans le milieu naturel. Il a pour intérêt l'élimination de la pollution contenue dans les eaux usées, qui pourrait nuire aux milieux aquatiques récepteurs.

Le principal type de filière de traitement des eaux usées est les traitements biologiques : qui se base sur l'activité des micro-organismes, qui dépolluent les eaux usées, en éliminant, par biodégradation, la matière organique contenue dans ces eaux, surtout les composés carbonés tels que les sucres.

Ces micro-organismes sont surtout des bactéries qui sont soit libres ou fixées, en fonction du traitement en question (Tableau 1).

Tableau 1 : Types de procédés de traitement des eaux usées.

Traitement	Culture bactérienne	Description
Lagunage	Libre	Les cultures bactériennes ont pour support des végétaux, qui épurent les effluents en se nourrissant sur la matière organique contenue dans les effluents bruts. L'épuration se fait par l'écoulement gravitaire des eaux entre les végétaux et algues mis en place dans les bassins de traitement. C'est une filière extensive qui nécessite de grandes surfaces pour l'installation de lagunes ou bassins de traitement.
Boues activées	Libre	Le support des cultures bactériennes, responsables de l'épuration des eaux usées, est les polluants organiques, qui constituent ensemble une boue, d'où l'appellation « boues activées ». L'épuration des effluents bruts est basée sur la dégradation aérobie des composés carbonés, azotés ou phosphoriques. La particularité de ce type de traitement, est qu'il y a un apport continu d'air pour l'aération et l'agitation des effluents.
Lits bactériens	Fixée	La nature du matériau des lits bactériens, qui est poreuse fait que les cultures bactériennes s'y développent l'utilisant donc comme support. Les effluents traversent donc ces pores, et alimentent les bactéries par la matière organique qu'elles contiennent.
Infiltration-Percolation	Fixée	Ce traitement a pour support les filtres à sable à biomasse fixées. L'eau usée passe à travers ces filtres, qui l'épurent et la débarrassent de ses matières en suspension et la matière organique y contenue.

4. Traitements d'eaux usées au Maroc

Le Maroc a fourni des efforts considérables quant à l'équipement du territoire national, avec la construction des barrages, l'installation de grands projets d'irrigation et l'accès de la population urbaine à l'eau potable.

Cependant, l'utilisation non raisonnée des ressources en eau de surface et souterraines dans différents secteurs, surtout agricole, a épuisé les stocks hydriques du pays, laissant les responsables se demander sur des solutions appropriée pour faire face à ce grand problème.

C'est ainsi que la préoccupation des pouvoirs publics s'est articulée sur différents programmes et plans de gestion de l'eau pour affronter la problématique du manque d'eau, surtout dans les années à venir (Tableau 2).

Tableau 2 : Différents types de plans et programmes en vigueur au Maroc.
(Débat national sur l'eau Décembre 2006)

Plan et Programmes de gestion	Réflexion/Mission
Plan National d'Aménagement des Bassins Versants	Ayant pour but la protection des terres contre l'érosion, en amont des barrages.
Gouvernance des eaux souterraines	La durabilité de ces ressources est mise en question pour leur baisse qui atteint 2m par an, et la pollution que connaissent les nappes phréatiques.
Economie de l'eau en irrigation	Mesures incitatives pour l'encouragement d l'utilisation des techniques d'irrigation localisées.
Plan National d'Assainissement Liquide	Le niveau de pollution des eaux a atteint des niveaux alarmants, induisant une dégradation de la qualité des ressources en eau, dont le coût est estimé à 4,3 milliard de dirhams/an. Ce plan vise l'augmentation du raccordement des populations aux réseaux d'assainissement à 80% et l'abattement de la pollution.

Le Maroc produit annuellement 600 millions de m³ des eaux usées, avec un taux d'épuration de 8% seulement.

Cette production des eaux usées va en augmentant d'année en année, c'est le résultat auquel a conclu le conseil supérieur de l'eau et du climat, qui prévoit une production de 900 millions m³ d'eaux usées à l'horizon 2020 (Figure 2)

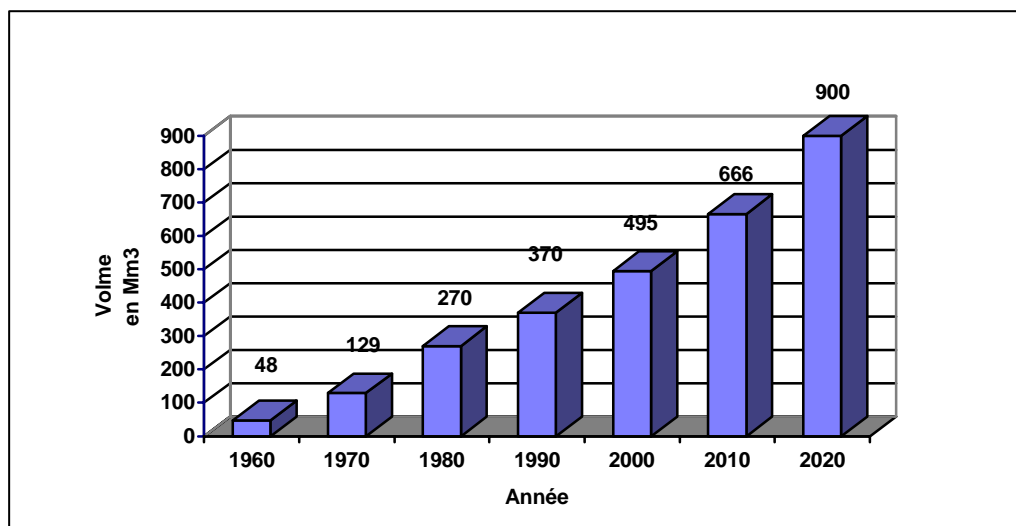


Figure 2 : Prévisions de production des eaux usées au Maroc (CSE, 1999)

Selon les différentes enquêtes réalisées lors des visites effectuées aux STEP dans le cadre du présent travail, les STEP ne sont pas toutes fonctionnelles pour les raisons suivantes :

- ▶ Une mauvaise gestion des effluents bruts à l'entrée à la station,
- ▶ Etude incomplète du projet d'installation des stations d'épuration
- ▶ Non coordination entre les différents intervenants dans la gestion des STEP

- ▶ Coûts élevés d'électricité pour les STEP nécessitant un apport d'énergie
- ▶ Manque ou coûts élevés d'entretien des composantes de chaque type de filière

Le lagunage naturel est le procédé de traitement le plus répandu au Maroc.

Pour ce qui est des stations d'épuration des eaux usées, « un contrat programme ONEP a été réalisé par l'Office, présentant son programme de mise en place de nouvelles STEP durant la période 2006-2009. (Tableau 3).

Tableau 3 : STEP régies par l'ONEP. (ONEP, 2006)

Nombre de STEP	Etat de fonctionnement	Population raccordée
50	En étude	1.775.000 hab.
26	En réalisation	1.080.000 hab.
21	En exploitation	845.000 hab.

5. Qualité des eaux usées du Maroc

Une étude a été faite pour le compte de l'ONEP en 1998, ayant pour but la détermination de la qualité des eaux usées, en estimant les teneurs en DBO₅, DCO et les matières en suspension sur la base de la taille des villes, afin de conclure à une moyenne nationale, pouvant ainsi donner une idée précise de la qualité des eaux usées. (Tableau 4)

Tableau 4 : Classification des eaux usées au Maroc (ONEP-GTZ, 1998)

Paramètres	Petits centres (moins de 20.000 habitants)	Centre moyens (entre 20.000 et 100.000 habitants)	Grandes villes (plus de 100.000 habitants)	Moyenne nationale
DBO ₅ (mg/l)	400	350	300	350
DCO (mg/l)	1000	950	850	900
MES (mg/l)	500	400	300	400

6. Contexte réglementaire des boues résiduaires au Maroc

La problématique des boues résiduaires issues des traitements d'épuration des eaux usées est très récente au Maroc, puisque le secteur d'assainissement liquide est bien nouveau, et le nombre actuel des stations d'épuration des eaux usées ne dépasse pas les 76 STEP (ONEP, 2006), ne posant donc pas encore problème de gestion des boues.

De ce fait les lois en relation avec le secteur d'environnement n'incluent pas une réglementation sur les boues.

Selon la littérature, les boues résiduaires ont toujours été considérées comme des déchets, même si durant ces dernières années, on leur a donné une autre appellation : biosolides, pour qu'elles soient mieux vues et acceptées par les populations des différents pays intéressés par la problématiques des boues.

En faisant une revue des lois marocaines, on retrouve que les boues résiduairees sont présentes et citées dans le catalogue marocain des déchets.

En effet, en application des dispositions des articles 29 et 83 de la loi n° 28-00, relative à la gestion des déchets et à leur élimination, un projet de décret portant classification des déchets et fixant la liste des déchets dangereux a été réalisé, ayant pour objet d'inventorier et de classer toutes les catégories des déchets dans un catalogue dénommé « catalogue marocain des déchets ».

Selon le présent catalogue, les boues résiduairees appartiennent aux « déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel. », codés 19.

Suivant l'ordre hiérarchique, les boues résiduairees appartiennent à la rubrique codée 19 08, dite 'déchets provenant d'installations de traitement des eaux usées non spécifiés ailleurs'.

C'est ainsi qu'on retrouve les « *boues provenant du traitement des eaux usées urbaines* », sur le CMD codés 19 08 05, précédés par les déchets de dégrillage et ceux de dessablage

Les boues résiduairees commencent à poser problème au niveau national, surtout que le programme national de l'assainissement liquide compte la réalisation de 260 stations d'épuration des eaux usées à l'horizon 2015 avec l'abattement de la pollution de 60% (ONEP, 2006).

II. Production, Méthodes de quantification et Caractéristiques des boues d'épuration

1. Production des boues par type de traitement

Tout traitement des eaux usées génère des boues résiduairees, qui doivent faire partie de toute étude de projet de mise en place d'une station d'épuration.

Les deux filières sont indissociables, et chaque STEP devra concilier entre l'objectif de traitement des eaux usées et la destination finale des boues générées par ces traitements.

En fonction des techniques utilisées, chaque procédé de traitement génère des quantités différentes de boues résiduairees (Tableau 5)

Tableau 5 : Production de boues à partir de différents procédés de traitement des eaux usées (GLS, 2002)

Procédé de traitement	Quantité de boues (g/hab/j)
Décantation primaire (DC)	40 à 60
DC + Digestion anaérobie	25 à 40
DC + Lits bactériens	65 à 75
Boues activées libres	30 à 50

La production des boues est plus faible avec les procédés à biomasse fixée et les traitements anaérobies.

D'après une étude qui a été faite récemment au Maroc (Assobhei et Mountadar 2006), on retient que les productions de boues générées par le lagunage naturel et les boues activées sont respectivement de 100 à 150 l boues/hab/an et 400 l boues/hab/an.

En France, la quantité de matières sèches moyenne produite a été estimée à 50g/l.

Aux Etats-Unis, la production de matières sèches diffère d'un Etat à l'autre, se situant ainsi dans une fourchette allant de 5 à 50% (Cornell Institute of wastes management).

Les quantités produites de boues d'épuration varient essentiellement en fonction de :

- ▶ Type de traitement
- ▶ Type des effluents bruts
- ▶ Type de réseau de collecte

Production de boues de quelques pays

Les pays industrialisés connaissent une importante production de boues résiduares, du fait qu'ils disposent d'un grand nombre de STEP, en plus de la disposition de chaque unité industrielle de sa propre station d'épuration. (Tableau 6)

Tableau 6 : Production de boues de quelques pays du monde (ADEME, Cornell Institute of wastes management et ONAS, 2006)

Pays	Production de boues
France	9.5Mt/an
l'Europe et l'Amérique du Nord	40 Mt/an.
Tunisie	800 000 m ³ /an
Dans le monde	>200Mt/an

2. Moyen d'estimation de la production des boues résiduares (GLS, 2002)

Lorsque la filière de traitement des effluents met en œuvre des procédés biologiques, l'évaluation de la production de MS en excès reste empirique du fait du grand nombre de facteurs entrant en jeu.

Le moins complexe des modèles mathématiques, réalisés dans le but d'estimer la production des boues résiduares, est représenté par l'équation suivante, qui donne, pour des rejets urbains, une première estimation de la quantité de MS produite :

$$P_{MS\text{ biologique}} = (MES + DBO_5) / 2$$

P_{MS} : Production de boues en kg MS/j

MES : Flux entrant de MES en kg MES/j

DBO_5 : Flux entrant de DBO_5 en kg DBO_5 /j

Cette méthode de calcul se base sur l'équivalent habitant, qui est la charge moyenne rejetée par habitant et par jour.

3. Caractéristiques des boues des stations d'épuration des eaux usées

Les boues résiduelles diffèrent d'une station d'épuration à l'autre, du fait de la diversité des effluents d'une région à l'autre.

La filiale de Veolia eau (OTV, 1998), a classé les boues d'épuration en 5 classes, selon les traitements d'eaux usées des quels elles sont issues (Tableau 7)

Tableau 7 : Classes de boues d'épuration (OTV, 1998)

Boue de classe A	Boue de classe B1	Boue de classe B2	Boue de classe C	Boue de classe D
<ul style="list-style-type: none"> • Boues primaires • Boues primaires physico-chimiques. • Boues de forte et très forte charge. 	<ul style="list-style-type: none"> • Boues biologiques en eau brute. 	<ul style="list-style-type: none"> • Boues biologiques en eau décantée 	<ul style="list-style-type: none"> • Boues mixtes de type A+B2 	Boues stabilisées biologiquement

Les principaux paramètres chimiques caractérisant chaque classe sont présentés dans le tableau 8

Tableau 8 : Paramètres chimiques des classes de boues d'épuration (OTV, 1998)

Paramètres	Classe A	Classe B1	Classe B2	Classe C	Classe D
MS (g/l)	12	9	7	10	30
pH	6	7	7	6,5	7
C/N	11,4	7	8,7	7,2	7,9
P	2	2	2	2	2
K	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Mg	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Ca	10	10	10	10	10
Fe	2	2	2	2	2

Il ressort de ces données que les boues d'épuration contiennent donc des éléments minéraux qui peuvent être bénéfiques aux cultures en cas d'épandage agricole.

Toutefois, les boues contiennent des pathogènes, des éléments traces métalliques et des composés traces organiques nocifs à la santé humaine et à l'environnement.

3.1 Composition en pathogènes

Les eaux usées contiennent des germes pathogènes, qui sont transmis aux boues résiduelles après leur épuration. Ces micro-organismes, de différents types, peuvent être nocifs à la santé humaine, mais aussi aux végétaux en cas d'épandage agricole. (Tableau 9)

Tableau 9 : Germes pathogènes des boues d'épuration (Souidi, 2007)

Type d'organisme	Pathogène
Bactérie	Salmonelle Mycobactérium Shigella Esherichia Coli Leptospires
Virus	Enterovirus

	Adénovirus Virus hépatique
Protozoaire	Toxoplasme Girardia
Nématodes ou helminthes	Ascaris Toxocara
Cestodes	Ténia

Les craintes relatives au risque microbien que peuvent avoir les boues résiduaires dans le cas de leur valorisation agricole, sont présentes dans les milieux scientifiques (McKay, J. 2003)
Les pathogènes sont nombreux dans les boues mais, pour la majorité, leur survie est assez faible. Cependant des éléments parasitaires présentent une résistance élevée dans les boues (INRA France 2004).

Les quantités des différents micro-organismes pathogènes dans les boues varient en fonction (ADEME) :

- ▶ Nature des effluents bruts
- ▶ Taille de l'agglomération
- ▶ Etat sanitaire de la population raccordée au réseau d'assainissement
- ▶ Traitements effectués sur les eaux usées et sur les boues.

Les pathogènes, présents dans les boues résiduaires, à haut risque sont essentiellement (Hébert, 2005) :

- ▶ Œufs d'helminthes : vers parasites ayant obligatoirement besoin d'un hôte pour leur reproduction.
- ▶ Virus entériques
- ▶ Protozoaires
- ▶ Bactéries

Une publication de la charge des boues résiduaires en ces éléments pathogènes en France (Tableau 10)

Tableau 10 : Charge en micro-organismes pathogènes dans les boues d'épuration (ADEME 1994 et CSHPF 1998)

Œufs d'helminthes	Boues primaires Boues semi-déshydratées	10^3 - 10^4 /kg 10^1 - 10^3 /kg
Kystes de protozoaires <i>Giardia</i>	Boues primaires Boues déshydratées	$7.7 \cdot 10^4$ - $3 \cdot 10^6$ /kg $7 \cdot 10^1$ - 10^2 /kg
Entérovirus	Boues primaires Boues activées	nd- 10^3 NPPU C/10g nd-270 NPPU C/10g
Bactéries <i>Salmonella</i>	Boues primaires	10^2 - 10^3 /g
<i>Coliformes fécaux</i>	Boues primaires Boues digérées	10^7 - 10^8 /g 10^2 - 10^3 /g

nd : non détecté

NPPU C : nombre le plus probable d'unités cytopathiques

Différents traitements permettent d'éliminer complètement ou une grande partie les pathogènes existant dans les boues d'épuration.

Parmi ces traitements il ya le compostage qui permet d'éliminer les germes pathogènes.

L'épandage agricole permet aussi la destruction des pathogènes, puisqu'ils sont exposés aux différentes variations du climat, ainsi qu'aux effets du sol telle que la compétition avec ses micro-organismes.

Toutefois quelques vers parasites comme les œufs d'ascaris peuvent prendre des formes résistantes dans le sol.

Les principales voies d'exposition des humains aux pathogènes relatives à l'épandage agricole sont par voie fécale/orale.

Des études ont été faites, mettant en évidence que des infections par les entérovirus par les voies respiratoires suite à l'épandage de boues d'épuration est possible (Payment, 1993 ; Brooks et coll., 2005)

Les bactéries peuvent aussi contaminer les voies respiratoires suite à un épandage de déjections animales ou humaines, impliquant une projection des aérosols dans l'air (USEPA, 1999 ; Foncier 2002).

3.2 Composition en éléments traces métalliques

Certains éléments mineurs peuvent être bénéfiques pour les végétaux, des fois même nécessaires à leur croissance, mais il existe des types de ces éléments traces qui peuvent être néfastes aux cultures et à leur environnement, même en faibles concentrations (Tableau 11)

Tableau 11 : Différenciation entre oligo-éléments et éléments toxiques

Oligo-éléments	Eléments toxiques
Cuivre	Cadmium
Zinc	Chrome
Manganèse, Fer	Nickel
Bore	Plomb
Molybdène	Mercure

Les teneurs limites en ETM ont été fixées par la norme AFNOR NF U 044-041 (Tableau 12)

Tableau 12 : Valeurs limites des éléments traces métalliques selon la norme NF U 044-041

Eléments traces métalliques	Valeurs limites (mg/kg de MS)
Cadmium	20
Chrome	1000
Cuivre	1000
Mercure	10
Nickel	200
Plomb	800
Zinc	3000

Les teneurs en éléments traces sont très variables pour les raisons suivantes :

- L'activité industrielle par son intensité et sa nature
- La corrosion des conduites d'eau
- Le ruissellement des eaux de toitures et des rues
- Les activités commerciale et artisanale

Les boues concentrent entre 70 et 90% des quantités d'ETM des eaux usées entrantes dans la station d'épuration. Les ETM des boues proviennent de sources ponctuelles d'origine industrielle (Tableau 13)

Tableau 13 : Sources des ETM concentrées dans les boues d'épuration dans les boues

ETM	Source
Cd, Pb	» Retombées atmosphériques
Cu, Pb	» Réseau d'eau potable
Pb, Zn	» Activités des particules » Ruissellement sur les chaussées et les toitures

Dans le cas d'apport de boues chargées en ETM, surtout en Cd et Zn, elles peuvent migrer facilement et très vite aux couches sous-jacentes.

L'accumulation des boues dans les bassins de traitement des eaux usées induit la perte de la matière organique par décomposition ayant pour effet l'accumulation des éléments traces métalliques dans les boues (Perron et Hébert, 2007)

L'apport des boues d'épuration au niveau du sol en cas de valorisation agricole par épandage, induit une augmentation des réserves en nutriments du sol, mais en même une accumulation excessive des éléments traces métalliques (Adler, 2001)

Toutefois les teneurs des boues en ETM sont relativement faibles comparées à d'autres apports agricoles (Tableau 14).

Tableau 14 : Fourchettes de variation des éléments traces métalliques en g/t de matière sèches (Adler, 2001)

	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
<i>Boues d'épuration</i>	0.7-8	30-110	170-500	0,7-6	20-60	55-220	500-1400
<i>Engrais azotés</i>	0-10	6-10	5-10	0-1	1-10	0,5-10	2-10
<i>Engrais phosphatés</i>	9-100	90-1500	10-60	0-0,2	5-70	0,5-40	50-600
<i>Engrais potassiques</i>	0,1-2	0,1-15	0,1-10	0,2-2	0,1-3	5-15	1-15
<i>Fumiers de bovins</i>	0,3-1,5	5-60	5-40	0,1-0,6	6-40	5-90	75-500

3.3 Composition en composés traces organiques

Les eaux usées entrant aux stations d'épuration des eaux usées proviennent de différentes sources :

- ▶ Les ménages
- ▶ Les eaux de pluie
- ▶ Les réseaux d'acheminement des eaux usées

De ce fait, les eaux usées sont chargées en pesticides, détergents, hydrocarbures et d'autres dérivés chimiques, qui se retrouvent après leur épuration accumulés dans les boues résiduaire.

Ces composés organiques, après épandage agricole direct des boues, sont néfastes aux micro-organismes vivant dans le sol.

Deux principaux composés sont les plus néfastes à la vie des micro-organismes dans le sol :

- ▶ HPA : hydrocarbures polycycliques aromatiques produits de la combustion des carburants
- ▶ PCB : polychlorobiphényles, contenus dans les pesticides.

Pour le cas du Maroc, il n'y a pas encore une réglementation qui régit les boues, de ce fait le danger de leur utilisation directe après extraction des bassins de traitement des eaux usées, par les agriculteurs qui ne doutent point de leur innocuité, est très grand.

En effet, au niveau de la STEP de Skhirate par exemple, les boues une fois curées sont déposées à proximité de la station. La région est agricole, la population riveraine utilise les boues, considérées comme « fumier » pour elle, pour amender leurs sols et apporter des nutriments à leurs cultures.

Suite à l'enquête réalisée sur place, la population riveraine ne se doute point de l'innocuité de ces boues, au contraire ils ont rapporté que l'utilisation des boues comme amendement organique est bien meilleure et donne des fruits plus gros et de couleur meilleure.

III. Options techniques de traitement, d'élimination et de valorisation

Après curage des boues des stations d'épuration des eaux usées, tout procédé de traitement confondu, elles peuvent se retrouver face à plusieurs (figure 3)

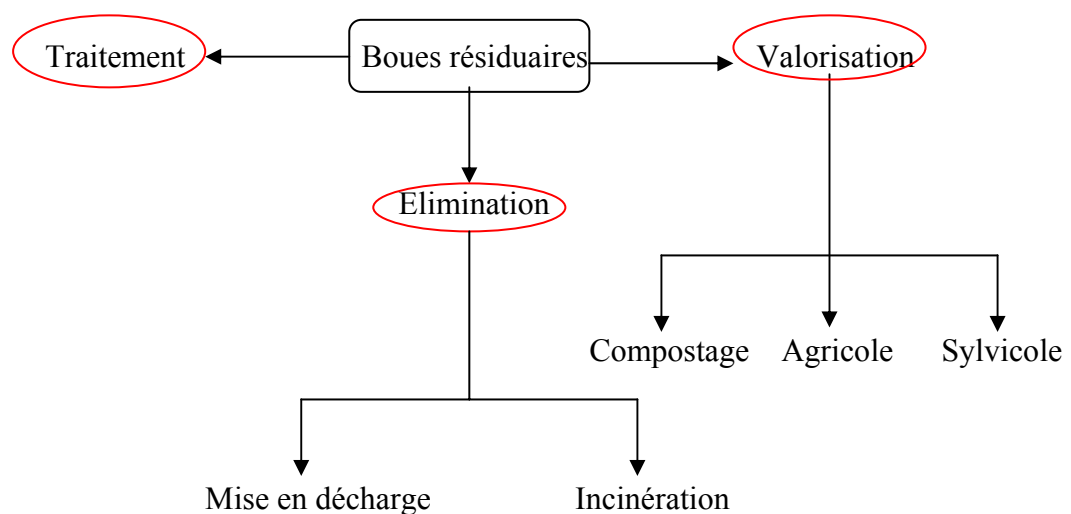


Figure 3 : Option de gestion des boues d'épuration

Le choix d'une option d'élimination ou de valorisation des boues résiduaires, est une finalité en elle-même.

En effet, les boues doivent d'abord subir un traitement donné afin de réduire leur volume, leur teneur en eau et leur fermentescibilité, conditions nécessaires à la réussite de l'option choisie.

1. Traitement des boues résiduaires

Après curage des bassins de traitement des eaux usées, les boues se présentent sous forme presque liquide, puisqu'elles contiennent 99% d'eau. Elles sont fermentescibles et riches en matière organique et minérale.

Avant d'opter pour un choix de leur destination finale, il est nécessaire de les conditionner selon un type de traitement donné.

1.1 Stabilisation

La grande fermentescibilité des boues les rend instables, et génère des nuisances olfactives, suite à la croissance et la multiplication de micro-organismes.

Ce traitement a donc pour but la diminution de la fermentation des boues, induisant ainsi leur stabilité.

Il existe différentes techniques de stabilisation (tableau 15)

Tableau 15 : Techniques de traitement par stabilisation

Biologique	Chimique	Thermique
Aérobic (compostage)	Chaulage	Pasteurisation
Anaérobic (méthanisation)	Stabilisation par nitrites	Séchage thermique

1.2 Réduction du volume

► Épaississement : ce type de traitement a pour principal but l'élimination de la plus grande partie d'eau contenue dans les boues, afin d'augmenter leurs teneurs en matière sèche. Il est surtout destiné aux boues primaires.

Il existe deux types de traitements par épaississement (tableau 16)

Tableau 16 : Techniques de traitement par épaississement

Statique	Dynamique
Simple décantation des boues sous l'action de la pesanteur	Réalisé sous l'action de forces mécaniques.

► Déshydratation : c'est une modification quasi-totale de l'état physique de la boue, puisque cette dernière passe de l'état liquide à un état pâteux ou solide.

Ce traitement permet d'assainir la boue et de concentrer les éléments nutritifs dans sa partie solide.

On retrouve trois principaux types de traitements par déshydratation (tableau 17).

Tableau 17 : Techniques de traitement par déshydratation

Centrifugation	Filtration	Lits de séchage
Séparation des deux phases liquide et solide sous l'effet de l'accélération de plusieurs milliers de grammes.	Compression et cisaillement des boues entre les bandes ou les plateaux du filtre utilisé.	Epaississement des boues sous l'effet d'évaporation (exposition au soleil) et celui de l'infiltration (couches de sable et graviers).

2. Elimination des boues résiduelles

2.1 Mise en décharge

Au niveau de la station d'épuration des eaux usées de la commune de Drarga, les boues résiduelles sont mises dans la décharge à proximité de la STEP.

Toutefois, c'est une mise en décharge mixte, avec les déchets ménagers, et souvent dans des décharges sauvages, ce qui augmente la nocivité à l'environnement et à la santé humaine.

Les déchets solides municipaux au Maroc sont caractérisés par deux importants paramètres (Soudi, 2007)

- ▶ Une fraction organique fermentescible importante enregistrant des taux entre 60 et 80%.
- ▶ Une haute teneur en humidité oscillant entre 60 et 75%.

Ce sont des teneurs très élevées qui prouvent que leur mise en décharge est une solution inappropriée.

La mise en décharge des boues d'épuration avec les autres types de déchets, empire donc la situation actuelle, puisque les boues sont aussi très riches en eau.

La mise en décharge est une option d'élimination non appréciée par les pays industrialisés. En Union Européenne, par exemple, la directive du 26 avril 1999, a planifié la réduction progressive de la mise en décharge des déchets municipaux biodégradables (dont les boues d'épuration) jusqu'en 2015.

La mise en décharge peut être de deux types :

- ▶ Mise en mono-décharge :

les boues sont très humides et renferment beaucoup de matières organiques et de sels minéraux, en plus des pathogènes et des éléments traces métalliques.

De ce fait, si le choix est opté pour l'élimination des boues par mise en décharge, il est préférable que ça soit une mono-décharge.

Il faut mettre en place une décharge conforme aux normes environnementales, en réalisant une bonne étanchéité, afin d'éviter la contamination des eaux superficielles et des nappes souterraines en cas de leur proximité du lieu de la mono-décharge.

En mettant le boues dans une décharge, la préservation de l'environnement de la station d'épuration et de la population riveraine, d'une part, est assurée et d'autre part, il y a production du gaz de méthane qui peut être recyclé pour produire de l'énergie.

► Mise en décharge mixte :

La réglementation marocaine, n'interdit pas la mise en décharge des boues d'épuration dans les décharges destinées aux déchets solides municipaux.

Leur dépôt dans ce type de décharge, complique la gestion des déchets solides municipaux.

Afin d'alléger un peu la situation, il est préférable de déshydrater les boues afin de réduire leur volume, évitant ainsi les nuisances olfactives et celles liées à l'environnement et la santé humaine.

En Tunisie, par exemple, l'ANGeD limite au maximum la mise en décharge mixte des boues et impose au minimum une siccité des boues de 30%. (Soudi, Communication personnelle).

2.2 Incinération

Cette option d'élimination a pour principal but la destruction de la matière organique (OTV, 1997).

L'aptitude des boues à être incinérées sont tributaires de deux caractéristiques des boues (ADEME) :

- Teneur en matière organique
- Teneur en matière sèche.

En effet, ces deux paramètres déterminent le pouvoir calorifique inférieur des boues d'épuration, qui est la quantité d'énergie que va dégager la combustion d'un kilo de déchets, en considérant toute l'eau évaporée. Il se définit en supposant que toute l'eau provenant de combustible, ou formée en cours de combustion, reste, au stade final, à l'état de vapeur (OTV, 1997).

Les boues sont soit incinérés tous seuls, co-incinérés avec les déchets ménagers (option le plus souvent choisie) ou co-incinérés en cimenterie.

► Mono incinération :

la technique le plus souvent utilisée est la mise des boues dans des fours à lits fluidisés.

La technique est bénéfique, sur le plan économique et financier, si le lieu de combustion est la station d'épuration même, par ce que sinon les frais de transport s'ajoutent à ceux de l'investissement et de fonctionnement de la technique, la rendant assez difficile à réaliser.

Cette technique est surtout utilisée quand la station dispose de très grandes quantités de boues, nécessitant la construction des fours.

► Co-incinération avec les déchets ménagers :

Les natures des deux types de déchets sont complètement différentes, il est donc nécessaire d'envisager une procédure d'alimentation des boues et des déchets dans le système thermique de combustion (tableau 18).

Tableau 18 : Techniques de traitement des boues par co-incinération

Mélange des deux déchets	Introduction de boues sous forme de poussière	Pulvérisation directe des boues
La boue doit avoir subi un traitement préalable de déshydratation ou de séchage (60 à 98% de siccité), puis mélangée aux déchets ménagers.	La boue est insufflée comme poussière sèche dans la chambre de combustion, ou dispersée sur la grille.	La boue à 25% de siccité est directement induite dans le four des déchets ménagers.

Les résidus d'incinération sont traités ou recyclés, comme c'est le cas en Allemagne, où le laitier de la grille est employé dans la construction des routes sous forme de graviers.

► Co-incinération en cimenterie :

La production du ciment nécessite un combustible, source d'énergie. Dans la plupart des cas c'est le charbon qui est utilisé.

Les pays industrialisés vont dans le sens de substituer le charbon par les boues d'épuration, puisque celles-ci sont dotées d'un pouvoir calorifique inférieur très important.

La technique de co-incinération avec les boues est d'autant plus intéressante lorsque

Les modes de co-incinération varient suivant la siccité de la boue. Le tableau 19 résume les modes de co-incinération des boues. (ADEME)

Tableau 19 : Mode de co-incinération des boues selon leur siccité

Types de boue	Siccité (%)	Mode de co-incinération
Liquide	6	Injection par pulvérisation à contre courant dans le four
Pâteuse	20 – 30	Injection par extrusion dans le four
Sèches	65 – 90	Injection directe dans le four.

3. Valorisation des boues résiduaires en agriculture

3.1 Epandage agricole

Les boues résiduaires accumulent dans leur partie solide de hautes teneurs de matière organique et de minéraux bénéfiques, et dans des cas, nécessaires à la croissance des végétaux.

La valorisation agricole est la solution adéquate et la plus conforme au principe du développement durable et la moins coûteuse pour les villes de taille moyenne (Suez lyonnaise des eaux, 2000).

L'épandage agricole des boues résiduaires, se voit l'option la plus intéressante sur le plan économique et environnemental pour éliminer ce sous-produit résiduaire (Andersen, 1999).

Au niveau du Maroc, l'épandage agricole n'est pas régi par des lois ou textes qui interdisent leur utilisation comme amendement organique aux sols. De ce fait, dans les stations d'épuration, surtout mécanisées, le curage des boues se fait de manière périodique, et leur dépôt se fait à proximité de la station, la population riveraine acquiert ces boues, qu'ils considèrent comme un amendement organique bénéfique ressemblant au fumier.

C'est le cas de la station d'épuration de Skhirate, où les boues sont prises de façon périodique par la population riveraine pour amender leurs cultures maraichères.

Afin de déterminer l'effet de l'application des boues sur des sols marocains, un essai sur un sol argilo-limoneux a été mené à Ouarzazate (Soudi et Jemali, 1999). Le travail a montré que le rendement en matière sèche de Ray Gras d'Italie a augmenté de manière significative suite aux applications des boues séchées. La teneur en matière organique du sol a également augmenté. Le taux de décomposition des boues des boues a été estimé à 60% en moyenne. Le taux apparent de minéralisation de l'azote a été évalué à 44%.

Pour évaluer la valeur agronomique des boues d'épuration, L'Office national de l'eau potable du Maroc (2005) a proposé les analyses (Annexe) qui devront être effectuées afin de déterminer cette valeur et identifier leurs teneurs en ETM

La diversité des composantes des boues d'épuration, font que leur valeur agronomique intègre aussi différentes valeurs.

► Valeur fertilisante :

Permet de couvrir une partie des besoins des cultures en différents éléments majeurs.

La valeur fertilisante azotée de boues apportées aux sols agricoles, se mesure par le taux de minéralisation annuel d'azote. Il est tributaire des types de boues (tableau 20)

Tableau 20 : Taux de minéralisation d'azote selon le type de boues (ADEME, 2001)

Type de boues	Liquides	Pâteuses	Sèches	Compostées
Taux de minéralisation d'azote pendant la 1 ^{ère} année (%)	40 à 60	30 à 35	25 à 35	10

Au Maroc, le taux de minéralisation moyen a été estimé à 60%.

On retrouve aussi la valeur fertilisante phosphatée des boues. En effet, le phosphore se trouve dans les boues, surtout sous forme minérale, étant plus disponible aux cultures en comparaison avec l'azote qui prend du temps pour se minéraliser.

La valeur potassique est moindre que les deux précédentes, on peut considérer que la potasse sera disponible seulement la première année qui suit l'épandage.

Le tableau 21 présente les différentes fourchettes de teneurs en N, P et K qui peuvent être contenues dans les boues d'épuration.

Tableau 21 : Composition et teneurs en éléments nutritifs dans les boues d'épuration (ANRED, 1988)

Elément nutritif	Forme	Teneur
Azote	N total	1 à 8%
Phosphore	P ₂ O ₅	2 à 7%
Potassium	K ₂ O	< 1%

► Valeur humique :

Cette valeur est représentée par le taux de matières organiques ne subissant pas de minéralisation.

La matière organique améliore la structure du sol ainsi que la stabilité des agrégats. Et pour les cultures, elle stimule la croissance des parties aériennes, leur développement et la nutrition minérale.

Du fait que les sols marocains sont connus pour leur faible teneur en matière organique, connaissent des processus de dégradation assez prononcés : salinisation, compaction, détérioration de la structure du sol, etc. (Soudi, 1999, 2001) l'apport des boues aux sols par épandage direct, est pleinement justifié.

3.2 Séchage

Le séchage permet la réduction du volume des boues d'épuration via l'élimination en grande partie l'eau par évaporation (ADEME). Le séchage peut être naturel, à travers les lits de séchage ou sur lits plantés.

3.2.1 Séchage naturel

Le séchage naturel ou solaire se pratique à l'air libre sur des boues liquides et combine évaporation et drainage de l'eau libre à travers une couche filtrante de sable et de graviers.

En effet, le lit de séchage comporte un massif drainant de sable et de gravier d'environ 30 centimètres d'épaisseur.

Le temps de séchage est très variable selon les conditions météorologiques, de quatre semaines à plusieurs mois en conditions défavorables.

Les boues séchées sont alors de 35% à 40% de siccité.

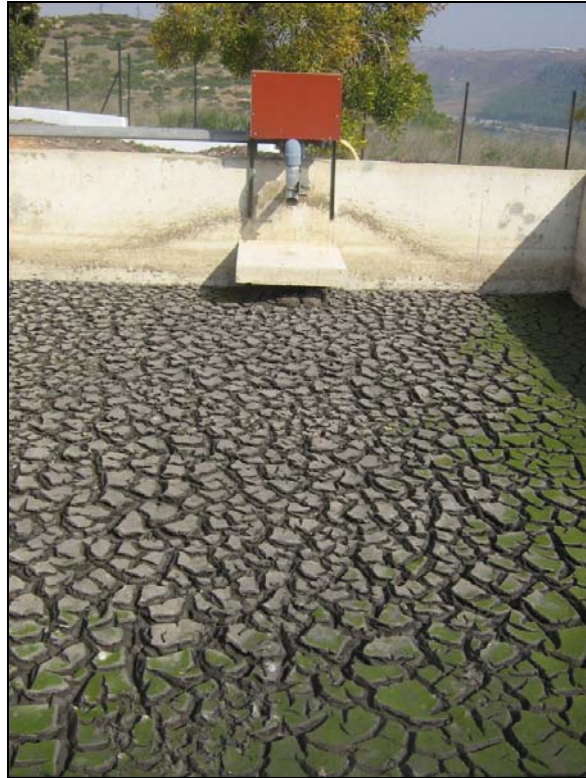


Figure 4 : Lit de séchage des boues résiduaire de la STEP de Bouregreg

3.2.2 Séchage en lits plantés

C'est une technique destinée essentiellement aux stations d'épuration ayant pour procédé de traitement les boues activées.

En effet, les boues renvoyées aux lits de séchage plantés en roseaux, sont prélevées directement dans le bassin d'aération.

Les roseaux plantés constituent un réseau drainant de l'eau contenue dans les boues d'épuration (figure 5). Leurs racines permettent de constituer une aire de bactéries tout autour, induisant la minéralisation progressive des boues d'épuration.

En effet, le développement optimal des roseaux est essentiel pour garantir un bon fonctionnement et le colmatage de la boue stockée.

Une croissance dense crée un important réseau de tiges, rhizomes et racines le long duquel s'écoule l'eau interstitielle provenant des apports réguliers de la boue fraîche.

Cette eau écoulée, collectée à la base du lit filtrant, grâce à un radier étanche, sous la couche drainante mise à l'air par des cheminées d'aération, est renvoyée en tête de la station d'épuration pour être traitée (figure 5)

La conception des systèmes est très différente en ce qui concerne le nombre de lits de séchage, qui semble être un facteur essentiel pour accroître la siccité finale des boues et faciliter la gestion programmée de l'extraction des boues séchées des lits plantés (Revue Ingénieries, 1999).

En effet, un système complet de déshydratation doit comporter au minimum quatre lits alimentés en alternance chaque semaine. Les installations les plus importantes peuvent

comporter six ou huit lits, ce qui augmente le temps de repos entre deux semaines d'alimentation.

Ce temps de repos est un facteur essentiel pour obtenir au final des taux de siccité élevés et une minéralisation aérobie des boues accumulées dans les lits pendant environ cinq ans de fonctionnement, avant de devoir procéder à la vidange d'un ou deux lits, tandis que les autres pourront encore être alimentés si le plan de gestion est bien adapté (fiche technique déshydratation de boues par lits de séchage plantés de roseaux, 2004)

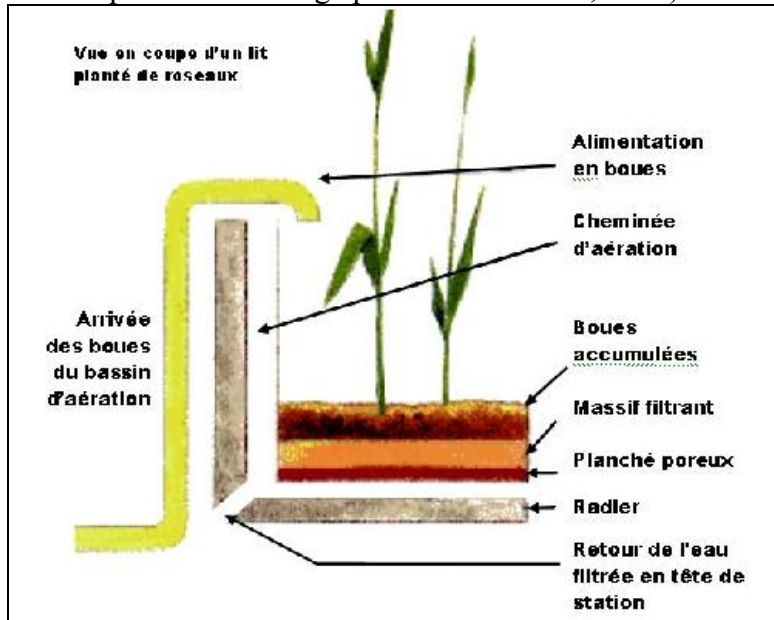


Figure 5 : Séchage de boues d'épuration en lits plantés en roseaux

3.3 Compostage

3.3.1 Définition

Le compostage est un processus naturel de «dégradation» ou de décomposition de la matière organique par les micro-organismes dans des conditions bien définies. Les matières premières organiques, telles que les résidus de culture, les déchets animaux, les restes alimentaires, certains déchets urbains et les déchets industriels appropriés, peuvent être appliqués aux sols en tant que fertilisant, une fois le processus de compostage terminé. (FAO, 2005).

Le compostage des boues est un processus de bioconversion ou fermentation aérobie des matières organiques fraîches en un produit organique stabilisé et riche en humus appelé « compost ».

3.3.2 Principe

Le compostage est une biodégradation de la matière organique, durant laquelle il y a réduction du volume, des tas de déchets organiques à compostier, de 50% par trois principaux mécanismes :

- ▶ Déperdition d'eau
- ▶ Production de chaleur par l'activité des micro-organismes
- ▶ Emission du dioxyde de carbone

Le principe et mécanismes qui se produisent lors du compostage des déchets organiques est présentés dans la figure 6 (Soudi, 2001).

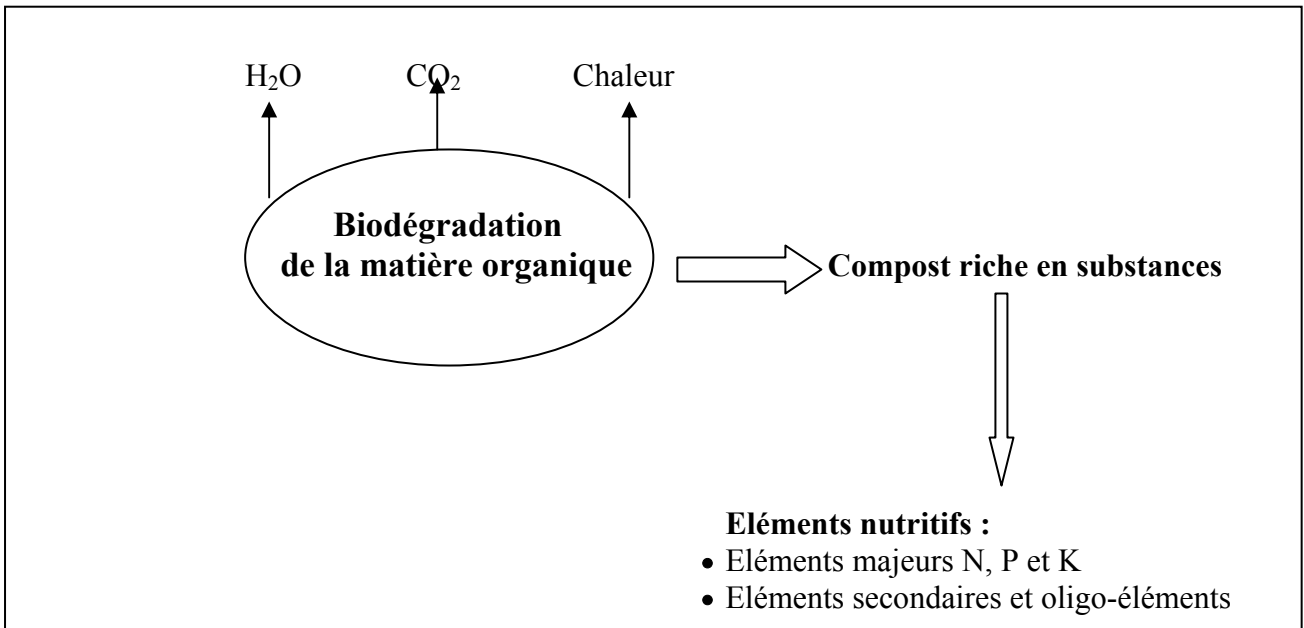


Figure 6 : Principe de Compostage (Soudi, 2001)

3.3.3 Processus et étapes du compostage

Les différentes communautés vivantes agissant sur le déroulement du compostage ne vivent pas dans les mêmes conditions de température et ne se nourrissent pas de la même façon ni des mêmes matières et substances qui se forment au fur et à mesure que le processus de compostage avance.

- La décomposition des parois cellulaires des déchets à composter est la première étape du compostage. Elle est effectuée par les bactéries, et est accompagnée par une élévation progressive de la température, qui est particulièrement importante au début du processus de compostage. L'énergie présente dans les matières organiques est transformée en chaleur.

C'est la **phase mésophile**.

- La digestion par les micro-organismes est plus rapide, et la température continue à s'élever jusqu'à arriver à son pic, détruisant ainsi les germes de maladies.

La réduction du volume des tas à composter commence à réduire, du fait de la transformation de la matière carbonée sous forme de CO_2 volatil, l'évaporation de l'eau et la perte de structure des matières constituant le tas à composter.

C'est la **phase thermophile**.

- La température redescend progressivement, et ce sont les champignons qui prennent la relève, colonisant ainsi le tas à composter.

C'est la **phase de refroidissement**.

- La température continue à baisser, l'activité microbienne continue à faible intensité s'accompagnant avec l'entrée des macro-organismes dans le processus de compostage, qui décomposent les matériaux dans leur tube digestif.

L'activité biologique durant cette phase est réduite à cause du faible niveau d'humidité, du taux d'oxygène inadéquat et du déséquilibre nutritionnel des micro-organismes.

C'est la *phase de maturation*.

Après la maturation, le compost est préparé pour la commercialisation. Les opérations de criblage et de broyage permettent d'augmenter la valeur commerciale du compost, mais aussi d'améliorer sa biodégradabilité, une fois incorporé au sol.

Les différentes phases du compostage sont présentées sur la figure 7.

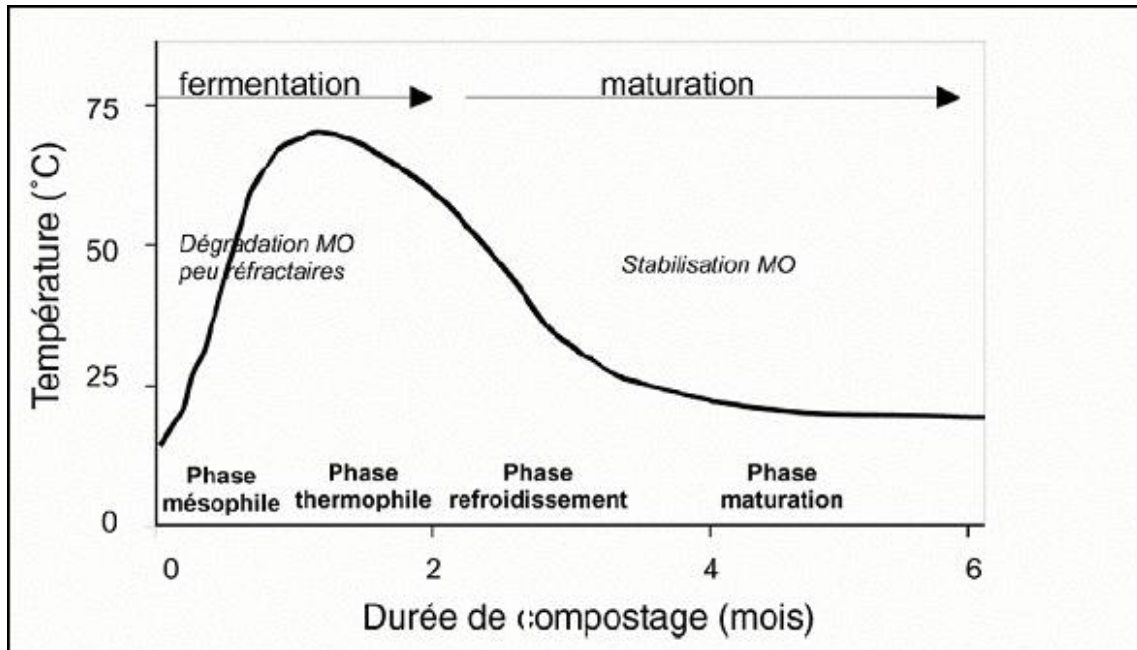


Figure 7 : Courbe de compostage (Thèse de F. Francou, 2003)

3.3.4 Caractéristiques des boues à composter

Les boues d'épuration sont difficiles à composter pour maintes raisons :

- ▶ Taux d'humidité élevé
- ▶ Absence de structuration
- ▶ Absence de porosité
- ▶ Haute compacité

Du fait que les boues d'épuration au Maroc appartiennent à une fourchette allant de 7 à 11%, l'agent structurant doit avoir un C/N assez élevé pour atteindre la C/N optimal pour réussir leur compostage (25 à 35%).

L'humidité du mélange doit aussi être entre 60 et 75%.

Toutefois le mélange des boues et celui de l'autre déchet à co-composter doit respecter un ration bien précis et bien étudié, et il doit être bien homogénéisé

3.3.5 Revue bibliographique des expériences internationales en matière de compostage

Les avantages du compostage des boues d'épuration sont essentiellement :

- ▶ Stabilisation
- ▶ Destruction des pathogènes
- ▶ Réduction du volume
- ▶ Elimination de l'humidité

La stabilisation est traduite par les changements qui sont induits dans la composition des boues d'épuration. En effet, l'activité biologique convertit les composantes putrescibles des boues en des formes, organiques et inorganiques, stables qui pourraient être appliquées au sol avec un minimum d'inquiétude, quant à son impact sur l'environnement.

L'activité microbienne durant le compostage aérobique génère des températures dépassant les 60°C, suffisantes pour détruire ou désactiver la plus grande part des pathogènes dans cette fourchette de températures, qui se maintient durant plusieurs jours (Charles. R et al. 1995)

Le tableau 22 indique le type de bactéries détruites en fonction de la température atteinte lors du procédé.

Tableau 22 : Température et durée d'exposition nécessaires à la destruction des pathogènes (Noble et Roberts, 2003 ; Lucero-Ramirez, 2000 ; Golueke, 1991 ; Déportes, 1995 Rapporté par Charnay. F, 2005)

Type de micro-organismes	Température et durée nécessaire à sa destruction
<i>Ascaris lombricoïdes</i>	4h à 60°C ou 1h à 65°C
<i>Salmonella spp</i>	15-20 min à 60°C ou 1h à 55°C
<i>Escherichia coli</i>	15-20 min à 60°C ou 1h à 55°C
<i>Taenia saginata</i>	5 min à 71°C
<i>Shigella spp</i>	1h à 55°C

Le compost des boues d'épuration contient de l'azote, le phosphore, le potassium et tous les nutriments essentiels à la croissance des plantes.

Plusieurs expériences et études ont été faites pour montrer l'importance du compost des boues d'épuration et son rôle majeur dans le recyclage des déchets d'une part, et sa capacité à améliorer la structure du sol auquel il est apporté.

Une expérience de co-compostage à partir de boues d'épuration primaires issues d'un traitement par stabilisation anaérobique, et de sciure de bois, en ajoutant trois doses croissantes de cette dernière ; 10%, 30% et 40% au mélange initial (Zorpas. A et Loizidon. M, 2007)

Les résultats de l'expérience ont montré que l'augmentation du taux de sciure de bois dans le mélange initial induit une augmentation des substances humiques dans le compost final.

Le compostage des boues d'épuration, a un effet aussi les différentes formes de matière organique y contenue. En effet, le co-compostage à partir de boues d'épuration et de la paille,

d'une longue durée induit une perte en carbone et une stabilisation de la matière organique ; deux processus qui pourraient avoir des effets opposés, à long terme, sur la réserve du carbone du sol. (Robin. P et al. 2007).

Dans le même contexte, un co-compostage de 9 tonnes de boues d'épuration et de paille, a induit l'augmentation de la masse des particules fines ($< 2\mu\text{m}$) et de la quantité du carbone de +37% et +43% respectivement (Robin. P et al. 2007).

3.3.6 Techniques de compostage et co-compostage des boues

3.3.6.1 Par aération naturelle

Les boues d'épuration, à l'état pâteux, et les déchets verts broyés sont mélangées puis mis en andains permettant une fermentation aérobie.

L'aération dans cette technique est passive, elle est facilitée par des retournements à l'aide d'un chargeur, dont la fréquence varie selon la température au cœur du tas à composter.

Le minimum des retournements est d'une fois par semaine pendant 2 mois, à adapter en fonction du climat local, l'essentiel est de maintenir pendant 10 jours au moins la température à 70°C pour hygiéniser le mélange, en détruisant les pathogènes y contenues.

Le retournement doit être systématiquement suivi d'un arrosage, éventuellement avec les jus s'écoulant des andains, s'il existe un dispositif le permettant.

Après l'achèvement de la fermentation active, qui dure 2 à 4 mois selon les déchets verts utilisés, le compost entre en maturation qui stabilise le produit, et dure six mois au minimum.

Le contrôle des paramètres peut être simplifié à l'extrême, en se limitant au suivi de la température et de l'humidité quotidiennement.

Cette technique ne demande pas beaucoup de coûts, puisqu'il n'y a pas une demande énorme d'apport d'énergie.

Toutefois, c'est une technique présente l'inconvénient de générer des odeurs.

3.3.6.2 Par aération forcée

Les andains de boues sont aérés par ventilation via une insufflation d'air à l'intérieur du tas. Grâce à cette aération forcée, la durée de fermentation aérobie se trouve réduite à 3 à 4 semaines.

C'est une technique qui permet de traiter de gros tonnages de boues, de réduire le volume d'eau du produit final et de contrôler les odeurs.

La durée de la phase de maturation, après criblage du compost, varie en fonction de la nature du co-produit et du climat local.

Cette technique de compostage des boues présente une très bonne adaptabilité aux variations de production et de caractéristiques des boues, ainsi qu'une faible sensibilité au climat.

Le coût moyen de cette technique est plus élevé par rapport à celle par aération passive, du fait qu'elle demande un apport d'énergie en continu.

Tableau 23 : Atouts et limites des principales techniques de compostage des boues d'épuration.

	Atouts	Limites
Tas statique aéré	<ul style="list-style-type: none"> • Mécaniquement simple • Requiert moins d'entretien • Facile à réaliser • Facilement adaptable aux changements de caractéristiques des boues et des agents structurants. • Moyennement dépendant des équipements mécaniques et d'énergie. • Coûts d'investissement assez bas 	<ul style="list-style-type: none"> • Libération d'odeurs putrides • Source de poussière • Hautement affecté par les changements climatiques • Nécessite de grandes surfaces <p>De grands volumes d'air traités pour le control d'odeurs</p>
Andains retournés	<ul style="list-style-type: none"> • Facilement adaptable • Relativement simple mécaniquement • Flexible • Facilement adaptable aux changements de caractéristiques des boues et des agents structurants • Très légèrement dépendant d'équipements mécaniques et d'énergie. • Coûts de capitaux bas 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite de grandes surfaces • Dégagement de mauvaises odeurs • Libération de grandes quantités de poussière et aérosols lors du retournement) • Hautement affecté par les changements climatiques

La technique de compostage la plus appropriée au contexte marocain est la technique d'andains périodiquement retournés (Souidi, 2007).

3.3.7 Avantages et inconvénients compostage des boues

Le compostage des boues résiduaires, comme toute autre technique de traitement, a ses atouts et ses limites. Le tableau 24 est une synthèse bibliographique, de différentes sources de la littérature, des avantages et inconvénients du compostage des boues.

Tableau 24 : Avantages et inconvénients du compostage des boues d'épuration.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ▶ Stabilisation et hygiénisation ▶ Stockage sans nuisances environnementales ▶ Réduction du volume initial des boues, d'environ 50% ▶ Apport de matière organique stable riche en humus ▶ Epanchage propre ▶ Odeur agréable ▶ Respect du cycle naturel par revalorisation agricole. 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Coût de traitement supplémentaire ▶ Risques d'émissions malodorantes si le processus est mal conduit. ▶ Exige un suivi précis et coûteux de la qualité du compost livré et des zones d'épandage

IV. Coûts du compostage des boues d'épuration

Le compostage, du fait de la proportion importante de matière organique dans les déchets, est considéré comme l'une des options les plus adaptées au Maroc (Soudi, 2007).

Nous avons donc opté pour la présentation des coûts de compostage des boues d'épuration, puisque c'est l'option la plus adaptée au contexte marocain.

Pour la mise en place de la technologie de compostage en andains à ciel ouvert, il faut prendre en considération des principes et éléments nécessaires à l'installation de ce type de projet (Soudi, 2007) :

Principes :

- Andains périodiquement retournés
- Contrôle de la température, de l'humidité et de l'aération
- Procédé simple

Critères de dimensionnement :

- Taille de l'unité à mettre en place
- Durée de fermentation et de maturation
- Taux moyen de réduction de la masse initiale
- Masse volumique des déchets
- Taille des andains
- Durée totale du processus (en fonction des saisons)

Aménagements et équipements

- Type de revêtement de la plateforme (argile compactée, asphalte à différentes épaisseurs etc.)
- Type d'aménagement du système de gestion des eaux (Lixiviats et eaux pluviales)
- Type de machines et d'équipements (avec ou sans équipements de broyage et de tamisage)

Opérations de contrôle de processus

- Temps de formation des andains
- Fréquence de retournement
- Mode de finition du produit

Comme toute étude de faisabilité technique d'un projet, il est nécessaire d'intégrer deux types de coûts :

1. Coûts internes

Les composantes des coûts sont présentés come suit Soudi, 2007) :

- Coût de construction : coût de terrain, préparation et aménagement du site, achat des équipements
- Coûts fixes annuels : amortissement, intérêt sur la valeur résiduelle des installations, réparation et maintenance, assurance.
- Coûts annuels de fonctionnement : coût de la main d'œuvre, du consommable, etc.

Ces coûts peuvent être répartis en deux grandes catégories (tableau 25)

Tableau 25 : Coûts internes

Coûts d'investissement	Coûts de fonctionnement et de maintenance
<ul style="list-style-type: none">• Coût de terrain• Equipement mécanique• Construction• Acier• Installation électrique• Main d'œuvre employée dans la phase d'installation	<ul style="list-style-type: none">• Main d'œuvre• Consommation d'électricité• Consommation de carburants• Adjuvants• Maintenance et pièces de rechange• Autres opérations

La totalité de ces coûts doit être rapportée à la quantité de matières solides ou matière sèche.

2. Coûts externes

L'étude de projet d'installation d'une unité de compostage doit inclure des coûts externes liés aux impacts négatifs, qui pourraient être nocifs à la santé humaine et à l'environnement.

3. Indicateurs de coûts relatifs à la mise en place de la technologie de compostage des boues déshydratées en Tunisie

Puisqu'il n'existe pas d'études ou analyses de coûts relatives à la mise en place de la technologie de compostage des boues d'épuration au Maroc, on a opté pour une étude faite récemment pour l'ONAS en 2006, du fait que la Tunisie a un contexte pédo-climatique et environnemental proche du Maroc (Tableau 26)

Tableau 26 : Coûts relatifs à la mise en place de la technologie de compostage des boues en Tunisie (Rapport final du plan d'action pour la gestion des boues d'épuration, ONAS-KFW, 2006)

Composantes de coûts	Coût en DT/t MS	Coût en DH/t MS
Epaississement additionnel par gravité dans réservoirs/silos	20 DT/t MS	133 DH/t MS
Déshydratation par centrifugeuses mobiles	120 DT/t MS	800 DH/t MS
Transport et autres frais sur un rayon de 20 km	25 DT/t MS	167 DH/t MS
Compostage	90 DT/t MS	600 DH/t MS
Transport et valorisation du compost	40 DT/t MS	267 DH/t MS
Total	295 DT/t MS	1997 DH/t MS

V. Expériences internationales en matière de gestion des boues d'épuration

La revue des expériences internationales en matière de gestion des boues des stations d'épuration des eaux usées, se voit nécessaire pour compléter notre travail, puisqu'elle nous permettra de déceler la vision des pays choisis en matière des destinations appropriées aux boues à court, moyen et long terme.

Nous avons choisis pour ce but, deux pays de deux différents continents et deux différents niveaux d'industrialisation :

- ▶ L'Allemagne
- ▶ La Tunisie

Pour l'Allemagne, nous avons décidé de présenter son expérience dans le présent travail, puisque c'est un pays industrialisé membre de l'Union Européenne, qui a de longues expériences dans le secteur de l'environnement et notamment dans en matière de gestion des boues résiduares.

Nous allons donc présenter une synthèse de leur mode de gestion des boues résiduares.

Le choix a été porté sur la Tunisie, puisque c'est un pays africain de contexte similaire au Maroc ; il est doté d'un climat semi-aride comme le Maroc, et c'est un pays qui a connu une évolution importante ces dernières années dans le secteur de l'environnement et notamment en matière d'assainissement solide et liquide.

Cette évolution s'est concrétisée par l'élaboration d'un « plan d'action pour la gestion des boues de stations d'épuration »

Nous allons présenter la vision de la Tunisie en matière de destinations finales des boues résiduares.

1. Expérience de l'Allemagne

1.1 Loi des déchets et gestion des boues

Les boues résiduelles sont considérées en Allemagne comme des déchets, elles sont soumises donc, comme tout autre déchet, à la loi relative au cycle de la matière et à la gestion des déchets.

Grâce à cette loi, l'Allemagne a pu faire face au problème crucial des boues des stations d'épuration des eaux usées.

Les tâches fondamentales de la gestion des boues en Allemagne, et les principales destinations de ces boues sont présentes dans la figure 8.

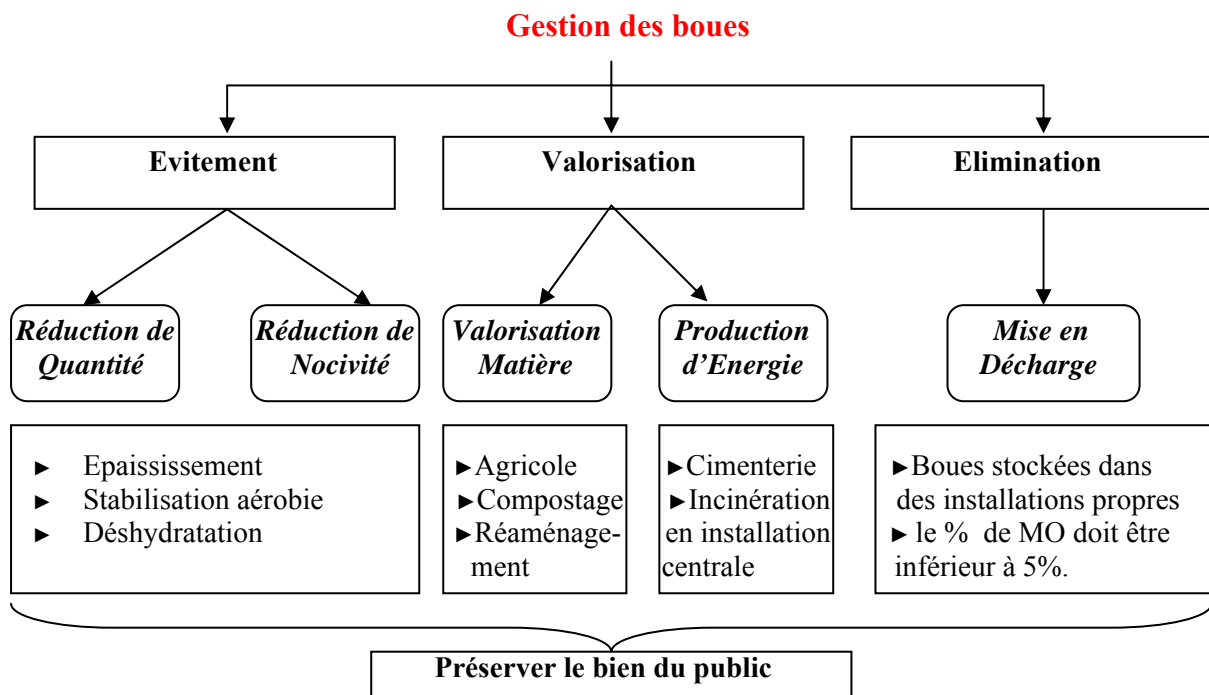


Figure 8 : Méthode de gestion des boues d'épuration en Allemagne (Synthèse des données présentées dans le rapport final du plan d'action pour la gestion des boues des STEP en Tunisie par Ghariani F., oudi B., Baumgart H-C., Hoffman SS., Bolle F-W, ONAS-KFW 2006)

1.2 Plan de gestion des boues

En plus de ces tâches, chaque exploitant de station d'épuration des eaux usées doit établir un plan de gestion de boues, devant être mis à jour tous les 5 ans.

Ce plan doit comprendre :

- ▶ Un bilan :
 - Nombre de techniques du procédé de traitement des eaux usées
 - Quantité des boues produites
 - Qualité des boues produites
- ▶ Une prévision des boues à éliminer dans l'avenir :

- Nombre d'installations
 - Quantité des boues
 - Qualité des boues
- ▶ Une description des voies de valorisation et d'élimination futures
 - ▶ Une évaluation de la sécurité d'élimination
 - ▶ Informations concernant les relations publiques

Le bilan doit aussi contenir les voies de valorisation et d'élimination des différents déchets issus des traitements des eaux usées.

2. Expérience de la Tunisie

2.1 Problématique

Comptant 78 stations d'épuration des eaux usées (ONAS, 2004), la Tunisie produit des quantités considérables de boues.

Deux grandes périodes ont marqué la gestion de ces boues, comme le montre le tableau 27.

Tableau 27 : Périodes marquantes de la gestion des boues d'épuration en Tunisie

1974-1998	>1998
<ul style="list-style-type: none"> ▶ Séchage des boues dans des lits de séchage. ▶ Valorisation en tant qu'amendement 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Suspension de la valorisation des boues.

La suspension de la valorisation des boues, est une décision qui avait pour but la mise en place d'un cadre réglementaire. Malheureusement la situation de blocage d'élimination des boues des STEP, n'a pas duré une courte durée, comme il a été prévu, mais s'est étalé sur sept ans.

La problématique en matière de gestion des boues en Tunisie, est donc l'élimination durable des quantités de boues qui restent après séchage. En effet s'il n'y a pas de voies d'élimination disponibles, ce là entraverait le vidange et le curage des boues, d'où leur stockage au niveau des stations d'épuration des eaux usées.

L'accumulation de ces boues est à double tranchant :

- ▶ Un risque énorme sur l'environnement,
- ▶ Des conséquences négatives sur le plan économique.

Tous ces facteurs ont poussé la République Tunisienne, à mettre en place un Plan d'Action pour la Gestion des Boues de Stations d'Épuration, pour remédier à ce fléau, dont l'édition a été faite en août 2006.

2.2 Plan d'action de gestion des boues de stations d'épuration

Ce plan a pour objectif de définir les solutions acceptables sur les plans technique, environnemental et économique permettant une gestion durable des boues des STEP.

En effet ce plan a deux principaux buts :

- ▶ Garantie d'une élimination durable des boues résiduelles
- ▶ Production de boues appropriées à l'élimination

Les expériences internationales de la gestion des boues des STEP, donneront une vue d'ensemble de la pratiques dans d'autres pays.

Dans le cadre de ce plan, de nouvelles solutions de valorisation de ces boues seront envisagées en tenant compte du climat de la Tunisie :

- ▶ Déshydratation naturelle des boues
- ▶ Compostage et co-compostage avec des déchets organiques.

Mais le développement d'une option ou d'une autre est tributaire de deux facteurs très importants :

- ▶ Gestion durable des boues
- ▶ Frais acceptables par le public

2.3 Voies et options de gestion des boues

Dans le plan d'action pour la gestion des boues des STEP, on retrouve que l'étude a opté pour trois voies :

- ▶ Valorisation matière
- ▶ Valorisation thermique / Incinération
- ▶ Mise en décharge

A ces trois options, ont été rattachées trois filières (Figure 9).

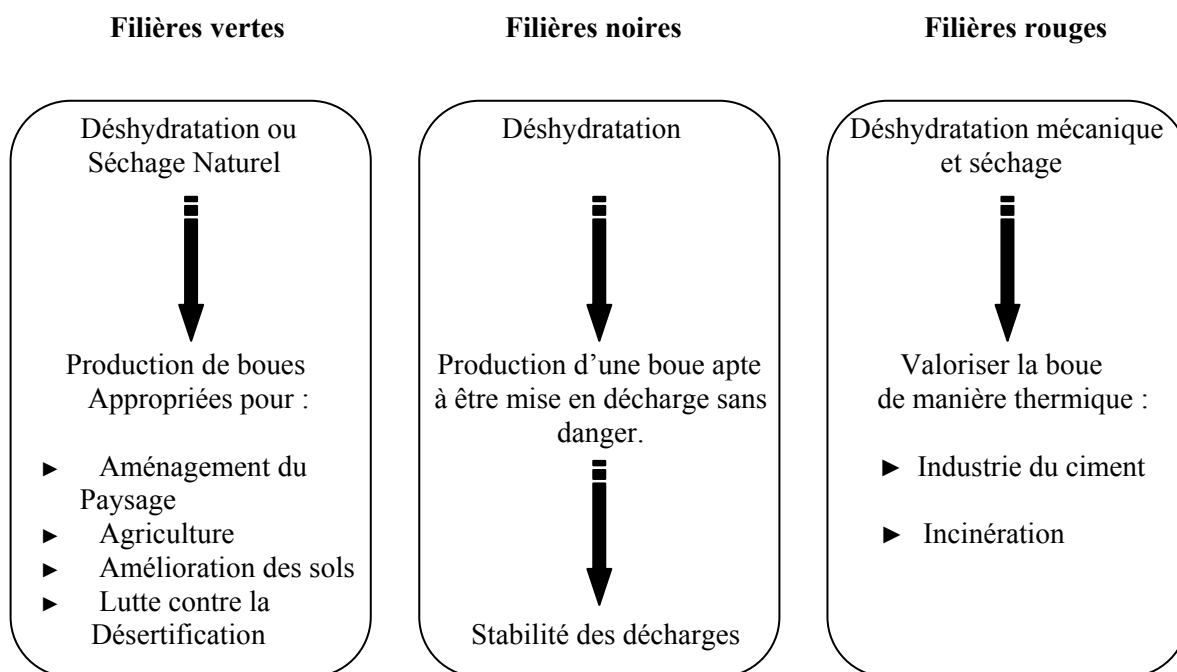


Figure 9 : Filières rattachées aux trois voies de gestion des boues résiduairees en Tunisie (Synthèse issue du Rapport final, plan d'action de gestion des boues d'épuration, par Ghariani F., oudi B., Baumgart H-C., Hoffman SS., Bolle F-W ONAS-KFW, 2006)

2.4 Récapitulation

En somme, ce plan d'action présente des solutions à court, moyen et long termes spécifiques à chaque station d'épuration des eaux usées (Tableau 28)

Tableau 28 : Solutions de gestion des boues d'épuration proposées par le plan d'action de gestion de boues d'épuration en Tunisie (ONAS-KFW, 2006)

Solutions à court terme	Solution à moyen et long terme
<ul style="list-style-type: none"> ▶ Production de boues appropriées pour la mise en décharge ▶ Amélioration des procédés de déshydratation ▶ Considérer la mono-décharge comme solution transitoire, non polluante ▶ Poursuivre les autres filières d'élimination et de valorisation en parallèle. 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Etablir des voies d'élimination propres avec différents partenaires notamment les cimenteries ▶ Filières vertes ▶ Promouvoir la centrifugation qui donne de hauts rendements en déshydratation ▶ Réaliser des essais pilotes de compostage.

Selon la loi tunisienne sur les déchets, un plan de gestion des boues doit être établi. Toutefois ce présent plan d'action à la gestion des boues des stations d'épuration des eaux usées ne peut pas être considéré comme un plan de gestion au sens de cette loi.

Ce plan d'action décrit des actions nécessaires pour la garantie de l'élimination des boues d'épuration en Tunisie, et résume donc les solutions techniques possibles ainsi que les conditions qu'elles nécessitent pour pouvoir être suivies.

VI. Etude de cas du Maroc : 9 stations d'épuration des eaux usées

1. Problématique de gestion des boues résiduaires

Le renforcement de l'infrastructure au Maroc s'accompagne de la mise en place de plusieurs stations d'épuration qui produisent d'une part une eau épurée, propre, saine et prête à être rejetée dans le milieu récepteur ou à être réutilisée, mais d'autre part de grandes quantités de boues, considérées comme des déchets par les uns qu'il faut éliminer, des biosolides à valeur agronomique importante qu'il faut valoriser par les autres.

Après curage des boues des bassins de traitement, qui se fait de façon périodique, elles sont dans la plupart des cas accumulées et mises en tas à côté ou à l'entrée de la STEP ou stockées sur place, causant ainsi des nuisances à la population et à l'environnement.

D'autres stations d'épuration mettent les boues produites en décharge avec les déchets ménagers et autres types de déchets, puisqu'il n'y a pas de lois ou réglementation régissant la gestion des boues.

Les responsables du secteur environnemental et de l'assainissement, n'ont pas encore intégré les boues dans leurs programmes et plans de gestion. Cependant toute étude concernant la mise en place d'une STEP, doit inévitablement inclure la filière « boues », puisqu'une efficacité d'une station d'épuration se mesure par sa capacité à épurer les effluents, et son pouvoir assainissant et préservant de son environnement.

La production de boues sans plan de leur gestion, ou études sur leur destination finale est une nuisance directe à la santé humaine et à l'environnement.

Les boues générées doivent être bien caractérisées, et une estimation de leurs volumes produits doit être réalisée avec précision pour mieux pouvoir les gérer.

Une meilleure gestion des boues, insinue au choix de leur destination finale qui nécessite une réflexion suivant une approche intégrée.

En effet, il faut intégrer deux grands types de facteurs (OTV, 1997)

- ▶ Facteurs se rapportant à la STEP :
 - Taille et capacité de la station d'épuration des eaux usées.
 - Nature des eaux usées (effluents bruts).
 - Niveau et type de traitement sur la filière eau
 - Caractérisation des boues et des volumes produits.

- ▶ Facteurs se rapportant aux aspects législatifs et réglementaires :
 - Exigences réglementaires
 - Contexte local
 - Coûts d'investissement et de fonctionnement

Le choix de la destination finale des boues change d'une région à l'autre, c'est pour cela que le plan de gestion des boues doit être élaboré à une échelle locale, adapté aux conditions de chaque région à part, afin d'éviter l'effet nocif qu'ont les boues sur l'Homme et son environnement.

D'après les enquêtes menées auprès des responsables des différentes stations d'épuration des eaux usées au Maroc, sujettes de ce travail de fin d'études, ont montré que la filière boues s'arrête au niveau du traitement des boues par séchage (lits de séchage), sans réflexion à leur devenir ultérieurement.

Dans quelques stations (Skhirat et Drarga), les boues mises en tas sont reprises par les populations riveraines, agriculteurs en général, et apportées à leur sols. Ceci est bien dangereux, puisque ces boues n'ont pas été assainies, apportant donc des germes et des éléments traces métalliques nocifs à la santé humaine.

2. Quantification des boues résiduelles au Maroc

La relation qui servira pour cette estimation quantitative des quantités de boues est :

$$P \text{ (t/an)} = \text{Ratio (MS/hab/j)} * \text{Pop} * \text{TE} * \text{TR}$$

Ratio

Afin d'estimer la quantité de boues d'épuration produites au Maroc, on se basera sur un ratio moyen qui est de 40g MS/hab/j (Assobhei, Mountadar 2006).

En effet les ratios moyens respectifs de production de matière sèche du lagunage naturel et des boues activées sont respectivement 20 g MS/hab/j et de 50 g MS/hab/j.

Le ratio de 40g MS/hab/j est un compromis entre les deux ratios cités ci-dessus.

Population

La population au Maroc recensée en 2004 est de 29,9 millions d'habitants, dans son rapport national, l'HCP mentionne sur l'accroissement entre 1994 et 2004 s'est fait avec un taux de 1,4%.

D'après le MATEE, la moyenne du taux d'accroissement annuel, sur laquelle leur calcul est fait est de 1,5% (donc 7,5% tous les 5 ans).

Le tableau présente les prévisions de populations selon les données ci-dessus.

Année	2005	2010	2015
Population (millions)	29,9	32,1	34,4

Taux d'épuration

Avec un potentiel d'eaux usées produites à l'échelle nationale, de 600 millions de m³ par an, le taux d'épuration actuel de ces eaux, d'origine urbaine ou industrielle, reste très faible puisqu'il est de 8% seulement (48 millions de m³ par an). (ONEP, 2006).

Selon le PNAL, le taux d'épuration prévoit une augmentation afin d'abattre le taux de pollution.

Année	2005	2010	2015
Taux d'épuration (%)	8	35	60

Taux de raccordement

Le taux de raccordement aux réseaux d'assainissement est de 70%. Selon la même source (PNAL), les prévisions de raccordement aux réseaux d'assainissement à l'horizon de 2015 est de 80%/ nous allons donc considérer que pour l'année 2010, il est de 75%.

Année	2005	2010	2015
Taux de raccordement (%)	70	75	80

La production totale des boues en tonnes par an est présentée sur la figure 10

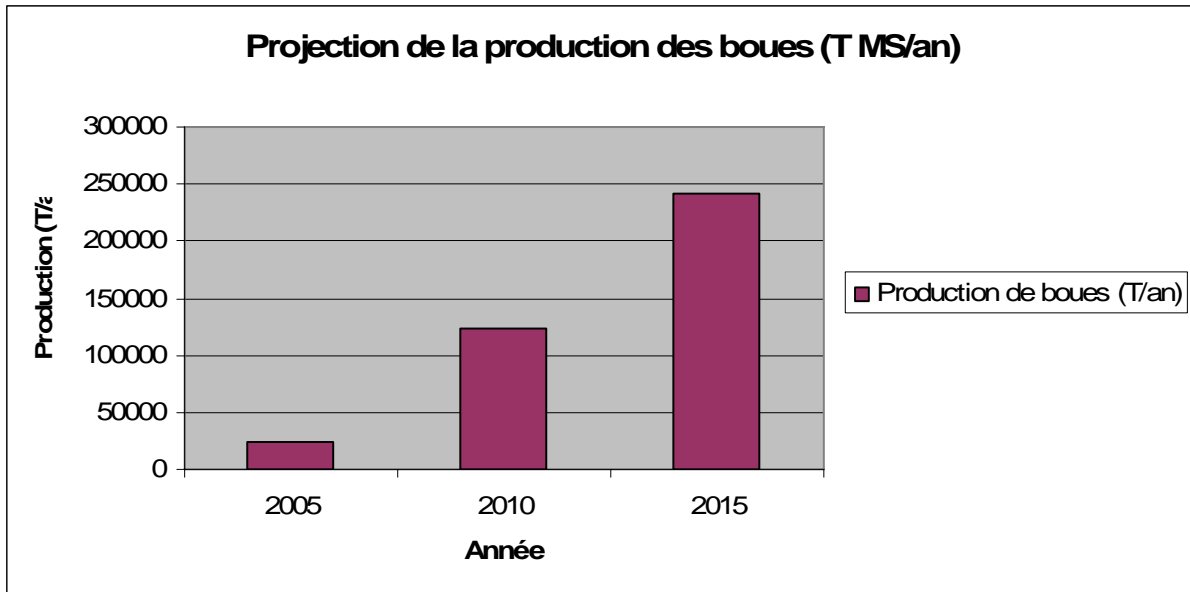


Figure 10 : Projection de la production des boues au Maroc (T/an)

La quantité des boues connaîtra donc une importante augmentation durant les années à venir, surtout que le programme national d'assainissement liquide prévoit l'abattement de la pollution des eaux usées de 60% à l'horizon de 2015.

La production d'eaux propres prêtes à être réutilisées, recyclées ou rejetées dans le milieu récepteur doit donc être accompagnée par une prise en charge des boues résiduelles issues de leur traitement, par la mise en place d'un plan de leur gestion.

3. Autre méthode de quantification des boues résiduelles au Maroc

Une étude a été portée sur l'estimation des quantités de boues d'épuration qui seront produites, au Maroc, durant les années à venir, ayant pris pour base de calcul les mêmes paramètres que la méthode ci-dessus, sauf pour le ratio de production de matières sèches ; ici le ratio utilisé est basé sur la pollution rejetée par habitat selon le procédé de traitement des eaux usées.

C'est ainsi que le procédé de traitement a été la principale base de calcul du ratio de matières sèches.

Le choix a été porté uniquement sur le lagunage naturel et les boues activées, puisqu'ils sont les procédés dominants au Maroc, supposés représenter respectivement 80% et 20% de l'ensemble des filières de traitement des eaux usées.

Les prévisions pour les années à venir ont été calculées sur la base d'une projection géométrique.
Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 11.

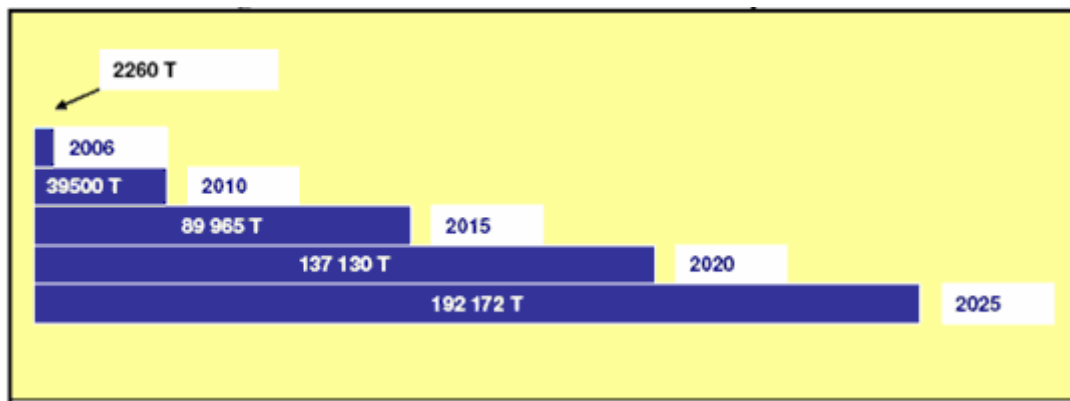


Figure 11 : Projection de la production des boues au Maroc selon le procédé de traitement des eaux usées (Source : Soudi, Benosmane, Gredigk-Hoffman, 2006)

Les résultats obtenus selon les méthodes sont différents, montrant que le choix de paramètres de calcul de production est relatif et doit être judicieusement fait.

Matériels et Méthodes

1. Description et objectifs du travail

Le but principal du présent travail est de connaître la composition des boues des stations d'épuration de 9 STEP du Maroc, afin de les caractériser et assurer ainsi leur mode de gestion. Les caractéristiques des boues résiduaires varient d'une station d'épuration des eaux usées à une autre, puisqu'elles dépendent de la nature des effluents et du type de procédé de traitement des eaux usées.

On procédera à la caractérisation des échantillons de boues résiduaires prélevées en déterminant les paramètres suivants :

- ▶ pH
- ▶ Siccité,
- ▶ pourcentage de matière organique,
- ▶ Composition en éléments fertilisants.

Quant aux éléments traces métalliques, leur caractérisation nécessite la minéralisation des échantillons de boues.

Cette opération permet de solubiliser au mieux l'élément métallique que l'on désire doser, puisque les éléments traces métalliques contenus dans les boues de stations d'épuration peuvent se trouver dans la partie soluble ou dans la partie solide de la boue, sous forme organique ou sous forme minérale. Il faudra donc mettre les échantillons de boues en solution pour les analyser.

2. Méthodologie

Afin d'atteindre nos objectifs, on procédera par :

- ▶ Choix, prélèvement et échantillonnage des boues
- ▶ Développement de méthodes d'analyse
- ▶ Caractérisation chimique
- ▶ Détermination des teneurs en éléments traces métalliques par minéralisation des boues

3. Plan du travail

Avant de décrire les échantillons prélevés et les procédés d'analyses utilisés pour leur caractérisation, on présentera tout d'abord les enquêtes réalisées dans les différentes STEP, avant de se pencher sur leur description, et enfin une description des procédés d'analyses des échantillons de boues.

Les analyses ayant été faites à l'Université Catholique de Louvain La Neuve en Belgique

I. Identification des 9 stations d'épuration des eaux usées

Afin de caractériser les boues résiduaire des STEP marocaines, l'identification des stations d'épuration des eaux usées, en premier lieu à travers une collecte de données, d'où ces boues sont issues, se voit nécessaire.

Pour cela, nous avons procédé à une enquête au niveau des stations d'épuration retenues, afin de bien connaître les renseignements que l'on se propose de collecter et l'utilisation qui sera faite de ces renseignements.

Cette enquête a pour objectif, de collecter les informations sur les boues résiduaire, issues des traitements d'eaux usées, échantillonnées de différentes stations d'épuration sises au Maroc, et qui seront soumises à des analyses au laboratoire.

Cette caractérisation nous permettra de réaliser une classification préliminaire des boues résiduaire produites au niveau national, puisque les STEP ont été choisies de telle façon à ce qu'elles soient réparties au niveau des différentes régions du Maroc.

Le premier critère de choix de l'unité statistique (STEP), est la région, puisque la nature et la composition d'effluents bruts est d'une grande variabilité d'une région à l'autre, influençant ainsi les caractéristiques physico-chimiques des boues résiduaire.

Le deuxième critère de choix des stations d'épuration enquêtés, est le procédé de traitement des eaux usées (lagunage, lits bactériens,...), qui agit fortement sur la nature des boues résiduaire produites, du fait que chaque traitement est différent de l'autre.

La liste des stations d'épuration enquêtées, dont la gestion revient à l'Office National de l'Eau Potable (ONEP), a été réalisée en concertation avec Monsieur MAHI Mustafa de l'ONEP de Rabat.

Pour les stations d'épuration enquêtes gérées par l'ONEP, c'est l'office lui-même qui a été notre premier interlocuteur.

La liste de ces stations visitées est présentée dans le tableau 29, avec les procédés de traitement des eaux usées y sont effectué.

Tableau 29 : STEP visitées et procédés de traitement des eaux usées utilisés

Stations d'épuration gérées par l'ONEP	Coordonnées géographiques	Procédé de traitement
Taourirt	2°53'11, 989 W 34°25'56, 873 N	Lagunage naturel (A+F+M)
Tiznit	9°40'50, 44 W 29°40'51, 938 N	Lagunage naturel (A+F+M)
Mriret	5°35'4, 835 W 33°9'52, 66 N	Lagunage naturel (A+F)
Ain Taoujdate	5°15'19, 994 W 33°57'9, 155 N	Lagunage naturel (A+F)
Bouregreg	6°51'51, 244 W 33°57'52, 095 N	Boues activées
Tafoghalte	2°23'32, 291 W 34°48'42, 12 N	Lits bactériens

Drarga	9°31'44, 331 W 30°27'22, 855 N	Infiltration-Percolation
--------	-----------------------------------	--------------------------

A : Bassin Anaérobie, F : Bassin facultatif, M : Bassin de Maturation

L'intervention de l'ONEP nous a été très bénéfique, du fait que notre interlocuteur au niveau des différentes stations d'épuration a toujours été le chef de la STEP, en question en personne, qui nous a accompagnés dans chacune des visites effectuées dans les présentes stations d'épuration.

Pour les deux stations restantes, leur gestion est déléguée à des organismes particuliers (Tableau 30).

Tableau 30 : STEP dont la gestion est déléguée à des concessionnaires et régies

Stations d'épuration gérées par des particuliers	Coordonnées géographiques	Procédé de traitement des eaux usées	Procédé de traitement des boues résiduelles	Gestionnaire
Skhirat	7°4'47, 635 W 33°51'2, 75 N	Décantation+Lagunage naturel (F+M)	Digestion+lits de séchage	REDAL
Grand Agadir	9°33'49, 613 W 30°24'29, 368N	Infiltration percolation	Infiltration-Percolation	RAMSA

La situation géographique des différentes stations visitées est représentée sur une carte du Maroc sur la figure 12.

On a classé les informations et renseignements que l'on s'est proposés de collecter, selon trois principaux axes se rapportant à (Cf. modèle fiche d'enquête en annexe) :

- Description de la station d'épuration
- La filière de traitement des eaux usées.
- La production des boues résiduelles et leur destination

Dans les nouvelles STEP, récemment installées, la partie du questionnaire se rapportant aux boues résiduelles a été plus ou moins pauvre, puisqu'en principe, l'extraction des boues des bassins de traitement se fait, en général, à partir de la 5^{ème} année du début de l'exploitation de la station d'épuration

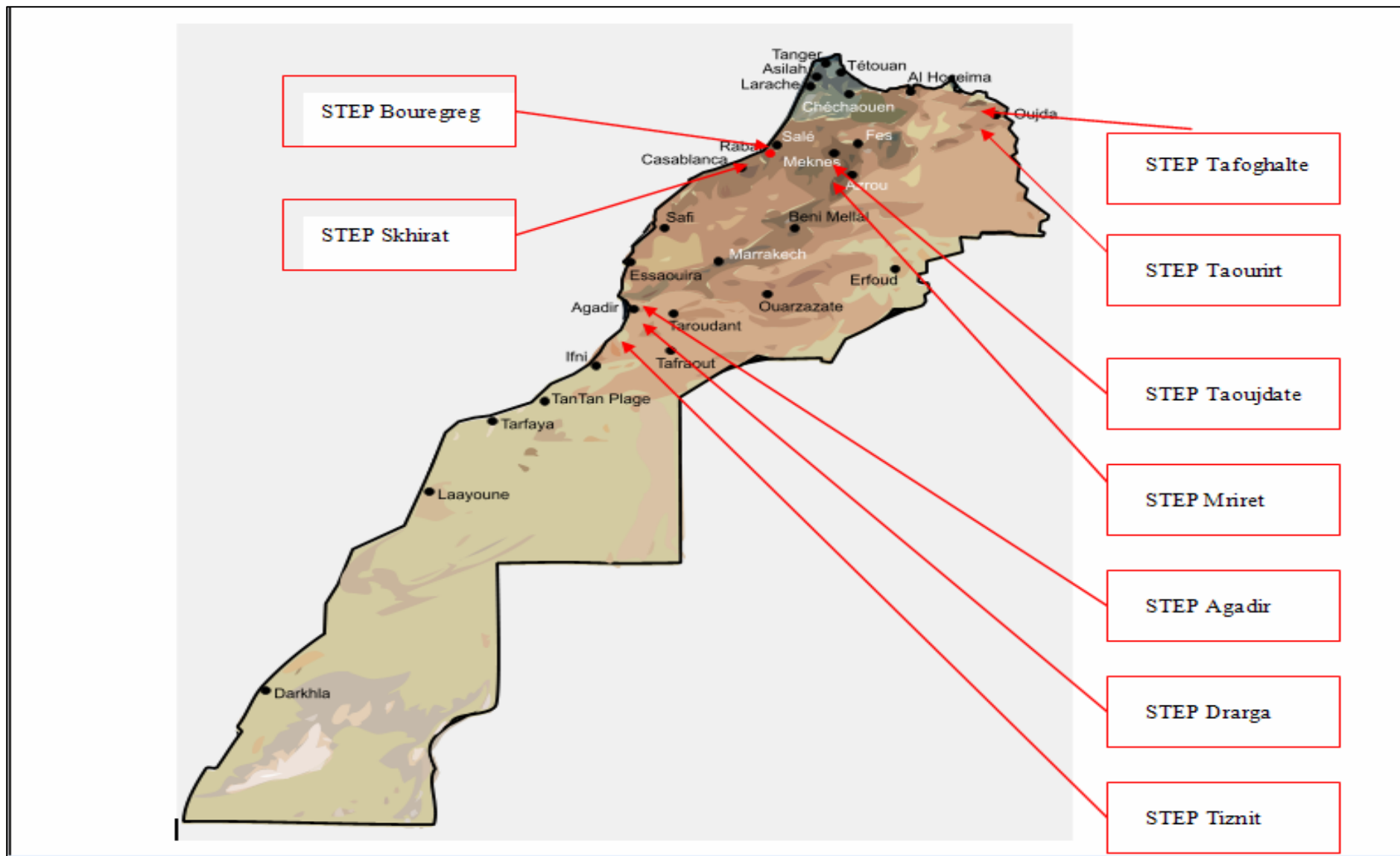


Figure 12 : Situation géographique des 9 STEPs étudiées

II. Enquêtes réalisées au niveau des STEP

1. STEP de Taourirt

La station d'épuration des eaux usées de la ville de Taourirt, est très récente, puisqu'elle a été mise en service le 15/08/2006.

Elle a été construite dans le cadre d'un projet Maroc-Union européenne, suite à une aide donnée par l'Allemagne.

La population liée au branchement d'assainissement est de 15747 habitants. Les canalisations ont de 145500 ml.

La capacité maximale de la station se traduit par un débit nominal de 6200m³/j. actuellement le débit nominal est de 5400m³/j.

Les eaux usées traitées par la présente station, collectées par le réseau d'assainissement auparavant et acheminées à la station, sont d'origine urbaine, plus précisément domestiques.

Il existe une activité industrielle de trituration des olives, induisant ainsi le rejet de ses margines dans le même réseau que celui des eaux domestiques.

Or, les travaux et prestations que contient le cahier de charges, qu'il est nécessaire de mener à bien, afin d'atteindre les objectifs tracés auparavant, n'a pas inclut l'acheminement des eaux usées industrielle à la présente station.

Ceci induit une surcharge organique et une inhibition de l'épuration biologique par les phénols.

L'activité s'est installée dans la région clandestinement, d'où un effet négatif sur le traitement des eaux usées, surtout qu'après traitement tertiaire, phase finale du traitement, l'eau traitée est rejetée dans le milieu récepteur.

Sachant que les eaux industrielles sont très différentes des eaux domestiques, puisqu'elles contiennent en plus des matières organiques, azotées et phosphorées, des produits toxiques, des solvants, des métaux lourds, des micropolluants organiques et des hydrocarbures, ils peuvent être nocifs au milieu récepteur et à son environnement.

En effet le but de traitement des eaux usées, est de diminuer suffisamment les substances polluantes contenues dans ces eaux, pourqu'une fois rejetée dans le milieu récepteur, elles ne le dégradent. Mais avec l'existence d'éléments traces métalliques ou de polluants, le milieu récepteur des eaux traitées de la STEP de Taourirt, pourrait être infecté.

Après traitement tertiaire des eaux usées, dans les bassins de maturation, elles sont rejetées dans le milieu récepteur oued Za, comme il a été signalé auparavant.

Une étude, est en cours de réalisation sur place, qui a pour but l'irrigation de 96 hectares aux alentours de la station d'épuration, par les eaux traitées.

2. STEP de Tafoghalte

La présente station, est comme sa présente, gérée par l'office national de l'eau potable (ONEP).

Elle a été mise en service le 1/08/2004, dans le but de traiter les eaux usées domestiques rejetées par la population de la petite ville de Tafoghalte, située dans l'oriental marocain, qui est de 800 habitants.

Le réseau d'assainissement, qui collecte les eaux usées de cette ville, est de type pseudo-séparatif, de longueur de 7,5 kilomètres.

Le débit consommé par les habitants de Tafoghalte est de $150\text{m}^3/\text{jour}$, avec un nombre d'abonnées de 300 habitants.

La station d'épuration des eaux usées de Tafoghalte a été conçue pour une capacité maximale de traitement de $180\text{m}^3/\text{jour}$.

Or les données actuelles, montrent que le débit nominal actuel entrant, oscille entre $50\text{m}^3/\text{jour}$ et $70\text{m}^3/\text{jour}$, pour 300 habitants abonnées dont 219 assainies.

Les eaux usées acheminées à la présente station d'épuration, sont d'origine domestiques, puisqu'il ya absence d'activité industrielle.

Le procédé de traitement des eaux usées utilisé dans cette station est un procédé biologique ; lits bactériens à cascades, dont les eaux rejetées par la population sont à dominante domestiques.

3. STEP de Mriret

La station d'épuration de Mriret se trouve dans la région du moyen Atlas marocain, sur la route nationale menant vers la ville de Khénifra.

La population raccordée au réseau d'assainissement acheminant les eaux à la présente station d'épuration, est estimée à 31000 habitants.

La composition d'effluents bruts, arrivant à la station d'épuration, est à 98% d'eaux domestiques, puisqu'il y a absence d'activités industrielles dans la région.

La conception de la présente station d'épuration a prévue une capacité de traitement de $1800\text{m}^3/\text{jour}$. Le débit nominal entrant actuellement est de $2100\text{m}^3/\text{jour}$.

Le procédé de traitement des eaux usées est de type extensif, puisqu'il s'agit d'un lagunage naturel avec deux types de bassins de traitements :

- Anaérobies
- Facultatifs

La station d'épuration de Mriret est considérée comme station pilote au Maroc puisqu'une étude scientifique y est en cours, ayant pour but l'élimination des mauvaises odeurs dégagées par les bassins anaérobies.

Le principe de cette étude est la transposition de la couche superficielle des bassins facultatifs vers les anaérobies.

La présente station est parmi les premières au Maroc, ayant essayé de réaliser un curage des bassins anaérobies, afin d'éliminer les boues résiduaires stagnantes dans ces bassins.

Toutefois, l'absence d'activité industrielle dans la région ne laisse pas les eaux intactes. En effet, il y a présence d'un gisement salin proche de la nappe phréatique, d'où les concentrations élevées en sodium (Na^+) dans les eaux usées acheminées à la STEP de Mriret.

4. STEP d'Ain Taoujdate

La station d'épuration d'Ain Taoujdate a été mise en service au mois d'août 2004, une année après celle de Mriret.

Le procédé de traitement des eaux usées est de type extensif ; un lagunage naturel avec 6 bassins de traitement en totalité :

- 4 bassins à microphytes
- 2 bassins à microphytes

5. STEP de Bouregreg

Station d'épuration des eaux usées du complexe de Bouregreg dispose de deux types de filières de traitement des eaux usées :

- Filière intensive : Boues activées
- Filière extensive : Lagunage aéré

La présente station est une Plate forme de formation sur les différents procédés d'épuration. Elle considérée aussi comme étant une activité de recherche et de qualification pour le personnel de l'Office National de l'Eau Potable, sis à Rabat.

Du fait du faible effectif de la population raccordée à cette station, le débit moyen est estimé à $86 \text{ m}^3/\text{j}$, avec un débit de pointe arrivant à $259.2 \text{ m}^3/\text{j}$,

C'est une station d'épuration pilote, à l'échelle nationale, quant au traitement efficace des eaux tout en répondant aux exigences environnementales du milieu récepteur.

C'est la première station d'épuration, parmi celles visitées, où on a trouvé une filière, proprement dite, de traitement de boues.

Les boues résiduaires sont acheminées à un épaisseur-digester aérobie, avec une alimentation permanente d'air, grâce à un sur presseur d'air, installé en amont de la filière intensive de traitement des eaux usées.

Les boues traitées proviennent de deux sources :

- Le décanteur secondaire, en aval de la filière intensive
- L'excès de boues provenant du répartiteur initial.

Le digester-épaisseur a pour but, tout d'abord, de digérer la boue, c'est-à-dire la minéraliser, et ensuite l'épaissir par effet de concentration, pour réduire son volume.

Après cette étape, les boues digérées et épaissies subissent un traitement de déshydratation naturelle, dans trois lits de séchage conçues pour cet effet.

Une fois les boues traitées, elles sont stockées au sein de la STEP, avec une teneur en matières sèches de 28% (source STEP Bouregreg)

6. STEP de Drarga

La station d'épuration des eaux usées de la commune rurale de Drarga dans la région d'Agadir, est une expérience pilote de la réutilisation d'eaux usées dans l'agriculture.

En effet, dans le cadre du Projet global PREM (Pérennité des Ressources en Eau au Maroc), financé par l'USAID en partenariat avec le Secrétariat d'Etat à l'Environnement, la mise en service de la station de Drarga a commencé en octobre 2000.

La commune rurale de Drarga ne fait pas partie du schéma d'assainissement du grand Agadir, d'où son choix pour l'implantation de la présente STEP.

La réalisation de cette STEP a été conçue, comme on a cité auparavant, à l'irrigation des terres agricoles des agriculteurs de la commune rurale de Drarga.

Ces derniers ont un niveau de technicité moyen, mais connus pour leur longue expérience dans le domaine de la gestion et le partage de l'eau d'irrigation.

C'est dans ce contexte que le projet de la mise en place de cette STEP visait la revitalisation des terres de ces agriculteurs, ayant accumulé des années de sécheresse.

Le but donc de ce projet a été d'être à caractère pilote transposable aux communes avoisinantes, surtout que les ressources en eau de la région du Souss est menacée par la pollution par l'exploitation abusive des nappes superficielles et souterraines et par le rejet des eaux usées dans le milieu récepteur, qui n'est d'autre que Oued Souss, induisant ainsi sa pollution et l'infiltration de ces eaux superficielles vers les eaux souterraines.

Le procédé de traitement utilisé dans la STEP de Drarga est l'infiltration-percolation.

Ce procédé consiste à infiltrer les eaux usées provenant des traitements primaire ou secondaire. Dans le cas de la station de Drarga, ce sont les bassins anaérobie, de décantation et un bassin anaérobie de dénitrification.

On distingue cinq bassins d'infiltration en parallèle et fonctionnant de manière séquentielle.

7. STEP de Skhirat

La station d'épuration de Skhirat est une station modèle, puisqu'on y retrouve toute la filière de traitement des eaux usées et la filière de traitement des boues résiduelles.

La station a été réalisée pour la dépollution de la zone balnéaire et pour la sauvegarde de l'environnement, pour l'amélioration de l'écosystème et pour un meilleur cadre de vie des habitants.

Elle s'étend sur une superficie de 13 ha, elle est de type lagunage naturel avec digestion anaérobie des boues.

La STEP de SKHIRAT est destinée à assurer l'épuration de l'ensemble des eaux usées produites par la ville de SKHIRAT.

Elle est conçue pour une population de 63 500 EH, un débit moyen de 6 000 m³/j et une charge organique journalière de 950 Kg/j de DBO₅.

Toutefois, cette station a fait des prévisions lors de l'étude de projet de son installation pour accueillir les eaux usées de 63500 EH, mais il s'est avéré que la population a émigré vers la ville de Temara à côté, et ainsi la STEP a donc maximisé ses calculs quant à la réception des eaux usées rejetées.

Aussi, même s'il existe un filière de traitement des boues résiduaire incluant une digestion anaérobie des boues et une déshydratation par voie naturelle dans les lits de séchage, les boues issues sont déposés à proximité de la STEP sans envisager une destination finale préventive de l'environnement.

Ces boues, considérées par la population riveraine comme du fumier, sont utilisées par cette dernière comme apport organique à leurs sols agricoles, sans qu'ils soient conscients du niveau de danger que représentent ces boues à leur environnement et à leur santé.

8. STEP d'Agadir

La station d'épuration des eaux usées du Grand Agadir est sous la responsabilité de la régie autonome multiservices (RAMSA).

Les eaux usées collectées sont transférées par pompage au site dunaire de M'zar, où elles subissent un traitement primaire par décantation anaérobie et secondaire par infiltration-percolation sur sable.

Les objectifs fixés par la RAMSA sont :

- ▶ Suppression de la pollution au niveau de l'Oued Sous
- ▶ Protection de l'agglomération contre les inondations
- ▶ Mobilisation d'une ressource en eau consistante par la réutilisation des eaux usées épurées.

La réutilisation des eaux usées épurées représente une contribution non négligeable à la réduction du déficit hydrique pour la région de Souss Massa, notamment en zone péri urbaine.

Les eaux usées de la STEP d'Agadir sont de différentes natures, puisque les eaux usées rejetées par les industries sont jetées dans le même réseau unitaire que celui des rejets domestiques.

Retrouvant ainsi les déchets poissonneux au niveau du dégrilleur de la station.

L'épuration des eaux usées au niveau de la présente station d'épuration génère une production quotidienne des boues d'épuration estimée à 5 tonnes, issues du raclage des filtres à sable, dont le rôle est la rétention des matières en suspension, ainsi que la dégradation de la matière organique fixée sur les grains de sable.

En plus de cette quantité, il ya une production de boues estimée à 3500 m³ extraites des bassins vidangés annuellement.

Ces boues d'épuration, après leur raclage des filtres à sable et leur vidange des bassins, sont stockés tous les jours au niveau de la STEP, à l'attente d'un choix de valorisation, puisque la RAMSA ne s'est pas encore prononcée sur les propositions figurant dans l'étude de valorisation des boues qui lui a été remise.

9. STEP de Tiznit

La station d'épuration des eaux usées de Tiznit est très récente, puisqu'elle a commencé à fonctionner en 2006.

Elle épure les eaux usées de 85% de la population totale de la ville de Tiznit, avec un procédé de traitement biologique ; lagunage naturel.

La capacité de traitement est de 4900 m³/j, mais actuellement le débit entrant est à seulement 1309 m³/j.

Du fait que la station d'épuration de Tiznit est récente, il n'a pas eu encore de curage des lagunes ou une quantification des boues résiduelles.

Le traitement qu'ont prévu les responsables pour les boues d'épuration est le séchage naturel dans les lits de séchage.

III. Méthodes et Procédés d'analyse des boues d'épuration

Introduction

La description des procédés d'analyses se voit très importante avant de se lancer dans leur interprétation.

La présente partie a pour objectif de décrire les échantillons de boues étudiés ainsi que les différents protocoles et procédés d'analyses utilisés au cours de la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

Tous les échantillons de boues ont été tout d'abord séchés à l'air libre, enfin broyés et enfin tamisés au tamis à 2mm.

1. Description des échantillons de boues

Le présent mémoire a pour objectif d'effectuer une caractérisation chimique des boues résiduelles de 9 stations d'épuration des eaux usées au Maroc.

Les échantillons étudiés sont donc des boues d'épuration des eaux usées, issues de différents procédés de traitement des eaux usées.

Les principales caractéristiques des différentes boues résiduelles sont présentées dans le tableau 31

Tableau 31 : Caractéristiques des boues échantillonnées

Echantillon	Caractéristiques
Taourirt	<ul style="list-style-type: none"> ● Age : Extraite le 1/11/07 du 1^{er} bassin anaérobie ● Nature : Urbaine ● Type : Fraîche, Juteuse
Tafoghalte	<ul style="list-style-type: none"> ● Age : Rejetée le 1/10/07 dans le milieu récepteur ● Nature : Urbaine ● Type : Séchée naturellement
	<ul style="list-style-type: none"> ● Age : Rejetée le 1/11/07 dans le milieu récepteur, et extraite le même jour. ● Nature : Urbaine ● Type : Pâteuse
Mriret	<ul style="list-style-type: none"> ● Age : Extraite en 07/07 suite à un essai de curage du 1^{er} bassin anaérobie. ● Nature : Urbaine ● Type : Séchée naturellement
	<ul style="list-style-type: none"> ● Age : Extraite le 07/11/07 du 1^{er} bassin anaérobie ● Nature : Urbaine ● Type : Pâteuse
Ain Taoujdate	<ul style="list-style-type: none"> ● Age : Extraite le 7/11/07 du 1^{er} bassin anaérobie. ● Nature : Urbaine ● Type : Pâteuse
Bouregreg	<ul style="list-style-type: none"> ● Age : Issues du digesteur-épaississeur et déshydratées naturellement, durant la période s'étalant de 2001 à 2004. ● Nature : Urbaine ● Type : Séchées naturellement dans les lits de séchage.
	<ul style="list-style-type: none"> ● Age : Issues du digesteur-épaississeur et déshydratées naturellement, durant la période s'étalant de 2004 à 2005. ● Nature : Urbaine ● Type : Séchées naturellement dans les lits de séchage
	<ul style="list-style-type: none"> ● Age : Issues du digesteur-épaississeur et déshydratées naturellement, durant la période s'étalant de 2006 à 2007. ● Nature : Urbaine ● Type : Séchées naturellement dans les lits de séchage.
	<ul style="list-style-type: none"> ● Age : Mises au séchage le 7-11-2007 ● Nature : Urbaine ● Type : mi-séchées dans les lits de séchage
	<ul style="list-style-type: none"> ● Age : Extraites du digesteur-épaississeur le 16-11-2007 ● Nature : Urbaine ● Type : Liquide
	<ul style="list-style-type: none"> ● Age : Extraite en 07/07 ● Nature : Rejets domestiques

Drarga (Commune rurale de la région d'Agadir)	<ul style="list-style-type: none"> • Type : Séchée naturellement dans les lits de séchage
	<ul style="list-style-type: none"> • Age : Extraite le 29/11/07 du 1^{er} bassin anaérobie. • Nature : Rejets domestiques.
	<ul style="list-style-type: none"> • Type : Pâteuse
	<ul style="list-style-type: none"> • Age : Extraite le 29/11/07 du 1^{er} bassin tampon. • Nature : Rejets domestiques • Type : Granuleuse
Tiznit	<ul style="list-style-type: none"> • Age : Extraite le 29/11/07 du répartiteur bassin anaérobie et bassin de dénitrification. • Nature : Rejets domestiques • Type : Liquide
	<ul style="list-style-type: none"> • Age : Extraite le 30/11/07 du 1^{er} bassin anaérobie. • Nature : Urbaine • Type : fraîche juteuse
Skhirate	<ul style="list-style-type: none"> • Age : Mises au séchage le 2-12-2007 • Nature : Urbaine • Type : Séchées au lits de séchage
	<ul style="list-style-type: none"> • Age : Mises en séchage le 7-12-2007 • Nature : Urbaine • Type : Séchées au lit de séchage
	<ul style="list-style-type: none"> • Age : Mises au séchage le 26-12-2007 • Nature : Urbaine • Type : Séchées au lit de séchage
	<ul style="list-style-type: none"> • Age : Mises au séchage le 20-11-2007 • Nature : Urbaine • Type : Séchées au lit de séchage
	<ul style="list-style-type: none"> • Age : Mises au séchage le 20-10-2007 • Nature : Urbaine • Type : Séchées au lit de séchage
	<ul style="list-style-type: none"> • Age : Mises au séchage le 20-10-2007 • Nature : Urbaine • Type : Séchées au lit de séchage

Assobhei et Mountadar (2006), ont fait l'essai d'estimation des quantités des boues d'épuration au Maroc en 2006 dans le cadre du projet Morocomp et ils ont considéré une moyenne de 40 g MS/hab/j sous forme de boues générées du traitement des eaux usées.

La population du Maroc compte actuellement 30 millions d'habitants, générant ainsi une production potentielle des boues de *438 000 tonnes/an*.

Selon le PNAL, le taux de raccordement global au réseau d'assainissement est estimé actuellement à environ 70% en milieu urbain et 52% en milieu rural.

La population urbaine raccordée aux réseaux d'assainissements urbains est estimée à 16 millions d'habitants correspondant ainsi à une production potentielle de : *233 600 tonnes /an*

Nous allons donc procéder de la même façon pour faire le calcul au niveau des STEP étudiées (Tableau 32)

Tableau 32 : Quantités de boues calculées dans les différentes STEP visitées.

STEP	Nombre d'habitants raccordés	Quantité de boues estimée (tonnes/an)
Skhirate	63500	922
Mriret	31000	450
Ain Taoujdate	25000	363
Taurirt	15747	229
Tiznit	296000	4297
Bouregreg	400	6
Tafoghalte	800	12
Agadir	350000	5082
Drarga	8000	116
	790447	11477

2. Description des méthodes et procédés d'analyses des échantillons de boues

2.1 Description des circonstances de prélèvement des échantillons de boues

Les échantillons de boues, sur lequel le travail a été effectué, ont été prélevés soit directement des bassins de traitement des eaux usées, et ce en utilisant un seau qui puisse arriver au fond du bassin, ou des tas de boues sèches accumulées au niveau ou à côté des STEPs.

Afin de ne pas être contaminée par les germes contenus dans les boues échantillonnées, nous avons été munis à chaque fois qu'on prélevait des échantillons de boues par des gants.

2.2 Préparation des échantillons

Les échantillons de boues des stations d'épuration des eaux usées, ont été extraits dans la plupart des cas des bassins de traitement, du fait que les différentes STEP ont une date de démarrage assez récente. Dans d'autres STEP, on a pu trouver des boues sèches extraites des années ou mois auparavant.

De ce fait donc, les échantillons de boues se présentaient essentiellement sous trois formes :

- Liquide
- Pâteuse
- Sèche

Afin de ramener tous les échantillons aux mêmes conditions, ils ont été séchés afin d'éliminer l'eau absorbée et adsorbée.

Pour ce faire, les échantillons ont été étalés sur des plaques rectangulaires couvertes de papier filtrant, à l'air libre, puis broyés et tamisés afin d'obtenir une poudre homogène à granulométrie inférieure à 2mm.

2.3 Caractérisation des paramètres agronomiques des échantillons de boues

2.3.1 Siccité

Définition

La siccité est un paramètre qui renseigne sur la consistance et la concentration en solides des boues.

Intérêt

La boue est constituée de matières sèches (MS) ; Le pourcentage d'eau représente l'humidité alors que le pourcentage de matières sèches représente la siccité.

La mesure de la siccité des échantillons de boues se voit très importante, avant de procéder à leur caractérisation chimique, puisqu'elle entre dans le calcul de tous les éléments chimiques afin de donner des valeurs finales exactes qui puissent être utilisées ultérieurement dans d'éventuelles recherches ou études postérieures.

En effet, la concentration en matières sèches permet de connaître la quantité de boue à traiter, quel que soit son niveau de concentration dans la filière de traitement (OTV, 1998).

Mode opératoire

Les échantillons de boues sont mesurés avant et après mise à l'étuve à 105°C pendant 24h, puis une formule de calcul est utilisée pour connaître la teneur en matière sèche des échantillons de boues.

$$S = (M2 \times 100) / M1$$

M1 : masse de l'échantillon dont on mesure la siccité et

M2 : masse du même échantillon après séchage à 105°C.

2.3.2 Matière organique (%MO)

Intérêt

La matière organique d'un amendement est un paramètre agronomique très important en agriculture, puisqu'elle améliore la porosité et le pouvoir de rétention de l'eau des sols.

Elle favorise ainsi l'enracinement des plantes cultivées, leur approvisionnement en eau et en éléments nutritifs tout en apportant une source de nourriture aux vers de terre et aux microorganismes utiles.

Mode opératoire

Le pourcentage de matière organique est égal au double du pourcentage de carbone :

$$\% MO = \% C * 2$$

2.3.3 pH

Intérêt

La mesure du pH en premier lieu se voit élémentaire, puisque c'est un paramètre important pour l'utilisation ultérieure de la boue en agriculture.

Le pH détermine partiellement la charge électrique des particules solides et, par conséquent, influe sur leur stabilité colloïdale.

Mode opératoire

Les échantillons de boue ont été séchés à l'air libre, broyés puis tamisés à 2mm.

A 5g de boue, 25 ml d'eau déminéralisée sont ajoutées et mis dans de petites capsules. Le mélange est agité chaque 20 minute pour une durée d'une heure.

Après la dernière agitation, la mesure est effectuée directement ; l'électrode est introduite dans le mélange. La lecture a été faite après ce que la valeur ait restée constante environ 30 secondes, dans une température avoisinant les 16°C.

2.3.4 Rapport C/N

Intérêt

Ce rapport entre le carbone et l'azote totaux, mesuré sur un matériau organique, indique le degré d'évolution de la matière organique et son degré de résistance à la dégradation microbienne.

Le rapport C/N est important en agriculture, du fait qu'il renseigne sur la richesse en N et sur l'activité biologique du milieu.

Plus C/N est faible, plus la biodégradation des boues est facile. L'azote en excès se minéralise sous forme ammoniacale et nitrique.

Il y a 4 grands groupes (tableau 33)

Tableau 33 : Grands groupes de boues selon le rapport C/N (Bachelier, 1983)

Rapport C/N	Comportement des boues
N > 5% et C/N < 8	Boues minéralisant à coup sûr une forte proportion de l'azote.
N = 2 à 5% et C/N = 10 à 14	Boues ne libérant qu'en faible quantité ou lentement le N minéral témoigne d'une certaine stabilisation.
C/N > 15 et C > 30%	Boues susceptibles de provoquer un blocage temporaire d'azote en raison d'une stabilisation insuffisante.
N < 2 et C/N > 15	Boues carencées en azote, évoluant peu ou risquant de provoquer une immobilisation prolongée de l'azote du sol.

Mode opératoire

La mesure des pourcentages de carbone et azote contenus dans les échantillons de boues d'épuration a été faite en même temps grâce à un appareil fonctionnant de la façon suivante : Les échantillons sont pesés dans des nacelles en étain qui sont placées dans un passeur automatique de type carrousel et depuis lequel elles tombent les unes après les autres dans un tube en quartz maintenu à 1021°C. Un flux constant d'hélium dit "gaz vecteur" circule en permanence (Figure 13).



Figure 13 : Appareil de mesure de C et N totaux

À l'introduction de l'échantillon, le courant d'hélium est enrichi par une quantité d'oxygène de grande pureté (99.99%). L'oxydation exothermique de la nacelle d'étain permet une élévation de la température localement à 1800°C, ce qui permet une combustion éclair.

Les gaz de combustion sont entraînés par le gaz vecteur sur le catalyseur d'oxyde de cobalt et d'oxyde de chrome [$Cr_2O_3 + CO_3$] contenu dans le tube en quartz, à ce stade les gaz obtenus sont sous la forme CO_2 , H_2O , SO_2 , N_xO_y .

A la sortie du four à combustion, les gaz poussés par le flux d'hélium pénètrent dans un deuxième four à 750°C (réduction) contenant un catalyseur (cuivre en fil) sur lequel sont réduits les oxydes d'azote et qui retient l'oxygène en excès.

Bien que les échantillons soient séchés à l'air libre avant leur pesées, seule l'eau résiduelle est éliminée mais pas celle de constitution qui ne sera éliminée qu'au cours de la combustion éclair. Cette eau sera retenue sur un piège constitué de perchlorate de magnésium anhydrique.

La colonne chromatographique va permettre la séparation des composés CO_2 et N_2 avant de passer dans le catharomètre, afin de faire le dosage de carbone et d'azote.

La mesure du catharomètre repose sur la mesure de la conductibilité thermique des composés analysés. Celui utilisé est un catharomètre à double filament.

2.3.5 Les éléments majeurs et les métaux lourds

Définition et Principe

La détermination des éléments majeurs et des métaux lourds se fait par une attaque totale via une minéralisation.

La minéralisation est un traitement préalable nécessaire pour la mise en solution de certains éléments à analyser.

Le principe de la minéralisation réside dans l'oxydation de la matière organique par un acide minéral.

Mode opératoire

Le procédé de minéralisation ayant été utilisé est l'attaque par les acides nitrique, fluorhydrique et perchlorique.

Plus ou moins 1g de boue séchée à l'étuve à 105°C pour éliminer l'eau contenue dans l'échantillon de boue, et obtenir enfin un poids de boue en matière sèche. Ensuite les échantillons de boues sont mis dans des creusets et placés dans un four réglé à 450°C pour une durée de 24h afin de réduire la quantité de matière organique dans les boues, et permettre d'avoir de bons résultats d'analyses.

Sortis du four, on laisse les échantillons refroidir, jusqu'à atteinte de la température ambiante du laboratoire.

Les échantillons de boues secs sont ensuite mis dans des capsules en téflon, on y ajoute 15ml d'acide fluorhydrique et 10ml d'acide nitrique, et on les place sur une plaque chauffante (Figure 12).

On laisse l'attaque se poursuivre 2 heures, puis on ajoute 2ml d'acide perchlorique et on laisse évaporer à sec.

Après 24h sur plaque chauffante, on reprend le résidu par l'acide nitrique concentré, on filtre sur filtre Whatman 2 et on met dans une fiole de 100ml, et on porte à volume avec de l'eau déminéralisée.



Figure 14 : Attaque par acide perchlorique

Avant de faire l'attaque totale pour déterminer la teneur en éléments majeurs et en éléments traces métalliques, les échantillons recueillis auparavant des jauges, sont dilués successivement avec des dilutions de 500 et 50.



Figure 15 : Mesure des éléments majeurs et éléments traces métalliques par attaque totale

Résultats et discussions

Introduction

Les boues d'épuration sont utilisées en agriculture à la façon d'un engrais, c'est-à-dire comme produit capable de fournir aux cultures des éléments nutritifs nécessaires à leur croissance et à leur développement.

En outre, certaines boues d'épuration peuvent jouer un rôle d'amendements, ce qui signifie qu'elles permettent d'entretenir ou d'améliorer la structure du sol, son activité biologique ou encore de contrôler son acidité (ADEME, 2006)

Les paramètres agronomiques retenus pour ce mémoire sont la siccité, la teneur en matière organique, le pH, le rapport C/N, les éléments majeurs et les éléments traces métalliques.

1. Paramètres physico-chimiques

1.1 Teneur en matières sèches (MS%)

Les différentes boues échantillonnées sont de différentes natures (tableau 30), nous avons procédé au calcul de la teneur en matière sèche (tableau 34), pour pouvoir faire le calcul ultérieur des différents constituants de la boues et les porter au poids sec.

Tableau 34 : Résultats de la siccité des échantillons de boues.

STEP	Procédé de traitement	Teneur en MS ^(*) (%)
Agadir	Infiltration-percolation	87%
		95%
Skhirate	Lagunage naturel	93.6%
Drarga	Infiltration-percolation	92%
Bouregreg	Boues activées	80.2%
Mriret	Lagunage naturel	92.5%
Ain Taoujdate	Lagunage naturel	91%
Tafoghalte	Lits bactériens	94%
Taourirt	Lagunage naturel	90%
Tiznit	Lagunage naturel	82%

(*) : Il s'agit de la teneur en matières sèches après leur séchage au laboratoire, différente d'une siccité résultante d'un type de traitement donné.

Les boues issues des stations mécanisées, sont extraites du digesteur anaérobie, d'un épaisseur ou des deux à la fois.

A l'extraction elles ont un aspect liquide, mais une fois acheminées aux lits de séchage, pour leur déshydratation, elles prennent un aspect pâteux, pour se fissurer enfin et devenir sèches.

Les boues de lagunes, sont aussi liquides à l'extraction directe des bassins de traitement, avant d'être étalées sur les lits de séchage pour une éventuelle déshydratation.

1.2 pH et conductivité électrique

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 35

Tableau 35 : pH et CE des différents échantillons de boues

STEP source	pH	CE (mS/cm)
Moyenne Agadir	6,87	2,6
Moyenne Skhirat	7,17	2
Moyenne Drarga	7,61	2,91
Moyenne Bouregreg	6,82	4,6
Moyenne Mriret	7,37	5,65
Taoujdate	7,49	2,92
Moyenne Tafoghalte	7,4	0,98
Taurirt	7,97	6,06
Tiznit	7,17	2,96

Les valeurs de pH enregistrées des différents échantillons de boues résiduaires oscillent entre 6,02 (Bouregreg) et 7,97 (Drarga).

Le pH moyen de toutes les boues est près de la neutralité, ce qui montre qu'elles ne contiennent pas beaucoup de carbonates.

Les faibles pH initiaux des boues sont dues au fait qu'elles contiennent une part importante de lipides (Reveille et al., 2003)

La basicité de certaines boues peut être due au taux élevé de carbonates y contenue. Cette alcalinité peut entraîner la précipitation des métaux lourds et leur adsorption aux matières en suspension et les sédiments (Bounit et al., 2002)

Tous les échantillons de boues, sur lesquels cette étude a porté, n'ont pas subis de traitement au préalable (à la chaux ou autres), ce qui explique les valeurs enregistrées.

L'augmentation de pH réduit la solubilité et l'absorption de l'aluminium, le cobalt, le zinc, le fer et le manganèse.

L'élévation du pH, diminue l'assimilabilité du phosphore et le calcaire bloque la minéralisation de la matière organique et donc diminue la disponibilité en éléments nutritifs pour les plantes.

La conductivité électrique est élevée en les échantillons des STEP de Taourirt et Mriret, comme le montre le tableau des résultats.

Cette teneur peut être expliquée par l'augmentation de la teneur en sels minéraux. Cette salinité de ces deux boues est probablement due aux teneurs importantes en ion de sodium, potassium, calcium et magnésium.

En effet les roches de la région de Mriret sont salines, surtout avec la présence d'argiles rouges avec des formations salifères, aussi les tanneries de la région déversent leurs effluents bruts chargés en sels dans le réseau d'assainissement liquide.

Pour la station de Taourirt, la haute valeur de conductivité électrique est due à l'existence d'une unité de trituration des olives, dont les eaux usées sont traitées avec les eaux usées ménagères au sein de la STEP.

Pour les deux stations de Taourirt et Mriret, le taux élevé des sels est aussi au taux d'évaporation élevé des lagunes de traitement, puisqu'il s'agit ici d'un procédé de traitement des eaux usées extensif, où les lagunes sont exposées au soleil, y induisant ainsi l'accumulation des sels.

1.3 Carbone total, azote total, C/N et Matière Organique

Tableau 36 : Teneurs en C, N, C/C et MO des différentes boues

STEP source	C	N	C/N	MO
Moyenne Agadir	31,06	2,78	11,2	62,05
Moyenne Skhirat	25,41	2,64	9,6	50,82
Moyenne Drarga	23,7	2,66	11,5	55,3
Moyenne Bouregreg	28,35	3,81	7,5	56,7
Moyenne Mriret	28,08	2,66	10,7	56,17
Ain Taoujdate	33,22	2,77	12	66,44
Moyenne Tafoghalte	23,71	2,09	11,31	47,43
Taourirt	27,51	2,41	11,41	55,02
Tiznit	37,89	3,53	11,02	77,78

Le rapport C/N indique le degré d'évolution de la matière organique et son degré de résistance à la dégradation microbienne.

Le contenu des boues résiduaires en azote et autres éléments fertilisants, leur confère des propriétés d'engrais organique.

Selon les résultats obtenus, on retient que le rapport C/N des différents échantillons de boues résiduaires oscille dans un intervalle allant de 9.6 à 12.

D'après Assobhei et Mountadar (2006), le C/N moyen des boues marocaines est de 13.

Les résultats des analyses, démontrent que les boues de la station d'épuration de Bouregreg, (boues activées) contiennent en moyenne presque le double de la teneur en azote total que les boues issues d'un traitement en lagunage naturel.

Les résultats obtenus sur les différents échantillons de boues dépurations figurent sur le tableau 36.

Les boues de lagunes de traitement des eaux usées, séjournent longtemps dans les fonds des bassins de traitement, ce qui les rend vulnérables à différents phénomènes de dégradation d'azote (nitrification et dénitrification).

Les boues liquides contiennent moins d'azote que les boues sèches, du fait de leur faible siccité et leur perte accrue en azote. (Hébert, 2005). Toutefois, selon Grimaud (1995), les plus fortes teneurs d'azote sont enregistrées dans les boues liquides.

Le taux d'azote obtenu des différents échantillons de boues varie de 2,09 à 3,53.

La fourchette des teneurs d'azote peut aller de 1% à 9% (Grimaud, 1995), en fonction des caractéristiques des effluents bruts traités.

Le rapport C/N constitue un indice de la fraction d'azote organique facilement minéralisable des boues et des fumiers de ferme non compostés (Hébert, 2005).

Selon BACHELIER (1983) les boues ayant une teneur en azote entre 2 et 5% et un rapport C/N variant de 10 à 14%, ne libèrent qu'en faible quantité ou lentement l'azote minéral, témoignant ainsi d'une certaine stabilisation.

Chaussod et al. (1981) quant à eux, considèrent que les boues ayant un NTK variant de 2% à 5% et un C/N de 6% à 12% ; libèrent facilement 30 à 40% de leur azote minéral.

Les boues sont des sédiments résiduaux constitués surtout de bactéries mortes et de matière organique minéralisée.

Les échantillons de boues, sur lesquels porte le présent travail, sont tous issus d'un procédé de traitement des eaux usées biologique, ce qui explique leur teneur élevée en matière organique.

Ce sont des boues biologiques qui contiennent en grande partie des corps bactériens et de leurs sécrétions.

Pour les stations d'épuration ayant pour procédé de traitement des eaux usées le lagunage naturel, on remarque que les stations les plus récentes, sont celles où on a enregistré les teneurs les plus élevées en matière organique, alors que ces teneurs sont plus petites dans les STEP les plus anciennes en termes de leur date de démarrage.

Cet écart entre les valeurs des teneurs en matière organique est attribué au fait que les boues résiduaux s'accumulent longtemps au fond des lagunes des traitements.

Le long séjour des boues résiduaux dans les bassins de traitement, induisent une oxydation de la matière organique y contenue, ce qui affectera les valeurs de matière organique qui seront moindres (Hébert, 2007).

Sachant que le curage des bassins de traitement se fait à partir de la 5^{ème} année de la date de démarrage d'exploitation de la station d'épuration des eaux usées, les boues auront ensuite des valeurs plus petites que celles enregistrées actuellement.

Les matières organiques des boues ne contiennent que très peu de lignines et de cellulose. Elles vont se dégrader très rapidement dans le sol. S'il peut y avoir un effet positif sur la structure du sol, l'année qui suit l'épandage, il ne faut pas espérer remonter les taux de matières organique du sol à long terme (INRA, Bordeaux).

2. Composition en éléments fertilisants des boues

De par leurs teneurs en éléments minéraux et organiques, les boues peuvent être utilisées comme substituts d'engrais en agriculture. Il s'agit de distinguer la valeur humique des boues de leur valeur fertilisante. La première est représentée par le taux de matières organiques ne subissant pas de minéralisation, la seconde par l'apport en azote, phosphore, potassium, calcium, magnésium et certains oligo-éléments. Le rapport C/N définit le potentiel de minéralisation.

En général, les boues d'épuration sont utilisées en agriculture à la façon d'un engrais, c'est-à-dire comme produit capable de fournir aux cultures des éléments nutritifs nécessaires à leur croissance et à leur développement. En outre, certaines boues d'épuration (compostées ou brutes) peuvent jouer un rôle d'amendements, ce qui signifie qu'elles permettent d'entretenir ou d'améliorer la structure du sol, son activité biologique ou encore de contrôler son acidité.

D'après les ressources bibliographiques, les éléments fertilisants peuvent être classés en 4 grands groupes :

- ▶ Macro éléments : N, P et K
- ▶ Méso éléments : Ca, Mg et S
- ▶ Oligo-éléments : Fe, Mn, Zn et Cu
- ▶ Éléments bénéfiques : Al, Na et Co

Les valeurs ont été obtenues à partir de 23 échantillons de boues d'épuration (Tableau 37)

Tableau 37 : Moyennes des teneurs d'éléments majeurs des boues.

STEP	Al (mg/kg)	Ca (mg/kg)	Fe (mg/kg)	K (mg/kg)	Mg (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Na (mg/kg)	P (mg/kg)
Agadir	32277	75708	908	9103	10402	350	7331	13098
Skhirat	27775	85837	842	7345	8757	278	2480	8512
Drarga	29238	76460	863	6362	9143	276	2608	11130
Bouregreg	26938	71246	889	8483	9267	257	3899	10286
Mrirt	26134	64926	882	6315	9494	298	3447	14768
Taoujdate	43976	74409	844	10201	5607	328	1607	6435
Tafoghalte	30989	60765	987	6515	6741	331	2343	14853
Taourirt	11978	32386	810	2438	5181	280	2347	18886
Tiznit	34623	71396	1043	13040	10755	294	8240	7457

On retient des résultats obtenus que les teneurs en éléments fertilisants contenus dans les boues varient d'une station d'épuration à l'autre.

Selon une étude faite par Assobhei et Mountadar (2006), a donné les teneurs moyennes des boues marocaines en MgO, K₂O et P (Tableau 38)

Tableau 38 : Teneurs moyennes en MgO, K₂O et P des boues marocaines (Assobhei et Mountadar, 2006)

Paramètre	MgO	K ₂ O	P
Valeur (%)	1,26	0,28	0,76
Paramètre	Mg	K	P
Valeur (%)	0,78	0,23	0,76
Paramètre	Mg	K	P
Valeur (mg/kg)	7800	2300	7600

Les résultats obtenus (tableau 37), avoisinent les teneurs moyennes présentées dans le tableau 38.

Pour le phosphore, on remarque que toutes les boues dépassent la teneur moyenne, à part la station de Taoujdate et Tiznit, qui sont de 6435 et 7457 mg kg MS respectivement.

Ces boues peuvent être donc une source de phosphore pour les plantes en cas d'épandage agricole, surtout que les boues permettent un apport important d'acide phosphorique.

Le phosphore présent dans les effluents urbains provient des détergents et de la matière organique humaine.

Les lessives apportent plus de la moitié du P total et environ la moitié des ions P en solution

La teneur en P des composts de boues augmente avec le temps en relation avec la minéralisation de la matière organique (Traoré, 1998 ; Traoré et al., 1999).

Le phosphore existant dans les boues d'épuration provient aussi des squelettes des microorganismes intervenant dans l'épuration des eaux usées.

30 à 98% du P total est sous forme minérale (Sommelier et al., 1996) tout type de boue confondu.

Cette variabilité est expliquée par le fait que les ions P en solution peuvent entrer dans des combinaisons organiques ou minérales variées en fonction des conditions physico-chimiques imposées par la composition initiale des eaux usées et celles du bassin où sont formées les boues (Avrin, 1983)

La déshydratation élimine le phosphore dissous dans l'eau (Morel, 1977 ; Morel et al., 1978 ; Colin, 1983)

Pour ce qui est de la teneur en potassium, on remarque que les boues échantillonnées donnent des résultats supérieurs aux teneurs moyennes établies par Assobhei et Mountadar (2006).

Les boues d'épuration peuvent être une source importante d'azote et de phosphore, mais peuvent fournir en petite quantité le potassium. (Mc Graw-Hill, 1991)

En effet, le potassium est présent en faible quantité dans les boues, insuffisante pour constituer une alternative à la fertilisation classique.

Le potassium est très soluble, restant donc lié aux effluents bruts à l'entrée à la STEP et à l'aval, au rejet dans le milieu récepteur.

La faible teneur de potassium contenue dans les boues est due au fait que le potassium est rejeté dans les eaux usées épurées, se retrouvant donc dans le milieu récepteur.

Une caractérisation des boues faite par Igoud (2001), a permis de confirmer la richesse des boues d'épuration en azote, et leur faible teneur en phosphore et potassium (Tableau 39)

Tableau 39 : Résultats d'analyses de boues résiduaires (Igoud, 2001)

Elément	Boue fraîche	Boue sèche	Normes
%N	4,610	3,820	2
%P	0,146	0,120	0,43
%K	0,090	0,066	0,16

Une étude a été faite en Suisse et a montré que par rapport aux taux de nutriments des engrais de ferme et des engrais minéraux, celui des boues est plutôt faible (Tableau 40)

Tableau 40 : Comparaison des teneurs en nutriments de différents fertilisants (EAWAG)

	N (milliers de tonnes)	P (milliers de tonnes)	K (milliers de tonnes)
Engrais de ferme	128	20,5	162
Engrais minéraux	53	7,4	27
Boues d'épuration	3,7	2,2	0,25

Pour le magnésium, les teneurs enregistrées dépassent la valeur moyenne de 7800 mg/kg, à part les STEPs de Taoujdate, Taourirt et Tafoghalte.

Pour mieux voir la richesse des boues de chaque STEP, nous avons opté pour une méthode de classification par notation.

En effet, comme le montre le tableau 41, nous allons donner des classes, via des notations, aux différentes teneurs enregistrées des éléments fertilisants des boues échantillonnées.

Tableau 41 : Classes attribuées aux éléments fertilisants

Notation	Classe
5	Très riche
4	Riche
3	Moyennement riche
2	Pauvre

Le tableau 42 présente les notations obtenues et de leur totaux.

Tableau 42 : Notations attribuées aux différentes boues

STEP	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	N	Total
Agadir	5	4	4	4	5	5	5	4	4	40
Skhirat	4	5	3	3	3	4	3	3	4	32
Drarga	4	4	3	3	4	4	3	3	4	32
Bouregreg	4	3	3	3	4	4	4	3	5	33
Mriret	4	3	3	3	4	4	4	3	5	33
Taoujdate	5	4	3	4	2	5	2	3	4	32
Tafoghalte	5	3	4	3	3	5	3	4	3	33
Taourirt	3	2	3	2	2	5	3	5	4	29
Tiznit	5	3	5	5	5	5	5	3	5	41

On remarque que la STEP de Tiznit est la plus riche en éléments fertilisants, et celle de Taourirt est la plus pauvre.

Ceci peut être dû à la nature des effluents bruts qui entrent en station pour leur épuration, ainsi qu'aux habitudes alimentaires des populations des deux villes.

Les boues de la station de Bouregreg contiennent les valeurs les plus élevées en azote total, puisque les boues d'une station à boues activées sont curées périodiquement, et donc elles gardent un stock élevé en azote, contrairement aux boues des lagunes qui restent longtemps dans les bassins de traitement, perdant ainsi leur teneur en azote de façon continue.

L'augmentation de la teneur en azote est liée essentiellement à l'augmentation de la fraction organique.

On retient que les boues de la station de Taourirt enregistrent le pH le plus élevé. En cas de valorisation agricole de ces boues, l'élévation du pH diminue l'assimilabilité du phosphore, et pourrait bloquer la minéralisation de la matière organique et donc diminuer la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes.

L'épandage agricole des boues d'épuration s'inscrit dans la logique du recyclage dans le milieu naturel et de l'économie des ressources non renouvelables.

En apportant des éléments fertilisants aux cultures, les boues réduisent l'utilisation d'engrais minéraux : elles diminuent d'autant les prélèvements miniers (phosphore et potasse notamment) ou la consommation d'énergie nécessaire à la fabrication des engrais (azote).

La nature essentiellement organique de l'azote apporté par les boues entraîne sa mise à disposition progressive pour les plantes, par minéralisation, phénomène sous la dépendance des conditions pédo-climatiques locales.

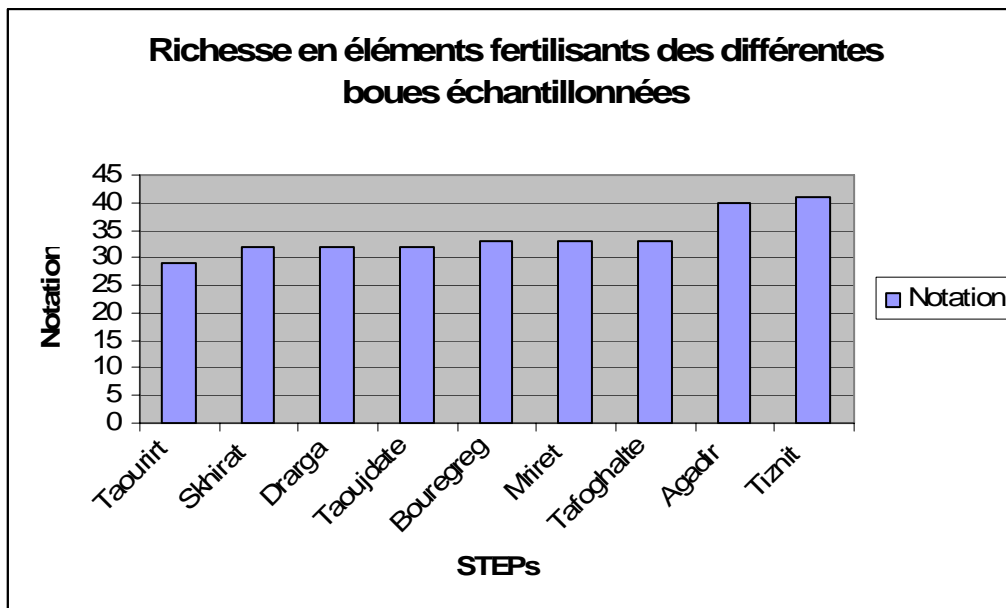


Figure 16 : Richesse en éléments fertilisants des différentes boues d'épuration

Pour le même traitement des eaux usées, on remarque des différences au niveau des teneurs des boues en éléments fertilisants, ceci est dû aux différentes caractéristiques des effluents bruts à traiter, ainsi qu'à la performance de chaque STEP.

Les boues échantillonnées contiennent donc différentes teneurs d'éléments fertilisants qui pourraient être bénéfiques aux plantes en cas d'épandage agricole ou de compostage.

3. Composition en éléments traces métalliques

Avant d'interpréter les résultats obtenus d'analyses des éléments traces métalliques, il est nécessaire de rappeler que les métaux lourds influent sur la qualité des boues d'épuration de deux façons :

- Les teneurs
- Les formes des ETM

Si la présence de certains éléments comme le cuivre et le zinc est indispensable dans le sol à certaines doses, celle d'autres éléments comme le cadmium ou le mercure n'est pas souhaitable et il est raisonnable de veiller à ce que les teneurs en ces éléments restent les plus faibles possible.

Par ailleurs, il semble que les ETM, apportés dans les boues, soient sous des formes relativement mobiles, les plus facilement bio-disponibles et les plus susceptibles de migrer vers les nappes ou vers les eaux de surface.

Des teneurs élevées en éléments traces métalliques pose le problème de contamination du sol et des plantes. Le degré de nuisance de métaux lourds n'est pas le même selon la forme chimique sous laquelle ils sont présents.

C'est ainsi que la présence des métaux lourds dans les boues d'épuration est le principal facteur qui pourrait retreindre leur valeur agronomique et limiter leur utilisation en agriculture.

En effet, les boues d'épuration contiennent plus de métaux lourds et des éléments traces métalliques que les engrais minéraux artificiels.

L'application fréquente des boues d'épuration au sol peut induire une accumulation de ces métaux dans le sol, pouvant par la suite être transmises le long des chaînes trophiques jusqu'à l'Homme.

Les paramètres physico-chimiques peuvent influencer le comportement des éléments métalliques (Bounit et al.).

Des études ont montré que l'augmentation de pH (Pardo et Ghadakix 1995), l'augmentation de la matière organique et de la teneur en calcaire est accompagnée d'une réduction de la biodisponibilité des métaux lourds. Ainsi l'importance de l'accumulation des éléments métalliques dans les boues va dépendre de ces dernières.

Nous avons essayé de faire une étude de corrélation de PEARSON au seuil $\alpha = 0,05$ entre les différentes teneurs des métaux lourds, pH et teneur en matière organique pour pouvoir voir cette relation,

Les résultats sont présentés dans le tableau 43

Tableau 43 : Teneurs en ETM des boues d'épuration

STEP	Cr mg/kg/MS	Cd mg/kg/MS	Cu mg/kg/MS	Ni mg/kg/MS	Pb mg/kg/MS	Zn mg/kg/MS
Agadir	39,9	1,6	144,4	17,2	235,5	867,1
Skhirat	46,9	1,96	235,7	19,5	129,1	856,5
Drarga	49,4	1,5	257,5	21,5	120,1	993,3
Bouregreg	42,8	2,1	231,8	20,1	136,9	758,8
Mriret	56,4	2,5	368,1	23,7	113,8	1113,3
Taoujdate	60,9	0,9	232,9	21,4	82,1	803,8
Tafoghalte	52,8	1,2	245,8	23,8	111,8	1111,5
Taurirt	36,3	1,1	260,04	20,7	90,8	1342,1
Tiznit	34,6	0,7	222,5	16,6	88,1	237,9

Du fait que le Maroc ne dispose pas encore de lois régissant la filière des boues d'épuration, on a pris comme référence en matière de valeurs limites réglementaires, celles de la l'Union Européenne et de la Tunisie (Tableau 44, Figures 17 et 18).

Tableau 44 : Valeurs limites réglementaires en ETM et moyennes enregistrées dans les différentes boues

ETM (mg/kg)	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Cu+Cr+Ni+Zn
Moyennes	1,71	46,78	243,47	20,51	130,17	896,4	1207,16
Valeurs limites réglementaires (UE)	20	1000	1000	200	800	3000	4000
Valeurs limites réglementaires (Tunisie)	20	500	1000	200	800	2000	3700

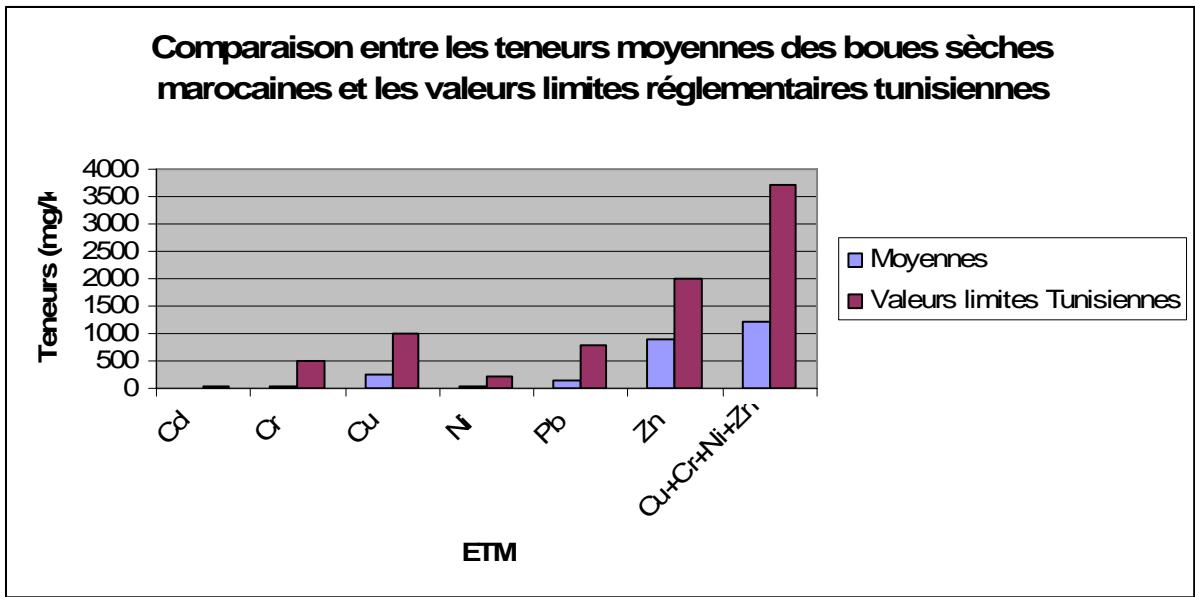


Figure 17 : Comparaison entre les teneurs moyennes des boues sèches et les valeurs limites réglementaires de la Tunisie

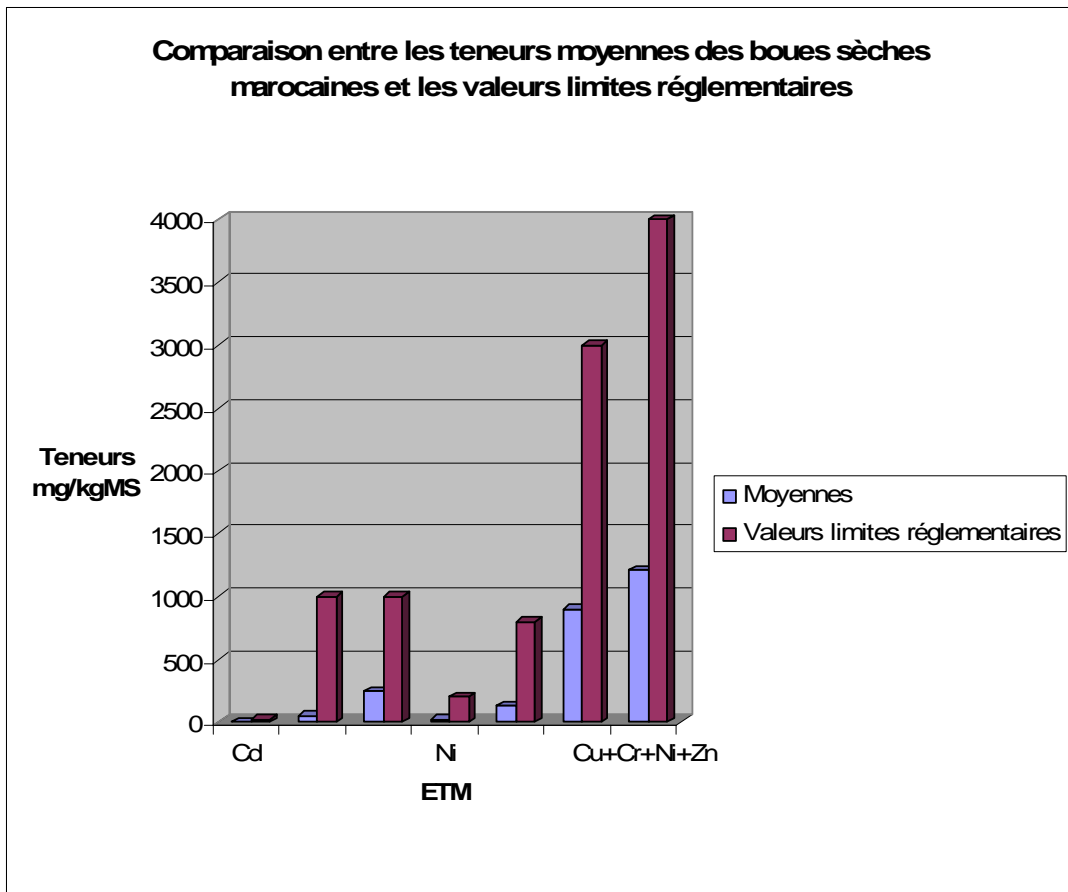


Figure 18 : Comparaison entre les teneurs moyennes des boues sèches et les valeurs limites réglementaires de l'Union Européenne

On pourra s'attendre, après la vidange des lagunes de traitement, à partir en moins de la 5^{ème} année de l'exploitation des différentes stations d'épuration visitées, à des teneurs encore plus élevée à celles qu'on mesuré actuellement.

Les boues prélevées seront donc un mélange de différentes boues accumulées sur plusieurs années

Les résultats d'analyses des éléments traces métalliques contenus dans les boues varient d'une station à l'autre (tableau 43).

Cette différence est due à la diversité des natures des effluents bruts. En effet les environnements respectifs des stations d'épuration visitées sont complètement différents. Comme on a vu, des fois on retrouve des unités industrielles, d'autres fois un gisement salin. Pour la station d'épuration des eaux usées de Bouregreg, elle est à boues activées, si on compare les valeurs enregistrées sur les différentes années, on remarque que plus la boue est ancienne, plus les valeurs enregistrées sont moindres.

Plus le pH du sol est bas, plus les dynamiques des éléments traces métalliques sont importantes, d'où un risque plus grand.

En cas de valorisation de ces boues par épandage agricole direct, il faut bien contrôler le pH des sols.

Le cuivre est généralement associé à la matière organique, qui est la fraction oxydable des boues d'épuration des eaux usées.

Le plomb est beaucoup plus associé à la fraction oxydable. Il est présent sous des formes très insolubles.

Le zinc et le cadmium sont très significativement présents dans la fraction échangeable et acido-soluble.

Le zinc est essentiellement transporté par solubilisation, puis sorption sur les MES.

Le comportement du cadmium est proche du celui du zinc.

Le nickel et le chrome sont peu solubles lors des extractions chimiques, menées aux laboratoires.

Une étude a été faite pour voir l'effet de l'apport des boues d'épuration issues de stations de traitement à boues activées et à lagunage naturel, sur une culture de ray-grass (Najmeddine, Echab, Fars, Hafidi 2003).

L'étude a montré que la production de matière sèche augmente après l'apport des deux types de boues, mais en même temps il y a augmentation de l'accumulation des éléments traces métalliques dans le ray-grass toujours pour les deux types de boues.

Toutefois l'accumulation des éléments traces métalliques est influencée par le type de boues, un effet variable en fonction du métal et serait en rapport avec la forme chimique du métal dans la boue d'épuration.

On conclut donc que les boues échantillonnées ne présentent pas des problèmes d'éléments traces métalliques, et ce en comparant avec les deux valeurs limites réglementaires ; Tunisienne et Européenne.

4. Expérience de minéralisation en conditions contrôlées sur des échantillons de sols amendés

4.1 Introduction

L'aptitude à la minéralisation, qui détermine la disponibilité potentielle de l'azote des boues, dépend tout d'abord de leurs caractéristiques biochimiques : teneur en azote total, rapport C/N, stabilité de l'azote organique (résistance à la biodégradation). L'azote des boues évolue dans le sol sous l'action de différents processus biologiques et physico-chimiques : minéralisation de la fraction organique, éventuellement réorganisation de l'azote minéral, nitrification ou volatilisation de l'azote ammoniacal, dénitrification de l'azote nitrique (Chaussod, 1981, 1983).

Pour un type de boues donné, caractérisé par une disponibilité potentielle de l'azote donnée, la disponibilité réelle de l'azote (efficacité) va dépendre, pour une part non négligeable, des conditions d'utilisation : le contexte pédoclimatique, les conditions d'épandage et les techniques culturales. C'est l'ensemble de ces paramètres qui détermine l'efficacité de l'azote des boues vis-à-vis de la production agricole.

4.2 Les différentes formes de l'azote du sol

L'azote est présent dans le sol sous différentes formes :

- Azote minéral :
 - i. Sous forme d'ammonium (NH_4^+).
 - ii. Sous forme d'ammoniaque (gaz NH_3).
 - iii. Sous forme de nitrates (NO_3^-).
 - iv. Sous forme de nitrites (NO_2^-)
- Azote organique :
 - i. Présent dans les substances humiques
 - ii. Stocké dans la biomasse du sol

La capacité du sol à fournir l'azote assimilable pour les plantes est un indicateur important de sa qualité.

4.3 Intérêt de l'expérience

Les plantes ne pouvant assimiler que l'azote minéral, la valeur fertilisante azotée d'une boue est fonction de sa richesse initiale en azote ammoniacal et surtout de l'aptitude de sa fraction organique à être minéralisée après l'épandage.

Pour déterminer la valeur fertilisante en matière d'apport en azote des boues résiduelles, on a opté pour une approche expérimentale menée au laboratoire en milieu contrôlé, à travers la détermination de l'aptitude à la minéralisation de l'azote.

4.4 Principe de la méthode utilisée

La méthode utilisée pour déterminer la quantité d'azote disponible libérée par minéralisation dans le sol a été décrite par Waring et Bremner (1964).

Cette méthode fournit une mesure relativement valide de la capacité du sol à libérer l'azote disponible pour les plantes (Bremner, 1965). Elle implique des processus microbiologiques pour la libération azotée lors de l'incubation, comparables à ceux qui existent dans les conditions naturelles pour les sols en période de croissance.

L'activité biologique, qui est optimale à la température choisie durant l'incubation, assure le développement et le maintien des conditions anaérobiques. Les réactions possibles de dénitrification à la surface du sol qui conduirait à une diminution des valeurs d'azote minéralisable sont ainsi éliminées.

La méthode convient particulièrement bien à des manipulations de routine en laboratoire. En effet, elle ne nécessite pas d'appareillage sophistiqué ni de réactifs spécifiques, elle est assez simple à réaliser.

Un avantage supplémentaire est le peu de manipulations requises en conditions submergées. Le réajustement de l'eau au contenu désiré n'est pas nécessaire et les pertes en eau éventuelles durant l'incubation sont négligeables.

Enfin, les conditions anaérobiques permettent une plus grande libération d'azote minéralisé ; les hautes températures entraînent aussi un taux de minéralisation plus important.

4.5 Mode opératoire

4.5.1 Caractéristiques des deux types de sols

Les caractéristiques des deux sols utilisés sont comme suit (Tableau 45)

Tableau 45 : Caractéristiques des sols

Sols	pH	% C	% N	Ca	Mg	K	Na	NH4
Belge	5.46	1.75	0.251	1576	161	289	10.8	12.230
Vietnamien	5.83	0.53	0.0035	0.179	0.081	0.069	0.102	-

4.5.2 Incubation et extraction

On dépose 0,8g de boues d'épuration des eaux usées séchées et tamisées à 2mm, et 5g de deux types de sol belge et vietnamien ; sableux et limoneux dans des tubes en verre d'une capacité de 50 ml environ. On ajoute 25ml d'eau déminéralisée.

Pour chaque type de sol, trois répétitions sont réalisées.

Une fois les tubes fermés hermétiquement, ils sont incubés durant 7 jours à 37°C.

Un échantillon témoin contenant uniquement du sol est aussi préparé de la même façon.

4.5.3 Mesure de l'azote ammoniacal

Les mesures sont faites grâce à une électrode à ammonium (Figure 19)



Figure 19 : Electrode à ammonium

4.6 Résultats et discussions

La minéralisation de l'azote permet d'évaluer la disponibilité de l'azote des boues d'épuration sèches des STEP marocaines enquêtées pour les cultures après apport au champ.

D'après les résultats obtenus, on remarque que la minéralisation d'azote est plus importante pour le sol sableux par rapport au sol limoneux (Tableau 46)

Tableau 46 : Résultats de minéralisation d'azote pour les boues d'épuration

Tiznit	Concentration NH₄ mg/Kg MO Pr	Concentration NH₄ mg/Kg MO S3
Drarga	3670	4870
Bouregreg	1460	2290
Agadir (1)	7600	8640
Agadir (2)	3400	5350
Taurirt	110	360
Mriret	3800	5290
Tafoghalte	760	1580
Skhirat (1)	1100	1460
Skhirat (oct.)	5680	6680
Témoin	1240	1630

Pour les deux types de sol, on a eu des résultats de la teneur en azote ammoniacal positive, ce qui prouve qu'il y a eu effectivement une libération de l'azote dans les deux sols.

Les valeurs d'azote ammoniacal varient de 110 mg/g à 8640 mg/g, ayant pour raison la grande différence existante entre les différentes boues. Leur capacité donc à fournir de l'azote aux plantes et cultures en cas d'épandage agricole sera aussi variée.

Les deux types de sols accusent beaucoup de différences, d'où leur choix d'ailleurs. La première différence est celle des textures.

Le sol belge est limoneux, il est donc caractérisé par une activité microbienne plus importante que le sol vietnamien, qui va minéraliser la matière organique.

Pour le sol sableux, le faible taux de minéralisation par rapport au sol limoneux est peut être due à une moindre stabilité qui est assurée par le complexe argilo-humique ayant pour conséquence la non fixation de la matière organique.

Tandis que pour le sol limoneux, il accuse plus de stabilité puisqu'il retient l'azote entre les feuillets du complexe argilo-humique.

Si l'incubation dure plus qu'une semaine, le sol limoneux pourrait libérer plus d'azote.

La valeur d'azote ammoniacal plus petite a été enregistrée dans la boue issue de la station d'épuration de Taourirt. Cette boue en effet contient une teneur très faible en azote total. C'est pour ça que la libération d'azote a été minime.

L'azote n'est assimilable par les végétaux que sous forme minérale, surtout nitrique. La valeur fertilisante azotée des boues dépend donc de leur richesse initiale en azote ammoniacal, mais aussi et surtout de l'aptitude de l'azote organique qu'elles contiennent à être minéralisé dans le sol.

La disponibilité de l'azote contenue dans les boues dépend des caractéristiques physico-chimiques de chaque types de boue (Grimaud, 1995).

Les périodes de minéralisation de la fraction organique sont principalement liées à la température et à l'humidité du sol. Le culture bénéficiera d'autant mieux de ces fournitures que sa période d'absorption de l'azote couvrira bien la période de minéralisation (Grimaud, 1995)

La température a un effet plus marqué que l'humidité sur la vitesse de minéralisation. Toutefois une humidité excessive des sols (conditions d'anaérobiose) peut provoquer des pertes d'azote par dénitrification. L'intensité de la dénitrification est directement fonction de la quantité de carbone assimilable apporté par les boues (Grimaud, 1995).

Des relations entre la matière organique, la biomasse microbienne et la minéralisation de l'azote ont été démontrées in vitro (Alvarez et al., 1995, 1998)

5. Propositions d'optimisation du co-compostage des boues avec des déchets verts et des déchets ménagers

Du fait de leur porosité presque nulle, les boues d'épuration ne peuvent être compostées toutes seules.

Dans ce qui suit, nous allons présenter une estimation de calcul de co-compost des boues d'épuration et des déchets verts.

La base de calcul est le rapport C/N.

Une étude a été faite dans le cadre d'un mémoire de fin d'études (Zeddou, 2008), ayant pour but l'étude de faisabilité d'une unité de compostage de déchets verts à l'Institut Agronomique

et Vétérinaire Hassan II, qui a donné une caractérisation chimique de différentes espèces végétales.

Le rapport C/N moyen des boues étudiées est de 13. Afin d'atteindre la valeur comprise entre 25 et 35, nécessaire à la réussite du compostage, le choix de l'agent structurant doit être orienté dans ce sens, c'est-à-dire, vers un C/N élevé.

C'est ainsi que nous avons porté notre choix sur l'espèce végétale d'eucalyptus ayant pour C/N une valeur qui avoisine les 161 (Tableau 47)

Tableau 47 : Teneurs en C et N total de l'eucalyptus

Paramètre	% C	% N
Teneur (%)	41,87	0,26

Pour ce qui est des boues, nous avons pris les teneurs moyennes en carbone et azote total de toutes les boues étudiées.

Tableau 48 : Teneurs moyennes en C et N total des boues prélevées des différentes STEPs

Paramètre	% C	% N
Teneur moyenne (%)	28,7	2,81

La relation utilisée pour obtenir le C/N du mélange est :

$$C/N \text{ (mélange)} = [M_1(C_1*(100-H_1)+M_2(C_2*(100-H_2)+\dots)] / [M_1(N_1*(100-H_1)+M_2(N_2*(100-H_2)+\dots)]$$

M_i = masse de la matière organique i

H_i = humidité de la matière organique i

C_i = teneur en carbone de la matière organique i (en % de la MS)

N_i = teneur en azote de la matière organique i (en % de la MS)

Pour ce qui est de l'humidité, du fait que dans toutes les stations d'épuration visitées, le traitement que subissent les boues est le séchage naturel, nous avons supposé que leur humidité, après extraction des lits de séchage est à 45%.

En effet, le paramètre de l'humidité est relativement flexible pour les boues d'épuration, puisque à l'état frais ils sont une humidité de 95%, pour les STEPs dotées de lits de séchage, elles sont à 45%. L'humidité diffère en fonction du procédé de traitement que peuvent subir les boues d'épuration.

Une étude a été faite dans la STEP de Ouarzazate (Xanthoulis, Soudi), ayant eu pour but de voir l'évolution du nombre d'œufs d'Ascaris et de l'humidité des boues lors du traitement des boues en lits de séchage. Le résultat de l'expérience a conclu à ce que la diminution des œufs d'helminthes suit parfaitement la diminution de la teneur en humidité des boues (figure 20).

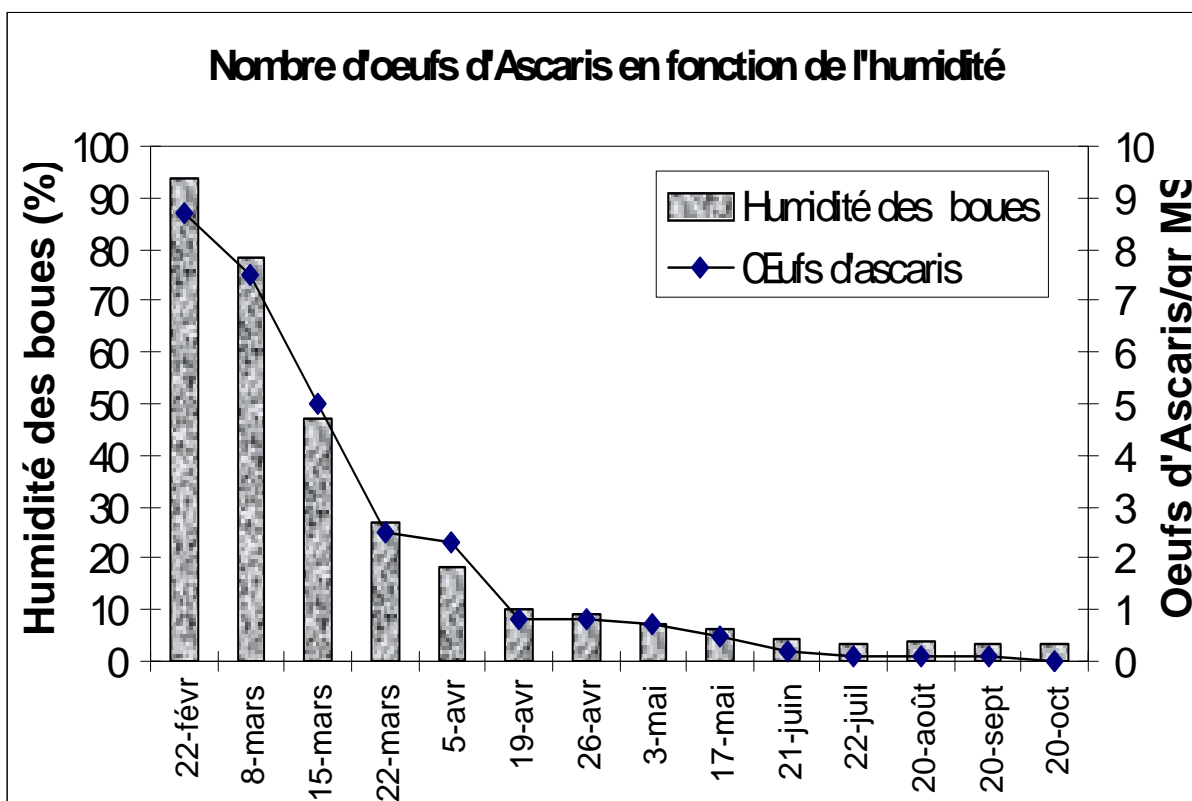


Figure 20 : Evolution du nombre des œufs d'Ascaris et de l'humidité des boues d'épuration lors du traitement des boues en lit de séchage.

On remarque qu'à 45% d'humidité, supposée être celle des boues extraites des lits de séchage, le nombre des œufs d'Ascaris avoisine les 5 œufs/gramme de matière sèche.

Le traitement des boues d'épuration par les lits de séchage est efficace sous les conditions climatiques marocaines. Toutefois leur valorisation agricole nécessitera une étude préalable pour évaluer leur intérêt agricole et leur impact sur l'environnement.

Les teneurs obtenus du compost final, pour un ratio 1BR :1,5DV sont présentés dans le tableau 49.

Tableau 49 : C/N du compost final

Matière organique	Boues d'épuration	Déchet vert (Eucalyptus)
Quantité (kg)	600	1000
% C	28,7	41,87
% N	2,81	0,26
% H	45	29
C/N du mélange	35	

Le C/N obtenu du compost final est optimal puisqu'il se situe dans la fourchette [25 ;35].

L'utilisation des composts pour la fertilisation du sol, constitue une voie de contamination et d'accumulation des ETM dans les sols. Les teneurs des métaux lourds dans les boues

montrent toujours un niveau plus élevé que celui des eaux usées entrant dans l'unité d'épuration (Fars, 1994 ; Karvelas et al., 2003).

Malgré que le compost des boues contient lui aussi des ETM, ce dernier quand il est incorporé au sol, les ETM vont être distribués dans ce dernier et par la suite ils vont être associés aux éléments solides du sol par différents processus (échange, adsorption, précipitation). La fixation des ETM contribue à l'enrichissement du sol en métaux, en particulier dans les horizons superficiels (Karvelas et al., 2003), mais limite leur biodisponibilité.

Le co-compost boues d'épuration et déchets verts induit une diminution du taux de la MO due à la minéralisation microbienne de la MO des boues, étant donné la nature ligno-cellulosique des déchets verts qui sont dégradés plus lentement (Ména et al, Huang et al 2004, Hernandez et al, 2006 rapporté par Albrecht, 2007)

L'augmentation de la proportion des boues dans le mélange initial intensifie la minéralisation.

La forte dégradation des composés carbonés engendre l'augmentation de l'azote organique réduisant ainsi la masse totale du compost.

La nature et la composition chimique des boues et des déchets verts influent sur la composition finale du compost.

La nature des boues et des déchets verts est un facteur déterminant quant à la qualité finale du compost obtenu. Il est nécessaire de faire un choix judicieux des deux composantes du compost, pour ne pas nuire à l'environnement et à la santé humaine après épandage du compost obtenu.

La qualité d'un compost a été appréhendée de différentes manières (Albrecht, 2007) :

- ▶ La notion de transformation d'une matière organique initiale très fortement biodégradable en une matière organique stable en fin de compostage
- ▶ L'effet du compost sur les plantes, lié au degré de maturité du compost. Un apport d'un compost immature au sol,

6. Options de gestion de boues adaptées au Maroc

Une station d'épuration des eaux usées ne peut être considérée performante que si elle intègre une bonne gestion de la filière « boues ».

Il est nécessaire d'inclure la filière boues lors de l'étude du projet de mise en place d'une station d'épuration des eaux usées, afin de garantir l'élimination, la valorisation ou le traitement des boues par des voies saines et sécurisées.

Cette filière doit être adaptée à chaque contexte local, puisque chaque STEP et chaque région est un cas particulier pour trois raisons essentielles :

- ▶ Quantités de boues à traiter
- ▶ Nature des boues à traiter
- ▶ Contraintes et coûts des destinations finales.

D'après tout ce qui a été dit, on voit que la valorisation des boues se voit l'option la plus appropriée au Maroc.

Cette valorisation peut être via le séchage par déshydratation naturelle dans les lits de séchage s'avère le traitement le plus approprié le traitement le plus approprié aux conditions marocaines, ayant un climat semi-aride.

En plus, le séchage par voie naturelle conserve la valeur organique des boues (Souidi, 2007) permettant ainsi l'amélioration des propriétés physiques et chimiques des sols marocains, qui souffrent déjà de faibles teneurs de la matière organique.

Le séchage permet aussi l'élimination complète des œufs des parasites (Xanthoulis 1996, rapporté par Souidi 2007), expérience menée sur des boues issues de la ville d'Ouarzazate.

Le compostage est aussi une destination favorable aux boues puisqu'il a un effet assainissant, éliminant ainsi les germes pathogènes.

Le compostage est une solution adéquate, pour que l'épandage ultérieur des boues sur des sols agricoles ne soit nocif à l'environnement et la santé humaine.

Le compostage des boues par andains avec retournements est la solution adaptée au Maroc (Souidi, 2007).

Une unité de compostage par andains avec retournements doit comporter cinq aires :

- ▶ Une aire de réception ; où les boues séchées sont reçues ainsi que l'agent structurant.
- ▶ Une aire de fermentation ; où se fait le dépôt de la matière organique en andains, la hauteur et la largeur de ces derniers sont de 1,5 à 2 m et de 2 à 4 m respectivement.
- ▶ Une aire de maturation ; nécessaire pour la maturité du compost qui y subit une diminution de la température et la stabilisation de la matière organique.
- ▶ Une aire de criblage ; où le compost est préparé pour l'élimination des matériaux grossiers et indésirables
- ▶ Une aire de stockage ; où les boues compostées doivent être stockées sous abri en milieu ventilé

L'unité de compostage dit être imperméabilisée et dotée d'un système de drainage des lixiviats vers des points de rejet.

Les facteurs entrant en compte pour le dimensionnement de l'unité de compostage en andains avec retournement sont :

- ▶ Tonnage total des boues et des agents structuraux
- ▶ Le % de la matière sèche
- ▶ L'humidité
- ▶ La densité apparente du mélange à composter.

Le compostage des boues est une filière préconisée pour une gestion durable des boues dans la mesure où le bilan environnemental et sanitaire est favorable

Le co-compostage des boues avec les déchets verts est une option adéquate au contexte marocain, d'une part pour les avantages du compostage de boues déjà évoquées, et d'autre part pour la disponibilité des déchets verts à l'échelle nationale.

Les déchets verts sont des déchets encombrants, qui ne subissent pas actuellement au Maroc, un traitement particulier ; ils sont mis dans des dépôts aléatoires, en décharge ou subissent un tri informel.

Le co-compostage des boues d'épuration avec les déchets verts est une solution qui évitera la perte de la matière organique au niveau des décharges et autres dépôts, ainsi que la nocivité à la santé humaine et à l'environnement.

Le séchage naturel est aussi une option adaptée aux conditions marocaines, du fait de son climat semi-aride.

Il permet l'élimination quasi-totale d'helminthes, considérés très résistants.

Aussi l'apport de boues sèches aux cultures, influe positivement la production agricole.

Toutefois, lors du choix de telle ou telle option de valorisation, il est très important de prendre en considération les contraintes de la gestion des boues.

En effet, la gestion des boues des stations d'épuration des eaux usées est considérée comme un problème majeur de la gestion environnementale.

Il faut considérer différents types de contraintes lors de la mise en œuvre d'un plan de gestion des boues d'épuration des eaux usées.

Ces contraintes peuvent être de trois types :

- ▶ Contraintes amont : liées à la nature, les caractéristiques et les quantités de boues.
- ▶ Contraintes aval : liées aux possibilités locales d'élimination des boues.
- ▶ Contraintes technico-économiques : liées à l'élimination des boues aux meilleurs coûts.

Conclusions et recommandations

Les boues d'épuration connaîtront une augmentation accrue dans les années à venir au Maroc, conséquence directe des objectifs fixés par le programme national de l'assainissement liquide. Elles atteindront les 241205 tonnes/an à l'horizon 2015.

Les stations d'épuration, récemment mises en place, généreront d'énormes quantités de boues d'épuration dans les cinq années à venir. Elles devraient donc porter un choix de valorisation des boues produites.

Dans la plupart des stations d'épuration, les boues résiduairees sont déposées à proximité des STEP, induisant ainsi une nuisance à l'environnement et à la santé humaine.

Actuellement, il n'y a pas de plan de gestion des boues d'épuration au niveau national, ni de réglementation régissant ce secteur.

Des efforts doivent être déployés, de la part des ministères chargé de l'environnement, l'agriculture et autres, ayant une relation avec le secteur environnemental et des différents professionnels ; ONEP, régies et concessionnaires, pour pouvoir mettre en place un plan de gestion des boues et éviter ainsi leur nocivité.

L'intégration de la population, et surtout des agriculteurs, via une approche participative serait un atout dans le cadre de cette réflexion.

Ce plan de gestion définira les options de valorisation des boues d'épuration les plus adaptées au Maroc.

Dans ce contexte, la valorisation agricole se voit l'option de recyclage des boues la plus appropriée au contexte marocain.

Malgré que les teneurs en éléments traces métalliques, des boues étudiées, sont inférieures aux différentes valeurs limites réglementaires, Européennes et Tunisiennes, il est nécessaire de bien suivre leur évolution, en cas de valorisation agricole, pour ne pas induire un cumul de ces micropolluants chimiques au niveau du sol ou des cultures.

Le C/N moyen a donné une valeur de 13 avoisinant les valeurs trouvées dans la bibliographie, même remarque pour les différents éléments fertilisants, qui varient en fonction du procédé de traitement des eaux usées.

Différents recommandations peuvent être faites sur la base de ces conclusions :

- ▶ Mettre en place un cadre réglementaire et législatif pour encadrer la gestion des boues d'épuration à l'échelle national.
- ▶ Elaboration d'une base de données pour chaque station d'épuration, qui contiendra tous les paramètres physico chimiques des boues d'épuration et leur évolution dans le temps, via un archivage de tous les résultats d'analyses.
- ▶ Etablir des plans d'action de gestion des boues d'épuration pour chaque station d'épuration à part, du fait de la grande variabilité des caractéristiques physico-chimiques des boues d'une STEP à l'autre.
- ▶ Mise en place de plates formes de compostage au niveau des STEP où il ya des marchés pour pourvoir faire écouler le compost final
- ▶ Faire des essais d'épandage agricole des boues d'épuration à proximité des stations d'épuration.
- ▶ Sensibilisation des agriculteurs quant aux avantages des boues d'épuration en tant que fertilisant organique, en cas d'une utilisation rationnelle
- ▶ Nécessité de la mise en place des normes d'épandage et de valorisation des boues.
- ▶ Réduire la pollution des eaux usées, pour pouvoir garantir une qualité meilleure des boues d'épuration
- ▶ Il est urgent d'élaborer un plan national de gestion des boues d'épuration

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

Alvarez R. & Alvareza C.R. Soil Organic Matter Pools and Their Associations with Carbon Mineralization Kinetics

ADEME. (2000) Composts de boues de stations d'épuration municipales : qualité, performances agronomiques et utilisations – Données et références.

Adler E. (2001) Hexagone Environnement N°36, avril/mai 2001 page 27 à page 29.

Albrecht R. (2007) Co-compostage de boues des stations d'épuration et des déchets verts, nouvelle technologie de suivie des transformations de la matière organique.

Andersen. (1999) Examen de la situation de recyclage agricole des boues d'épuration urbaines en Europe et dans divers autres pays du monde. ADEME et cabinet Arthur Andersen. ADEME éditions n°3358,

Antonis A. Zorpas & Maria Loizidou. (2008) Sawdust and natural zeolite as a bulking agent for improving quality of a composting product from anaerobically stabilized sewage sludge. Bioresource Technology, Volume 99, Issue 16, Pages 7545-7552

Assobhei O. & Mountadar M. (2006) Production des boues de traitement des eaux usées au Maroc, MOROCOMP (LIFE TCY05/MA000141).

Bounit S., El Meray M., Chehbouni, Ait Hsine A., H. (2003) Comportement des éléments métalliques (Cu, Cd, Pb et Zn) dans trois types de boues résiduaires de la ville de Marrakech –Maroc, étude analytique et traitement

Caroline De Backer. (2005) Effet de quatre amendements organiques sur la minéralisation de l'azote et sur l'évolution des conditions physico-chimiques d'un sol sableux lors de la submersion pour riziculture au Vietnam.

Catalogue marocain des déchets. (2007)

Catherine Nève. (2006) Potentiel de fertilisation azoté de plantes aquatiques utilisées comme amendement des sols sableux au centre Vietnamien

Charles R. Rhyner, Leander J. Schwartz, Robert B. Wenger, Mary G. Kohrell. (1995) Waste management and resource recovery.

Charnay F. (2005) Compostage des déchets urbains dans les pays en voie de développement : élaboration d'une démarche méthodologique pour une production pérenne de compost.

Chaussod. (1981 & 1983) Cité dans Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes: Reims (France), 19-20 novembre 1996 De Gilles Lemaire, Gilles Joseph Lemaire, Bernard Nicolardot,

Chennaoui Fatima Zahra. (2007) Contribution à l'élaboration d'un plan d'action pour la gestion des boues des stations d'épuration au Maroc.

Collection OTV Ouvrage collectif N°2. (1998) : Traiter et valoriser les boues

Edition Dirkzwager A.H & P. l'Hermite, Elsevier applied science: Sewage sludge and use; new development, technological aspects and environmental effects.

J.E, l'Hermite. P & Newman. P.J: Treatment and use of sewage sludge and liquid agricultural wastes. Edition HALL

FRANCOU F. (2003) Thèse de doctorat de l'INA de Paris-Grignon "Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbains: Influence de la nature des déchets et du procédé de compostage - Recherche d'indicateurs pertinents". Paris, Grignon, Institut National de Recherche Agronomique.

Fars. (1994) & Karvelas et al. (2003) Cité dans thèse de doctorat de Soumia AMIR en 2005 : « Contribution à la valorisation de boues de stations d'épuration par compostage : devenir des micropolluants métalliques et organiques et bilan humique du compost »

Grimaud L. (1995) La valeur azotée des boues d'épuration

Hébert M. (2005) Pathogènes dans les biosolides municipaux et autres MRF : normes et critères de bonnes pratiques. Agrosol ressources.

Igoud. (2001) Valorisation des boues résiduelles issues des stations d'épuration urbaines pour leur épandage dans les plantations forestières. Rev. Energ Ren: Production et Valorisation - Biomasse(ISSN 1112-2242), pages 69-74

Jackson D.V, Maillot. J.-M. & l'Hermite. P Composting and compost quality: assurance quality.

LASSE. C Analyses des boues, Tome 2 ; Etude de synthèse

Loi 28-00 Sur les déchets

M. T. Pardo, M. E. Ghadakix. (1995) Cadmium sorption by two acid soils as affects by clearing and cultivation. Commun.Soil Sci. Plant Anal., 26 pages 289-302.

Mc Graw-Hill. (1991) Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse-1334 p.

McKay, J. (2003) cité par Pathogènes dans les biosolides municipaux et autres MRF : normes et critères de bonnes pratiques. Agrosol ressources M. Hébert

Ministère de l'Intérieur, Ministère de l'aménagement de territoire, de l'eau et de l'environnement. (2005) Programme National d'assainissement liquide et d'épuration des eaux usées.

Ministère de l'agriculture, du développement rural et des eaux et forêts, Administration du génie rural, Direction du développement et de la gestion d'irrigation Jemali O., Kefati A. (2002) : Réutilisation des eaux usées au Maroc

Ministère de l'environnement et du développement durable, Office national de l'assainissement liquide, Coopération Tuniso-allemande ONAS-KFW. (Août 2006) Plan d'action pour la gestion des boues des stations d'épuration des eaux usées, Rapport final

Ministère de l'environnement et du développement durable, Office national de l'assainissement liquide, Coopération Tuniso-allemande ONAS-KFW. (Août 2006) : Etablissement des plans d'intervention pour la gestion des boues de dix stations d'épuration des eaux usées de l'ONAS

Morel. (1977), Morel et al. (1978), Colin. (1983) cité dans la thèse de doctorat Armel GUIVARCH Valeur fertilisante à court terme du phosphore des boues de stations d'épuration urbaines. Juin 2001

Payement. (1993), Brooks et coll. (2005) Cité dans « Pathogènes dans les biosolides municipaux et autres MRF : normes et critères de bonnes pratiques ». Agrosol ressources M. Hébert

Perron et Hébert. (2007) Caractéristiques des boues d'épuration municipales. Partie 1 : Caractéristiques agronomiques.

Philippe Du chaufour, 5^{ème} édition MASSON Abrégé de pédologie

Réveillé, Laurence Mansuy, Émilie Jardé, Évelyne Garnier-Sillam. (2003) Characterisation of sewage sludge-derived organic matter: lipids and humic acids. *Organic Geochemistry*, Volume 34, Pages 615-627.

Revue Energie Renouvelable: Production et valorisation biomasse. (2001) Valorisation des boues résiduelles issues des stations d'épuration des eaux usées par leur épandage dans les plantations forestières. Pages 69 à 74

Revue Ingénieries. (1999) Déshydratation des boues par lits de séchage plantés de roseaux, LIENARD A., CEMAGREF LYON QELY, n° 17, p. 33-45

Robin , Frédérique Ablain, Hiéronymus Yulipriyanto, Anne-Marie Pourcher, Thierry Morvana, Daniel Cluzeaub and Philippe Morand : Evolution of non-dissolved particulate organic matter during composting of sludge with straw.

Sommelier et al. (1996) Cité dans la thèse de doctorat Armel GUIVARCH Valeur fertilisante à court terme du phosphore des boues de stations d'épuration urbaines. Juin 2001

Soudi. (2001) Compostage des déchets ménagers et valorisation du compost; cas des petites et moyennes communes au Maroc.

Soudi. (2007) Boues résiduelles: Traitement et valorisation agricole.

Soudi. B & Chrifi H. (2007) Options de gestion des déchets solides municipaux adaptées au contexte des pays du sud.

SSSA Misc Publication Sewage sludge: land utilisation and the environment

3rd edition, Mc Graw-Hill, Inc. (1991) Waste water Engineering : Treatment, Disposal and Reuse

Traoré. (1998), Traoré et al. (1999) Cité dans la thèse de doctorat Armel GUIVARCH Valeur fertilisante à court terme du phosphore des boues de stations d'épuration urbaines. Juin 2001

USEPA. (1999) Pathogènes dans les biosolides municipaux et autres MRF : normes et critères de bonnes pratiques. Agrosol ressources M. Hébert

Web Références

www.sciencedirect.com

www.aginternetwork.org

www.gls.fr

www.ademe.fr

www.jle.com/fr/revues/agro_biotech/agr/e-docs

www.inist.fr

www.google.com

Annexes

Fiche Enquête 1

Station d'épuration des eaux usées de Taourirt

Identification de la STEP :

- Localisation : Ville de Taourirt, Nord-est du Maroc
- Situation : Aérienne
- Date de démarrage : 15 août 2006
- Population raccordée : 15747 EH
- Responsable de l'exploitation : Direction de l'assainissement de l'ONEP de la ville de Taourirt.

Filière eaux usées :

- Composition de la filière : Prétraitements+Traitement secondaire biologique (Lagunage) +Traitement tertiaire (Maturation)
- Procédé de traitement : Lagunage naturel
- Nombre de lagunes de traitement : 4 lagunes anaérobies, 3 lagunes facultatives et 2 lagunes de maturation
- Charge organique :
- Débit entrant : 5400 m³/j
- Composition effluents bruts : Rejets domestiques + Rejets industriels clandestins ; usine d'olives.
- Temps de séjour : 25 jours
- Analyses bactériologiques : Paramètres sur place : pH, T°C, O₂ dissous, CE
Paramètres au laboratoire : Azote Kjeldhal, PSP, MES, MVS, DCO, DBO₅
- Destination finale : Rejet dans le milieu récepteur ; Oued Za

Filière Boues résiduaires:

- Quantités produites : il n'y a pas eu encore de curage des lagunes.
- Ages : Station très récente, les boues n'ont pas encore été curées
- Types de boues : Boue fraîche extraite sur place du 1er bassin anaérobie.
- Procédé de traitement : Néant
- Destination actuelle : Stagnation dans les bassins de traitement
- Destination finale : séchage à l'air libre dans des lits de séchage
- Nombre de lits de séchage : 4

Filière Gaz:

- Néant

Traitement des Odeurs:

- Néant

Fiche Enquête 2

Station d'épuration des eaux usées de Tafoghalte

Identification de la STEP :

- Localisation : Ville de Tafoghalte, Nord-est du Maroc
- Situation : Aérienne
- Date de démarrage : 1^{er} juillet 2004
- Population raccordée : 800 EH
- Responsable de l'exploitation : Direction de l'assainissement de l'ONEP de la ville de Berkane.

Filière Eaux Usées :

- Composition de la filière : Prétraitements + Traitement primaire + Traitement secondaire biologique
- Procédé de traitement : Lits bactériens
- Nombre de bassins de traitement : 2 décanteurs, 7 lits bactériens avec 7 filtres
- Charge organique : Lits à faible charge
- Débit entrant : 50 à 70 m³/j
- Composition effluents bruts : Rejets d'eaux domestiques
- Temps de séjour : 3 jours
- Analyses bactériologiques : Paramètres au laboratoire : Azote Kjeldhal, PSP, MES, MVS, DCO, DBO₅
- Destination finale : Rejet dans le milieu récepteur ; Oued Rislane.

Filière Boues résiduaires:

- Quantités produites : 100 kg/an
- Ages : Boues vidangées mensuellement.
- Types de boues : Boues liquides.
- Procédé de traitement : Néant
- Destination finale : Rejet dans le milieu naturel.
- Destination actuelle : Rejet dans le milieu naturel

Filière Gaz:

- Néant

Traitement des odeurs:

- Néant

Fiche Enquête 3

Station d'épuration des eaux usées de Mriret

Identification de la STEP :

- Localisation : Ville de Mriret, Moyen Atlas du Maroc
- Situation : Aérienne
- Date de démarrage : Juin 2003
- Population raccordée : 31000 EH
- Responsable de l'exploitation : Direction de l'assainissement de l'ONEP de la ville de Mriret.

Filière Eaux Usées :

- Composition de la filière : Prétraitements+Traitement secondaire biologique.
- Procédé de traitement : Lagunage naturel
- Nombre de lagunes de traitement : 4 lagunes anaérobies et 4 lagunes facultatives
- Charge organique : 1500 Kg DBO₅/j
- Débit entrant : 2100 m³/j
- Composition effluents bruts : Rejets d'eaux usées urbaines à 98% domestiques.
- Temps de séjour : 35 jours
- Analyses bactériologiques: Paramètres sur place : pH, T°C, O₂ dissous, CE. Paramètres au laboratoire : Azote Kjeldhal, PSP, MES, MVS, DCO, DBO₅
- Destination finale : Rejet dans le milieu récepteur ; Oued Tighza.

Filière Boues Résiduaire:

- Quantités produites : Sondages 2005 : 26% à 35% du volume total du bassin de traitement.
- Ages : Essai d'un 1er curage de la première lagune anaérobie en juillet 2007
- Types de boues : Boue fraîche extraite du 1^{er} bassin anaérobie.
- Procédé de traitement : Néant
- Destination finale : Séchage à l'air libre sur lits de séchage
- Nombre de lits de séchage : 6
- Destination actuelle : Stagnation dans les lagunes de traitement

Filière Gaz:

- Néant

Traitement des Odeurs:

- Projet en cours en collaboration avec un bureau d'études français, pour le transfert de la couche superficielle des lagunes facultatives, aux lagunes anaérobies, empêchant ainsi le dégagement des mauvaises odeurs.

Fiche Enquête 4

Station d'épuration des eaux usées d'Ain Taoujdate

Identification de la STEP :

- Localisation : Ville d'Ain Taoujdate sise au Moyen Atlas du Maroc
- Situation : Aérienne
- Date de démarrage : Août 2004
- Population raccordée : 25000 EH
- Responsable de l'exploitation : Direction de l'assainissement de l'ONEP de la ville de Mriret.

Filière Eaux Usées :

- Composition de la filière : Prétraitements+ Traitement secondaire biologique (Lagunage).
- Procédé de traitement : Lagunage naturel
- Nombre de lagunes de traitement : 4 lagunes anaérobies et 2 lagunes facultatives
- Charge organique : 600 kg DBO₅/j
- Débit entrant : 1500 m³/j
- Composition effluents bruts : Rejets à 98% d'eaux domestiques
- Temps de séjour : 25 jours
- Analyses bactériologiques : Paramètres sur place : pH, T°C, O₂ dissous, CE
Paramètres au laboratoire : Azote Kjeldhal, PSP, MES, MVS, DCO, DBO₅
- Destination actuelle : Rejet dans le milieu récepteur : Oued Chaaba Ben Kazza.

Filière Boues résiduaires:

- Quantités produites : il n'y a pas eu encore de curage des lagunes.
- Ages : pas de curage déjà fait.
- Types de boues : Boues fraîches extraites sur place du 1^{er} bassin anaérobie.
- Procédé de traitement : Néant
- Destination actuelle : Stagnation dans les bassins de traitement.
- Destination finale : Séchage à l'air libre sur lits de séchage

Filière Gaz:

- Néant

Traitement des Odeurs:

- Néant

Fiche Enquête 5

Station d'épuration des eaux usées de Bouregreg

Identification de la STEP :

- Localisation : Ville de Rabat, nord ouest du Maroc.
- Situation : Aérienne
- Date de démarrage : Février 2001
- Population raccordée : 300 à 400 EH
- Responsable d'exploitation : Direction d'assainissement de l'ONEP de Rabat.

Filières Eaux Usées :

- Composition de la filière : Prétraitements+Filières intensive et extensive.
- Procédé de traitement : A boues activées et lagunage aéré.
- Analyses bactériologiques : Paramètres sur place : pH, T°C, O₂ dissous, CE
Paramètres au laboratoire : Azote (Kjeldhal, Organique, Ammoniacal), PO₄, NO₂, NO₃, MES, MVS, DCO, DBO₅, Examen microscopique, Biologiques.
- Destination actuelle : Rejet dans le milieu récepteur ; Oued Bouregreg.

1. Filière intensive : Boues activées

- Nombre de bassins de traitement : 1 répartiteur, 1 sur presseur d'air, 5 bassins d'aération, 1 décanteur secondaire et un recirculateur de boues.
- Charge organique : 9 kg DBO₅/j
- Débit entrant : 28 à 30 m³/j
- Débit moyen : 86 m³/j
- Débit de pointe : 259.2 m³/j
- Composition effluents bruts : Rejets d'eaux domestiques, et de bâtiments d'administration.
- Temps de séjour : Variable selon le type d'aération : forte charge, moyenne charge, faible charge

2. Filière extensive : Lagunage aéré

- Nombre de bassins de traitement : 4 lagunes aérées et 4 aérateurs de surface
- Charge organique : 15.8 Kg DBO₅/j
- Débit moyen : 259.2 m³/j
- Débit de pointe : 777 m³/j
- Composition effluents bruts : Rejets d'eaux domestiques, et de bâtiments d'administration.

Filière Boues Résiduaire:

- Quantités nominales produites : 7 à 10 kg/j
- Ages : 2001 à 2005 ; 2004-2005 ; 2006-2007 ; 7/11/2007 ; 16/11/2007.
- Types de boues : Boues liquides fraîches issues sur place du digesteur-épaississeur.
- Procédé de traitement : Epaissement et digestion aérobie.
- Destination finale : Séchées à l'air libre sur lits de séchages puis stockées.
- Nombre de lits de séchage : 3
- Destination actuelle : expérimentation d'amendement sur cultures : la tomate.

Filière Gaz:

- Néant.

Traitement des odeurs:

- Néant

Fiche Enquête 6

Station d'épuration des eaux usées de Drarga

Identification de la STEP :

- Localisation : Région d'Agadir, commune rurale Drarga
- Situation : Aérienne
- Date de démarrage : 30 octobre 2000
- Population raccordée : 8000
- Responsable d'exploitation : Direction d'exploitation et d'assainissement de l'ONEP de la ville d'Agadir

Filière Eaux Usées :

- Composition de la filière : Prétraitements+Traitement secondaire (Infiltration-Percolation) +Traitement tertiaire (Roselière)
- Procédé de traitement : Infiltration-Percolation avec variante de dénitrification.
- Nombre de bassins de traitement : 2 Bassins anaérobies, 2 bassins de dénitrification, 2 bassins tampon, 10 filtres à sable et une roselière.
- Charge organique : DBO_5 (mg O_2/l) = 886
- Débit entrant : 780 m^3/j
- Composition effluents bruts : Rejets d'eaux domestiques.
- Analyses bactériologiques : Paramètres sur place : pH, T°C, O_2 dissous, CE
Paramètres au laboratoire : Azote (Kjeldhal, Organique, Ammoniacal), PO_4 , NO_2 , NO_3 , MES, MVS, DCO, DBO_5 , Examen microscopique, Biologiques.
- Destination actuelle : Rejet dans le milieu récepteur : Oued Jmaa

Filière Boues Résiduaire :

- Quantités produites : 1645 m^3 de matière sèche.
- Ages : 07/2007, 29/11/2007
- Période de curage des bassins : 2 fois/an en moyenne.
- Réalisation du curage : 7 fois depuis l'installation de la STEP
- Types de boues : Boues séchées dans les lits de séchage, extraites auparavant des bassins anaérobies et boues fraîches extraites sur place du 1^{er} bassin anaérobie.
- Procédé de traitement : Séchés à l'air libre sur lits de séchage
- Nombre de lits de séchage : 1
- Destination finale : mises en décharge de la région.

Filière Gaz:

- Néant

Traitement des odeurs :

- Néant

Fiche Enquête 7

Station d'épuration des eaux usées de Tiznit

Identification de la STEP :

- Localisation : Ville de Tiznit, Doutouloua, Sud du Maroc.
- Situation : Aérienne
- Date de démarrage : Juin 2006
- Population raccordée : 85% de la population totale de Tiznit
- Responsable d'exploitation : Direction de l'assainissement de l'ONEP de la ville de Tiznit.

Filière Eaux Usées :

- Composition de la filière : Prétraitements +Traitement secondaire biologique (Lagunage naturel) +Traitement tertiaire (Maturation).
- Procédé de traitement : Lagunage naturel.
- Nombre de lagunes de traitement : 4 lagunes anaérobies, 4 lagunes facultatives et 3 lagunes de maturation
- Charge organique :
- Débit entrant : 1309 m³/j
- Composition effluents bruts : Rejets d'eaux domestiques, mélangées avec les rejets de l'abattoir local et les stations de service.
- Temps de séjour : Lagunes anaérobies : 3.13 jours, Lagunes facultatives : 24.3 jours en conditions hivernales et 18.7 jours en conditions saisonnières.
- Analyses bactériologiques : Paramètres sur place : pH, T°C, O2 dissous, CE
Paramètres au laboratoire : Azote (Kjeldhal, Organique, Ammoniacal), PO₄, NO₂, NO₃, MES, MVS, DCO, DBO₅, Examen microscopique, Biologiques.
- Destination actuelle : Rejet dans le milieu récepteur : Oued Sidi Abderrahmane.

Filière Boues Résiduaire:

- Quantités produites : il n'y a pas eu encore de curage des lagunes.
- Ages : Station très récente, les boues n'ont pas encore été curées
- Types de boues : Boues fraîches extraites du 1er bassin anaérobie le 30/11/2007.
- Destination actuelle : Stagnation dans les bassins de traitement.
- Destination finale : séchage à l'air libre dans des lits de séchage.
- Nombre de lits de séchage : 2

Filière Gaz:

- Néant

Traitement des Odeurs:

- Néant

Fiche Enquête 8

Station d'épuration des eaux usées de Skhirat

Identification de la STEP :

- Localisation : Ville de Skhirat
- Situation : Aérienne
- Date de démarrage : 19 juin 2003
- Population raccordée : 63500 EH
- Responsable de l'exploitation : Direction d'exploitation et d'assainissement (REDAL).

Filière Eaux Usées :

- Composition de la filière : Prétraitements+Traitement primaire+Lagunage
- Procédé de traitement : Lagunage naturel
- Nombre de lagunes de traitement : 3 lagunes facultatives et 6 lagunes de maturation.
- Charge organique : 950 kg DBO₅/j
- Débit entrant : 900 m³/j
- Capacité hydraulique nominale : 6000 m³/j
- Composition effluents bruts : Eaux usées urbaines de la ville de Skhirat, surtout des rejets domestiques
- Analyses bactériologiques : Paramètres sur place : pH, T°C, O₂ dissous, CE
Paramètres au laboratoire : Azote Kjeldhal, PSP, MES, MVS, DCO, DBO₅
- Destination finale : Rejet dans le milieu récepteur ; Oued Cherrate

Filière Boues Résiduaire:

- Quantités nominales produites : 1 tonne de MS/j
- Ages : 20/11/07 ; 02/12/07 ; 07/12/07 ; 26/12/07
- Types de boues : boues fraîches liquides issues de la digestion anaérobie
- Procédé de traitement : Digestion anaérobie
- Destination finale : séchage à l'air libre sur lits de séchage
- Nombre de lits de séchage : 6
- Destination actuelle : épandage agricole par la population riveraine.

Filière Gaz:

- Type de procédé : Gazomètre
- Brûlage du gaz : avec torchère

Traitement des Odeurs:

- Type de désodorisation : Chimique
- Procédé odeurs : Tour à adsorbant par charbon actif.

Fiche Enquête 9

Station d'épuration des eaux usées d'Agadir

Identification de la STEP :

- Localisation : Ville d'Agadir, Sud-ouest du Maroc
- Situation : Aérienne
- Date de démarrage : 1993
- Population raccordée : 350000 EH
- Responsable de l'exploitation : Régie Autonome Multi Services d'Agadir (RAMSA)

Filière eaux usées :

- Composition de la filière : Traitement primaire (Décanteurs) +Traitement Secondaire Infiltration percolation (Filtres à sable)
- Procédé de traitement : Lagunage naturel
- Nombre de lagunes de traitement : 4 lagunes anaérobies, 3 lagunes facultatives et 2 lagunes de maturation
- Abattement de la charge organique : 40 à 60%
- Débit entrant épuré : 10000 m³/j
- Composition effluents bruts : Rejets domestiques ; déchets poissonneux ; pollution industrielle
- Temps de séjour : 2,5 jours
- Analyses bactériologiques : Paramètres sur place : pH, T°C, O₂ dissous, CE
Paramètres au laboratoire : Azote Kjeldhal, PSP, MES, MVS, DCO, DBO₅
- Destination finale : Rejet dans le milieu récepteur.

Filière Boues résiduaires:

- Ages : différents âges du fait de l'ancienneté de la station
- Types de boues : Boue digérées.
- Procédé de traitement : Digestion (Digesteur)
- Destination actuelle : Stagnation dans les décanteurs
- Destination finale : séchage à l'air libre dans des lits de séchage

Filière Gaz:

- Néant

Traitement des Odeurs:

- Néant

Analyse des boues

Analyse n° :

Date de l'échantillonnage :

Date de l'analyse :

Teneur en matières sèches :

Valeur pH :

Teneurs en éléments nutritifs :	% Matière solide Matière originale	%Matière solide Matière sèche	Kg/t Matière solide Matière originale
Substance organique			
Azote total (N)			
Azote ammoniacal (NH ₄ -N)			
Phosphate (P ₂ O ₅)			
Oxyde de potassium (K ₂ O)			
Matière basique comme la chaux (CaO)			
Oxyde de magnésium (MgO)			

Métaux lourds :	Teneurs originales (mg/kg MS)	Valeurs limites	Rapport entre valeurs limites et teneurs originales
Plomb (Pb)			
Cadmium (Cd)			
Chrome (Cr)			
Cuivre (Cu)			
Nickel (Ni)			
Mercure (Hg)			
Zinc (Zn)			

Pouvoir calorifique

Taux d'humidité

Perte au feu