



UNIVERSITE CADI AYYAD

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES MARRAKECH

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

Mémoire de fin d'études

Licence es Science et Technique

EAU ET ENVIRONNEMENT

LST EE

**Caractérisation des boues déshydratées de la
Station d'Épuration des Eaux usées de
Marrakech. Application à la valorisation.**

Réalisé par :

Majda KHELLALI

Maryem OUTAHAR

Encadré par :

Pr. Khadija EL HARIRI (FST Marrakech)

Pr. Aicha REDDAD (FST Marrakech)

Mr. Yassine BISSI (STEP)

Soutenu le 17 Juin 2015 devant le jury :

Pr. Khadija EL HARIRI : Faculté des sciences et techniques – Marrakech

Pr. Aicha REDDAD : Faculté des sciences et techniques – Marrakech

Pr. Nadia KHAMLI : Faculté des sciences et techniques – Marrakech

Année Universitaire : 2014 – 2015

Remerciements

Avant tout développement sur cette expérience professionnelle, il apparaît opportun de commencer ce rapport par des remerciements :

En premier lieu nous remercions nos encadrants Madame Khadija EL HARIRI et Madame Aïcha REDDAD, qui ont suivi de près. Nous les remercions également pour toutes leurs suggestions pour orienter et améliorer notre travail.

Nous adressons ma reconnaissance à Mr. DAOUDI d'avoir accepté de nous accueillir parmi les étudiants chercheurs au Laboratoire FST. Nous adressons aussi nos vifs remerciements à tout le corps professoral du Département des Sciences de la Terre de la Faculté des Sciences et Techniques.

Nous remercions aussi Monsieur Abdeljalil, préparateur au laboratoire à la Faculté des Sciences SEMLALIA pour son accueil au sein du laboratoire.

Nous remercions par ailleurs l'ensemble des membres du jury de nous avoir fait l'honneur de juger notre travail et d'assister à la soutenance de notre projet.

On tient aussi à remercier le président du RADEEMA Monsieur Rachid BENCHIKHI, Madame la directrice des ressources humaines Ilham BOUBEKRAOUI et nos encadrants : Monsieur Yassine BISSI, chef de division assainissement et réutilisation ; et Monsieur Tarik AL MANSOUR : chef de division STEP, pour leur accompagnement tout au long du stage, leur bienveillance et leur aide.

Enfin nous remercions l'ensemble du personnel de la division de la STEP pour leur coopération à fin de nous avoir permis de vivre une expérience enrichissante et pleine d'intérêts.

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail :

- ✓ A nos Chers parents, qui sans leur soutien et leur aide on n'aurait pas pu nous présenter aujourd'hui devant vous

- ✓ A nos Frères et Sœurs

- ✓ A tous les membres de nos familles

- ✓ A nos merveilleux (ses) amis (es)

- ✓ Et à toutes les personnes qui nous aiment

Table des matières

Liste des photos.....	1
Liste des figures	2
Liste des tableaux.....	3
Liste des abrviations	4
Problématiques et objectifs du travail.....	7
I. Introduction.....	8
I-1. L'établissement d'accueil	8
I-2. Situation géographique de STEP	9
I-3. Choix de site	9
I-4. Les missions de la STEP	10
I-5. Capacité de traitement de la STEP	10
Chapitre 1 : Traitement des eaux usées	
I. Traitement des eaux usées	12
I-1. Prétraitement	12
I-1-1. Dégrillage.....	12
I-1-1. Déssablage , déshuillage	13
I-2. Traitement primaire	13
I-3. Traitement biologique ou secondaire	13
I-3-1. Les bassins d'aérations ou biologiques	14
I-3-1-1. Nitrification	14
I-3-1-2. Dénitrification	14
I-3-2. Les clarificateurs	14
I-4. Traitement tertiaire	15
II. Traitement des boues	15
II -1. Epaissement	15
II-1-1. Epaissement gravitaire des boues primaires.....	15
II-1-2. Flottation des boues secondaires.....	16
II-2. Stabilisation chimique des boues par la digestion anaérobie	16
II-3. Stockage des boues digérées	16
II-4. Déshydratation par filtres à bandes	17
III. Traitement des biogaz	17
IV. Désodorisation :.....	18
Chapitre 2 : Production des boues déshydratées	
I. Généralité.....	20

I-1. Définition et origine de la boue :	20
I-2. Caractéristiques physico-chimiques des boues :	20
I-3. Composition des boues résiduelles :	20
I-4. Les différents types des boues :	21
I-5. Les différents types de traitement des boues	21
II. Ligne de traitement des boues.....	22
II-1. Epaissement	22
II-1-1. Epaissement gravitaire.....	22
II-1-2. Epaissement par flottation (dynamique).....	22
II-2. Digestion (méthanisation).....	23
II-3. Stockage	24
II-4. Déshydratation mécanique par filtres à bandes.....	25
Chapitre 3 : Analyses et valorisation des boues déshydratées	
I. Introduction	28
II. Matériels et méthodes	29
II-1. Matière sèche (siccité)	29
II-2. La Teneur en eau.....	29
II-3. La calcimétrie.....	30
II-4. La Matière organique.....	31
II-5. Les éléments traces métalliques.....	31
III. Résultats et interprétation	32
III-1. Les résultats des analyses d'éléments traces métalliques	32
III-2. Les résultats des analyses géochimiques et agronomiques	33
III-3. Interprétations	33
IV. procédés d'élimination et valorisation des boues de STEP.....	34
IV-1. Incinération.....	34
IV-2. Séchage.....	36
V. Valorisation et élimination.....	37
V-1. Le compostage	37
V-1-1. Le principe de compostage	37
V-1-2. Les étapes de compostage des boues	37
V-1-2-1. Réception et mélange au coproduit	37
V-1-2-2. Mise en silo de fermentation	37
V-1-2-3. Contrôle des températures	37
V-1-2-4. Retournement	37
V-1-2-5. Criblage	37
V-1-2-6. Maturation	38

V-1-2-7. Épandage	38
V-2. Cimenterie.....	38
Conclusion générale	39
Annexes.....	40
Bibliographie et web-graphie.....	48

Liste des figures

Figure 1: Carte de localisation de la STEP.....	15
Figure 2:Modèle de STEP avec les trois filières (RADEEMA 2009).....	18
Figure 3:Coupe longitudinal d’un épaisseur gravitaire	28
Figure 4:Coupe longitudinal d'un digesteur anaérobie	29
Figure 5:Schéma explicative du processus de la digestion anaérobie	30
Figure 6:Filtre-presse à bande (Manuelle processus phase2).....	31
Figure 7:La variation des boues déshydratées déchargées en 2014 et 2015.....	34
Figure 8: Histogramme de la teneur en ETM de l’échantillon du 08/06/2015	39
Figure 9:Four à lit fluidisé. (Images du moteur de recherche Google)	41
Figure 10:Schéma du fonctionnement d'une serre fermé. (outilssolaire.com)	42
Figure 11:Les différentes étapes de production d’un compost. (STEP-plaquette.pdf).....	44

Liste des photos

Photo 1: Station de traitement des eaux usées Marrakech.....	15
Photo 2: Le dégrilleur (10cm, 8cm, 1cm).....	18
Photo 3: Le déssableur et le déshuileur	19
Photo 4: Les bassins circulaires de la décantation primaire	19
Photo 5: Les quatre bassins biologiques.....	20
Photo 6: Le bassin de décantation secondaire « Clarificateur »	20
Photo 7: Filtre à sable.....	21
Photo 8: Epaisseur gravitaire.....	21
Photo 9: Digesteur	21
Photo 10: Stockeur boues	21
Photo 11: Le rouleau du filtre à bandes.....	21
Photo 12: Les boues déshydratées.....	21
Photo 13: Gazomètre	21
Photo 14: Désulfurisation.....	21
Photo 15: Cogénérateur.....	21
Photo 16: Le stockeur.....	31
Photo 17: Filtre à bandes	32
Photo 18: Mesure de la matière sèche des boues déshydratées.....	35
Photo 19: Calcimètre de Bernard	36
Photo 20: Mesure de la matière organique des boues	37
Photo 21: Analyseur portable des matériaux.....	38

Liste des tableaux

Tableau 1: Capacité de traitement	16
Tableau 2: Les normes fixées dans le cahier de charge de RADEEMA relative à la STEP	16
Tableau 3: Les caractéristiques physico-chimiques des boues.....	26
Tableau 4: Composition des boues résiduaires	27
Tableau 5: Les différents types de boues	27
Tableau 6: Les différents types de traitement des boues	27
Tableau 7: Résultats des analyses des ETM de la STEP de Marrakech 2015.....	38
Tableau 8: Résultats d’analyse de la valeur agronomique et géochimique	39

Liste des abréviations

RADEEMA : Régie Autonome De Distribution d'Eau Et d'Electricité De Marrakech

STEP : Station D'épuration Des Eaux Usées

MES : La Matière En Suspension

DBO5 : La Demande Biologique En Oxygène

DCO : La Demande Chimique En Oxygène

NTK : L'azote

PT : Le Phosphore

UV : Ultra Violet

MVS : Matières Volatiles Sèches

MO : Matière Organique

AGV : Des Acides Gras Volatils

ETM : Élément trace métallique

FS : Faculté des sciences

FST : Faculté des sciences et techniques

ETM : Élément traces métalliques

FAB : Filtre à bandes

Problématiques et objectifs du travail

Les stations d'épuration ont pour rôle d'éliminer la pollution contenue dans les effluents domestiques avant leur rejet dans le milieu naturel (oued, rivière ..) . En fin du traitement des eaux usées, la pollution initiale se retrouve en partie stockée et concentrée dans les boues issues des diverses étapes de traitement des eaux usées. Ces boues sont donc considérées comme des déchets et peuvent être néfastes s'ils ne sont pas traités.

Ces boues sont souvent évacuées sans traitement dans la nature et posent un sérieux problème aux gestionnaires du secteur de l'assainissement liquide et des stations d'épuration. En effet la réalisation de ces opérations demeure complexe et coûteuses.

La stratégie actuelle du secteur est focalisée sur le traitement, la gestion et la valorisation de ces boues en vue d'un usage rentable que ce soit dans le domaine de l'agriculture ou de l'industrie.

Au niveau de la station d'épuration des eaux usées de Marrakech, les boues subissent plusieurs traitements. En effet la digestion anaérobie permet à la fois de stabiliser et de récupérer du biogaz qui sera utilisé dans la production de l'électricité nécessaire au fonctionnement de la station d'épuration.

Cependant les quantités des boues produites restent importantes même après digestion et déshydratation. Plus de 140 tonnes par jour sont évacués directement dans les décharges publiques. Ce qui présente un grand risque de pollution de l'environnement.

Actuellement les modes d'élimination des boues adoptés au niveau des stations d'épuration dans le monde entier sont:

- Le séchage
- La valorisation agronomique
- Les valorisations énergétiques
- L'incinération

Ce travail a pour objectif d'étudier les compositions des boues déshydratées produites au niveau de la STEP en vue de proposer des solutions de remédiation à ce problème.

Ce rapport comporte 3 chapitres :

- Le 1^{er} chapitre c'est la partie bibliographique, il présente des généralités sur la station et les différentes étapes suivies pour le traitement fait au sein de cette station.
- Le 2^{ème} chapitre illustrera la ligne boue, et le traitement qu'elle subit pour diminuer sa siccité dans la station.
- Et le 3^{ème} chapitre sera consacré aux résultats des analyses réalisées sur des échantillons de boues déshydratées provenant de la STEP de Marrakech faites au sein de la Faculté des Sciences SEMLALIA et la Faculté des Sciences et Technique de Marrakech, et aux technologies de traitement de valorisation des boues résiduelles utilisées dans les pays développés.

I. Introduction :

Marrakech est parmi les grandes villes du Maroc, elle compte plus d'un million d'habitants, son tourisme a beaucoup contribué au développement urbanistique et démographique que connaît la ville depuis quelques années.

Marrakech connaît un grand essor et de multiples chantiers y sont ouverts. Ceci se répercute forcément sur sa demande en eau, il fallait donc trouver la solution durable permettant de faire face au besoin de développement urbain.

Pendant plusieurs longues années, les eaux usées de Marrakech ont été déversées dans les oueds, les palmeraies, les champs de pendages sans avoir subi le moindre traitement, et ces 100 000 m³ d'eaux usées venaient chaque jour et cause des problèmes de pollution de l'environnement notamment pour les nappes souterraines, et surtout augmenter pour la population les risques des maladies liée à l'eau pollué.

Dés 1998 la RADEEMA à pris la problématique et concentrer ces efforts sur l'assainissement liquide dans la région, cette initiative s'est décliné sous la forme de deux objectifs :

- La restructuration du réseau d'assainissement des eaux usées de Marrakech, parce que ces eaux ne doivent pas être déversées telles quelles est dans la nature, il faut les traiter.
- L'installation d'un traitement plus poussé afin de pouvoir utiliser l'eau à des fins d'irrigations.



I-1. L'établissement d'accueil :

La régie autonome de la distribution d'eau et d'électricité de Marrakech « RADEEMA » est un établissement chargé d'assurer la distribution d'eau et d'électricité et la gestion du service d'assainissement liquide au sein de la ville Marrakech.

La régie a été créée le 01 janvier 1971, sa mission et sa préoccupation majeure est d'accompagner le développement important que connaît la ville de Marrakech, et d'assurer la sécurité de l'approvisionnement et la bonne gestion des services assurés.

Le cadre environnemental et écologique est au centre des actions engagées par la RADEEMA notamment le traitement et la réutilisation des eaux usées.

Ainsi les principales actions entreprises ont porté sur le renforcement des infrastructures de base, la sécurisation de l'alimentation en eau et en électricité, la lutte contre la pollution du milieu récepteur et la protection de l'environnement et la généralisation de l'accès aux services assurés et ce dans le cadre de l'initiative nationale du développement humain.



Photo 1: Station de traitement des eaux usées Marrakech

I-2. Situation géographique de STEP :

La station d’épuration des eaux usées de la ville de Marrakech est située au nord de la ville de Marrakech. Orientée selon un axe Nord / sud, parallèle à la route de Safi, sur le lit Majeur de l’Oued Tensift à proximité du quartier industriel SIDI GHANEM et le quartier urbain El AZZOUZIA, sur une superficie de 17 ha.

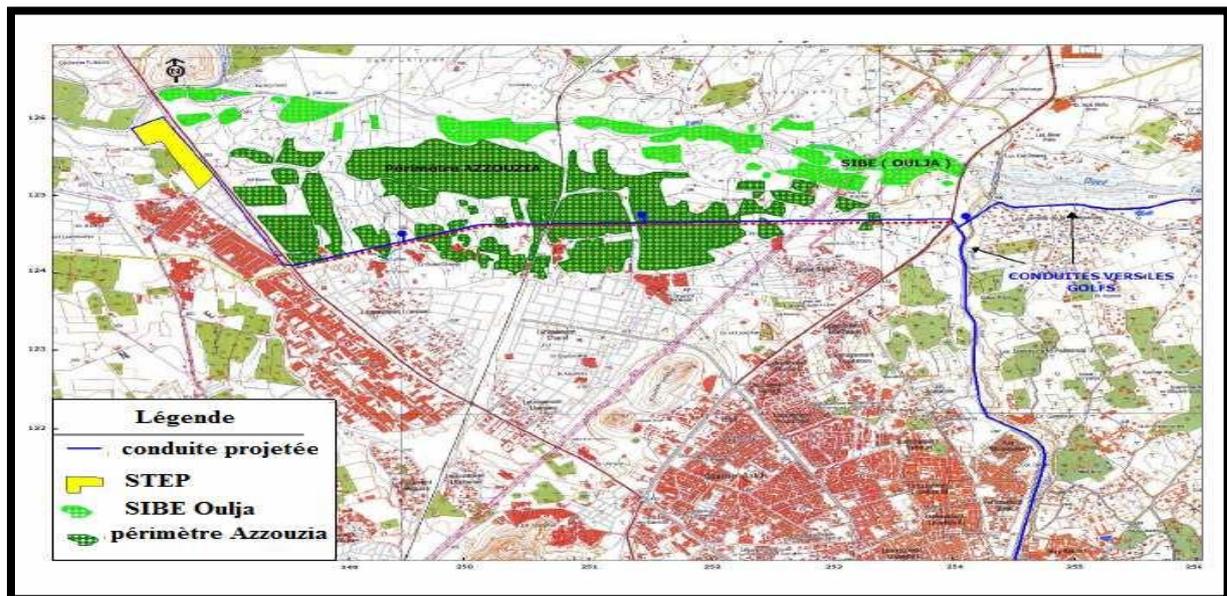


Figure 1: Carte de localisation de la STEP

I-3. Choix de site :

Le choix du site de la station s’est basé sur plusieurs facteurs tels que :

les facteurs climatiques : la station est installée à la sortie au Nord de la ville parallèlement à la direction du vent pour que les odeurs émis par les eaux au cours du traitement n’aient aucune nuisance pour la population.

Aussi il y a **les facteurs topographiques** : la STEP est implanté sur un site dont sa cote la plus basse permet la collecte et le transport gravitaire des eaux usées, et par sa situation très proche de la décharge publique prévue pour l’évacuation des déchets du prétraitement et des boues déshydratées.

I-4. Les missions de la STEP :

La STEP est une station de traitement des eaux usées de Marrakech (les eaux domestiques, les eaux industrielles et les eaux pluviales) qui arrivent à la STEP par un réseau d’assainissement, et les traitées avant de les rejetées dans le milieu naturel pour diminuer les risques de ces eaux usées sur l’environnement et la santé publique, et parmi ses objectifs aussi la constitution d’une source renouvelable pour l’irrigation des terrains de golf.

I-5. Capacité de traitement de la STEP :

Débit	90720 m ³ /Jour
MES	53t/Jour
DBO5	58t/Jour
DCO	144t/Jour

Tableau 1:Capacité de traitement

Les paramètres de qualité de l’eau à l’entrée de la station et à la sortie de chaque étape de traitement sont indiqués sur le tableau suivant :

Paramètres de qualité	Entrée STEP	Traitement Primaire	Traitement secondaire	Traitement Tertiaire
MES (mg/l)	584	200	30	5
DBO5 (mg/l)	640	430	30	10
NTK (mg/l)	120	120	5	5
PT (mg/l)	22	22	20	10
Germes fécaux	10 ⁷ U//	10 ⁷ U//	10 ⁶ U//	2.10 ³ U//

Tableau 2:Les normes fixées dans le cahier de charge de RADEEMA relative à la STEP

Chapitre 1: Traitement des eaux usées

I. Traitement des eaux usées :

Le principe de ce traitement est de faire passer les eaux usées collectés par écoulement gravitaire dans une succession d’étapes :

- | | | |
|---|---|---|
| <p>➤ Filière eau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Prétraitement - Traitement primaire - Traitement secondaire - Traitement tertiaire | <p>➤ Filière boue :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Epaissement - Digestion - Stockage - Déshydratation | <p>➤ Filière biogaz</p> <ul style="list-style-type: none"> - Traitement de biogaz |
|---|---|---|

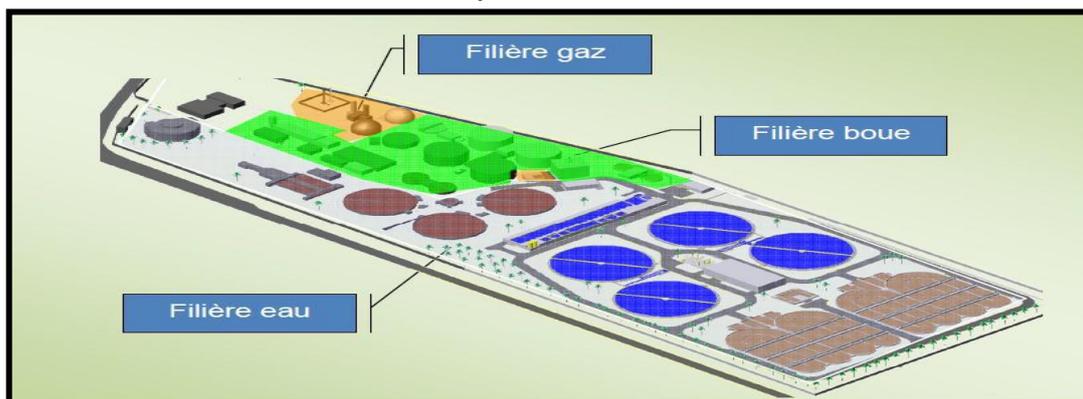


Figure 2:Modèle de STEP avec les trois filières (RADEEMA 2009)

I-1. Prétraitement :

Les dispositifs de prétraitement font appel à des procédés mécaniques manuel simples et leur but c’est protéger la station par l’élimination des éléments solides ou particulaires les plus grossiers (plastique , gravier ...)

On trouve avant le dégrillage **une fosse à bâtard** de volume 4.5 m³ qui sert de piège pour les corps grossiers afin d’alléger les pressions sur les éléments en aval, son curage est fait manuellement par un opérateur à l’aide d’un grappin. Les éléments piégés ont généralement des dimensions très importantes (squelettes des animaux, troncs d’arbres ...)

I-1-1. Dégrillage :

Le dégrillage permet de retenir les déchets volumineux à l’aide d’une succession de grilles de plus en plus fines (10cm, 8cm, 1cm), de compacter et drainer les refus de dégrillage et les évacuer. Le nettoyage des grilles est fait par des moyens soit mécaniques, soit manuels ou automatiques.

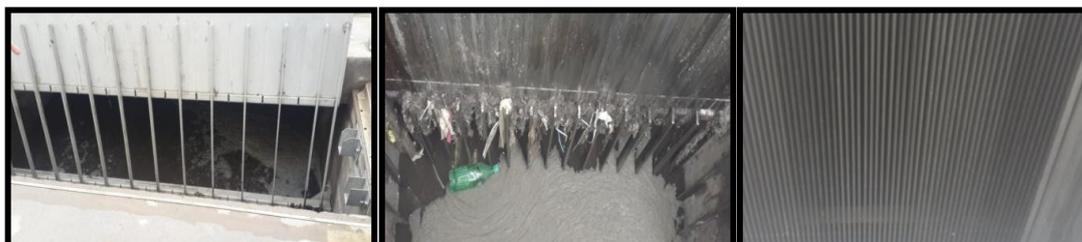


Photo 2: Le dégrilleur (10cm, 8cm, 1cm)

I-1-2. Dessablage-déshuilage :

Le dessablage et le déshuilage-dégraissage consistent ensuite à faire passer l'eau gravitaire dans des bassins où la réduction de vitesse d'écoulement fait déposer les sables et flotter les graisses. L'injection des microbulles d'air à la base du bassin et la surface permet d'accélérer la flottation des graisses et permet aussi le brassage. Les sables sont récupérés par pompage alors que les graisses sont raclées en surface.

Les éléments grossiers et les sables, ainsi que 80 à 90 % des graisses et matières flottantes sont ainsi enlevés de l'eau.



Photo 3: Le déssableur et le déshuileur

I-2. Traitement primaire :

Les eaux prétraités en ce stade rejoignent un répartiteur dont la fonction est de répartir le débit de manière égale sur les trois décanteurs circulaires, après le prétraitement, il reste dans l'eau une charge polluante dissoute et des matières en suspension.

Le traitement primaire ne porte que sur les matières particulaires décantables. Il a pour but d'extraire le maximum de matières en suspension et de matières organiques facilement décantables. Par la voie physique, le principe de séparation **solide-liquide** est la pesanteur et par l'injection des microbulles d'air pour assuré le brassage. Les matières en suspension ou colloïdales tendent à se séparer du liquide par sédimentation. La DCO et la concentration en azote peuvent également être réduites durant cette phase. La pollution dissoute n'est que très partiellement traitée. Les matières solides extraites représentent ce que l'on appelle **les boues primaires**.

I-3. Traitement biologique ou secondaire :

Au cours de cette deuxième phase, les particules organiques (polluants dissous ou solubles) et les nutriments (azote et phosphore) sont éliminés par des microorganismes.



Photo 4: Les bassins circulaires de la décantation primaire

I-3-1. Les bassins d'aération ou biologique :

Au cours de cette deuxième phase, les particules organiques (polluants dissous ou solubles , par exemple DCO et DBO5) et les nutriments (azote et phosphore) sont éliminés par des microorganismes. L'eau décantée passe par un répartiteur pour s'écoule gravitairement vers quatre **bassins biologiques**, quatre supprimeurs assurent l'aération pour les microorganismes de chaque bassin biologique pour réalisé la nitrification-dénitrification pour la dégradation de l'azote :

I-3-1-1. Nitrification :

Il s'agit de l'oxydation de l'ammoniaque (NH_4^+) contenu dans NTK en nitrite (NO_2^-), puis en nitrate (NO_3^-) par des bactéries nitrifiantes en présence d' O_2 .



I-3-1-2. Dénitrification:

Cette étape consiste à dénitrifier les nitrates résultants de la nitrification, les nitrates sont réduits en diazote (N_2) qui s'échappe dans l'air, et cette dénitrification ce fait par des bactéries dénitrifiantes en absence d' O_2 .



Photo 5: Les quatre bassins biologiques

I-3-2. Les clarificateurs:

L'eau est ensuite laissée au repos durant environ 9 heures et demi dans quatre **clarificateurs** circulaires gravitaires volume total utile de 40.000 m³ et d'un diamètre de 54m et 4m de hauteur. L'eau et les boues biologiques s'y séparent par décantation alors que l'eau claire sort par les goulottes de débordement. L'eau après cette phase secondaire est conforme aux normes de rejet pour qu'il soit rejeté dans l'oued, et une partie passe au traitement tertiaire pour l'utiliser à l'irrigation des terrains de golf.



Photo 6: Le bassin de décantation secondaire « Clarificateur »

I-4. Traitement tertiaire :

Le traitement tertiaire consiste à une *coagulation* et une *floculation*, suivies d'une *filtration sur sable* et à la fin une *désinfection en UV* puis une *chloration*.

Du chlorure ferrique est injecté dans les coagulateurs et du polymère dans les floculateurs. Le chlorure ferrique (FeCl_3) en solution est ajouté pour assurer une meilleure formation de floccs. Les 5 filtres de sable permettent l'élimination finale des matières en suspension qui restent dans l'effluent déjà purifié. Après la filtration sur sable, l'effluent clair s'écoule à travers deux voies de désinfection UV parallèles pour l'élimination des germes pathogènes présents dans l'eau. Après la désinfection UV, la chloration a lieu. Le bâtiment de stockage de chlore contient dix réservoirs fixes de chlore et six citernes de réserve. Le chlore est ajouté à l'eau grâce à un système de dosage.

L'eau traitée passe par un canal et s'écoule vers la lagune, puis les 5 pompes seront chargées à pomper l'eau vers les 4 autres stations pour assurer la distribution vers les 13 terrains de golf.



Photo 7: Filtre à sable

II. Traitement des boues :

Les boues d'épuration (urbaines ou industrielles) sont les principaux déchets produits par une station d'épuration à partir des effluents liquides. Ces sédiments résiduels sont surtout constitués de bactéries mortes et de matière organique minéralisée.

II-1. Épaississement :

L'épaississement est la première étape de la réduction de volumes des boues extraites de la filière eau. Les procédés utilisés sont l'épaississement par décantation gravitaire pour les boues primaires et l'épaississement par flottation pour les boues secondaires :

II-1-1. L'épaississement gravitaire des boues primaires :

La boue primaire est caractérisée par une densité très importante qui a subi l'épaississement gravitaire dans un épaisseur pour augmenter la concentration des matières sèches dans la boue en préparation à sa digestion.



Photo 8 : Epaisseur gravitaire

II-1-2. Flottation des boues secondaires:

La flottation est basée sur l'injection d'un polymère et de l'air pressurisé dans les boues secondaire issue des bassins biologiques, ce qui sépare les phases liquides et solides par différence de densité.

Dans le cas de la station de Marrakech, on dispose de deux flottateurs, la concentration moyenne des boues flottées est de 40g/l.

II-2. Stabilisation chimique des boues par la digestion anaérobie :

Dans cette étape quatre digesteurs de capacité de 6000 m³ chacun sont prévus portés à 37°C, ces ouvrages permettent la digestion des boues provenant des boues d'épaississement, les boues flottantes et les graisses traités. La production de biogaz servent à la fois au brassage des boues aux digesteurs.

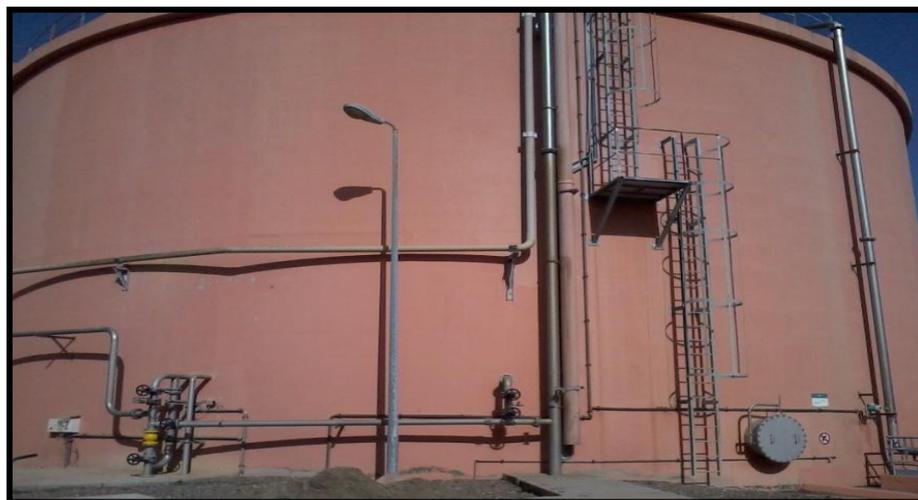


Photo 9 : Digesteur

II-3. Stockage des boues digérées :

Après la digestion, la boue est envoyée vers les stockeurs puis elle subir une déshydratation par des filtres à bandes et finalement transportée vers un terrain à côté de la décharge.



Photo 10 : Stockeur boues

II-4. Déshydratation par filtres à bandes :

Les boues digérées sont pompées vers 5 filtres à bandes. Du polymère est injecté sur chaque filtre, et de la chaux. La boue est emprisonnée entre deux toiles filtrantes qui la compriment progressivement, l'enroulant successivement autour de tambours perforés puis de rouleaux disposés en quinconce (photo10). Le départ de l'eau est facilité par les contraintes de cisaillement de la boue au passage des rouleaux et peut s'effectuer alternativement d'un coté puis de l'autre du tapis.

L'objectif du filtrage est d'augmenter la siccité des boues en la faisant passer de 2 à 25% afin de faciliter son transport, et diminuer les nuisances qu'elle peut engendrer à l'état liquide. La destination finale des boues séchées est la décharge publique de Marrakech.



Photo 11: Le rouleau du filtre à bandes



Photo 12: Les boues déshydratées

III. Traitement des biogaz :

Le biogaz venant des digesteurs passe par *la désulfuration* (photo14) pour éliminer le H₂S. Le biogaz produit dans les digesteurs (20 000 m³/j) est utilisé pour générer de l'électricité par les quatre unités de *cogénération* (photo15) (800 KV chacune). La station dispose d'un système de cogénération d'énergie électrique de l'ordre de 30 000 KWh par jour. 45% de la consommation totale en électricité de la station est assurée par ce système.

Le biogaz produit dans les digesteurs contenant 70% de CH₄, 25% de CO₂, 4% de H₂S et 1% des autres gaz.



Photo 8: Gazomètre



Photo 9: Désulfurisation



Photo 10: Cogénérateur

IV. Désodorisation :

Le traitement des eaux usées conduit des odeurs désagréables, Dans les stations, les nuisances sont principalement dues à la présence de composés sulfurés, déjà formés dans le réseau d'acheminement des eaux et à la présence de composés azotés. Les composés sulfurés, représentent la majorité de l'air vicié venant des étapes de prétraitement, épaisseur et déshydratation des boues, alors que les composés azotés sont principalement localisés au niveau du traitement des boues. Pour éviter la propagation des odeurs dans les ouvrages adjacents, et pour assurer un environnement de travail sain et sécurisé, tous les risques de dégagement de gaz malodorants seront minimisés par l'implantation de deux installations de traitement des odeurs (65 000m³/h), la première est une désodorisation biologique par biofiltre et la deuxième est une désodorisation physicochimique.

Chapitre 2 :

La production de la boue déshydratée

I. Généralité :

I-1. Définition et origine de la boue :

Les boues de la station sont des boues résiduaires, qui résultent de traitement des eaux usées en aval. Ces boues peuvent être de différentes origines :

- Des eaux industriels pouvant contenir des matières organiques (des effluents d’abattoirs ou de fermentations), et inorganiques (composés toxiques, métaux lourds, etc.)
- Les eaux usées domestiques produisent des boues décantables (boues de traitement primaire) caractérisées par de mauvaises odeurs et un pourcentage en eau de 94 à 98% et 1,5 à 2,5% de matières solides.

Les boues sont produites par une simple décantation des matières en suspension (MES) contenues dans les eaux usées. 70% des MES peuvent ainsi être retenues.

Les Boues secondaires contenant particulièrement un film microbien sont plus stabilisées que les boues primaires avec 6 à 8% de matières sèches.

I-2. Caractéristiques physico-chimiques des boues :

Caractéristiques physico-chimiques des boues		
Caractéristiques physiques	Caractéristiques chimiques	
	Siccité	Matière sèche volatile
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Liquidité ✓ Plasticité ✓ Friabilité ✓ Adhérence ✓ Comportement à l’agitation 	<p>- Les boues sont constituées d’eau et de matières sèches. La siccité est le pourcentage massique de matière sèche.</p>	<p>- La matière sèche est constituée de matières minérales et de matières organiques qui sont appelées matières volatiles sèches. La concentration en MVS est un taux par rapport à la matière sèche totale.</p>

Tableau 3: Les caractéristiques physico-chimiques des boues

I-3. Composition des boues résiduaire :

La composition exacte des boues varie en fonction de l’origine des eaux usées, de la période de l’année et du type de traitement et de conditionnement pratiqué dans la station d’épuration. Les boues résiduaires représentent avant tout une matière première composée de différents éléments (Matière organique, éléments fertilisants, éléments traces métalliques, éléments traces organiques et agents pathogènes).

Composition des boues résiduares				
Matière organique	Éléments fertilisants	Éléments indésirables		
		Lipides, protéines, acides aminés, produits de métabolisation, corps microbiens	Azote, Phosphore, Magnésium, Calcium, Soufre, Potassium, Cuivre, Zinc, Chrome, Nickel	Des métaux qui peuvent devenir très toxiques arrivés à certains seuils

Tableau 4: Composition des boues résiduares

I-4. Les différents types des boues :

Les boues d'épuration sont des boues qui résultent des différentes étapes du traitement des eaux usées. On générale on distingue trois types :

Les différents types de boues	
Boues de traitement primaire	Boues de traitement biologique
Boues caractérisées par : <ul style="list-style-type: none"> ✓ Mauvaises odeurs ✓ Faible pourcentage de liquide. 	Ces boues sont essentiellement formées par les résidus de bactéries dans les bassins biologiques. Elles sont envoyées vers deux flottateurs à pressurisation indirecte, avec l'injection d'un polymère pour assurer la flottation.

Tableau 5: Les différents types de boues

I-5. Les différents types de traitement des boues :

Les boues se présentent au départ sous forme liquide et avec une forte charge en matière organique hautement fermentescible. Ces deux caractéristiques sont gênantes quelque soit la destination des boues et imposent la mise en place d'une filière de traitement, c'est-à-dire une suite organisée de procédés qui agissent de façon complémentaire.

On distingue trois grands types de traitement :

Les différents types de traitement des boues		
Traitements de stabilisation (digestion anaérobie dans le cas de la STEP)	Traitements de réduction de la teneur en eau des boues (déshydratation)	Traitements d'hygiénisation
L'objectif est de réduire le pouvoir fermentescible des boues par l'élimination des matières organiques et matières volatiles pour atténuer ou supprimer les mauvaises odeurs. La stabilisation se fait par bactéries en absence d'oxygène en cas de la STEP de Marrakech.	Visent à : Diminuer la quantité de boues à stocker et à épandre, ou améliorer leurs caractéristiques.	Visent à : Eradiquer la charge en micro-organismes pathogènes.

Tableau 6: Les différents types de traitement des boues

II. Ligne de traitement des boues :

II-1. Épaississement :

C'est la réduction de volume des boues (l'élimination d'eau). L'épaississement des boues se fait principalement par sédimentation dans une cuve d'épaississement ou bien par flottation. Le temps de sédimentation dans la gamme de 12 à 48 h est suffisant pour obtenir une bonne sédimentation (% M.S relativement élevé) et séparation entre les boues et le surnageant.

II-1-1. Épaississement gravitaire :

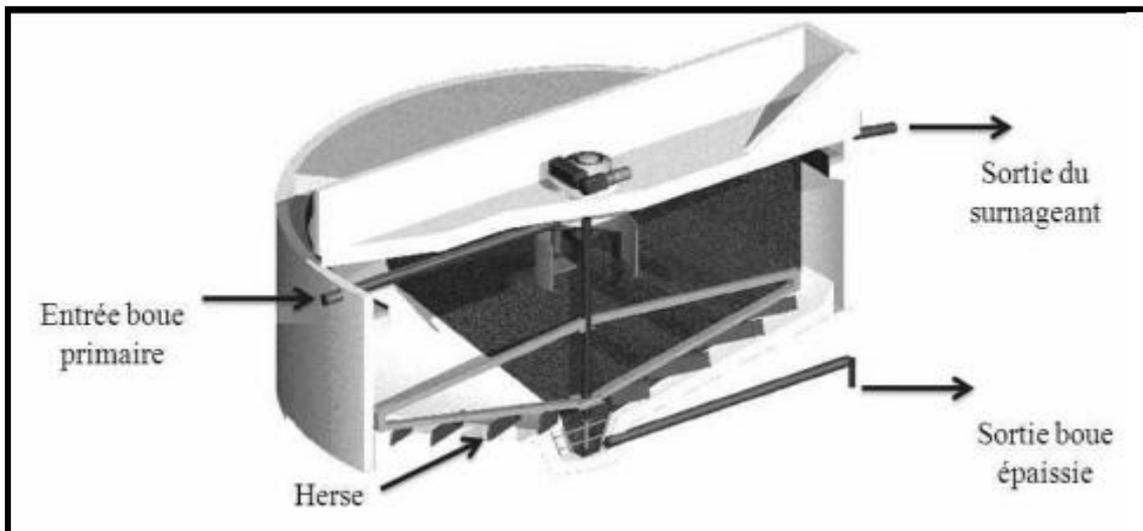


Figure 3: Coupe longitudinale d'un épaisseur gravitaire

Les boues primaires extraites des décanteurs primaires sont envoyées par une tuyauterie commune alimentant la bêche de répartition des deux ouvrages d'épailleurs gravitaires.

Ces boues primaires sont épaissies selon le principe de la décantation pendant une durée de 3h pour augmenter leur concentration à une moyenne de 70 g/l. Elles sont dirigées par la suite vers le centre de l'épaisseur par un raclage au fond pour les extraire vers le digesteur. La surverse des eaux s'écoule vers l'entrée de la station.

II-1-2. Épaississement par flottation :

L'épaississement des boues secondaires est réalisé par 2 flottateurs de 11m de diamètre à pressurisation indirecte par 2 compresseurs.

On ajoutant des polymères les boues flottent vu la densité relativement faible de ces dernières et s'agglomèrent à la surface du flotteur jusqu'à former une couche épaisse avec une concentration de 45 g/l.

II-2. Digestion (méthanisation) :

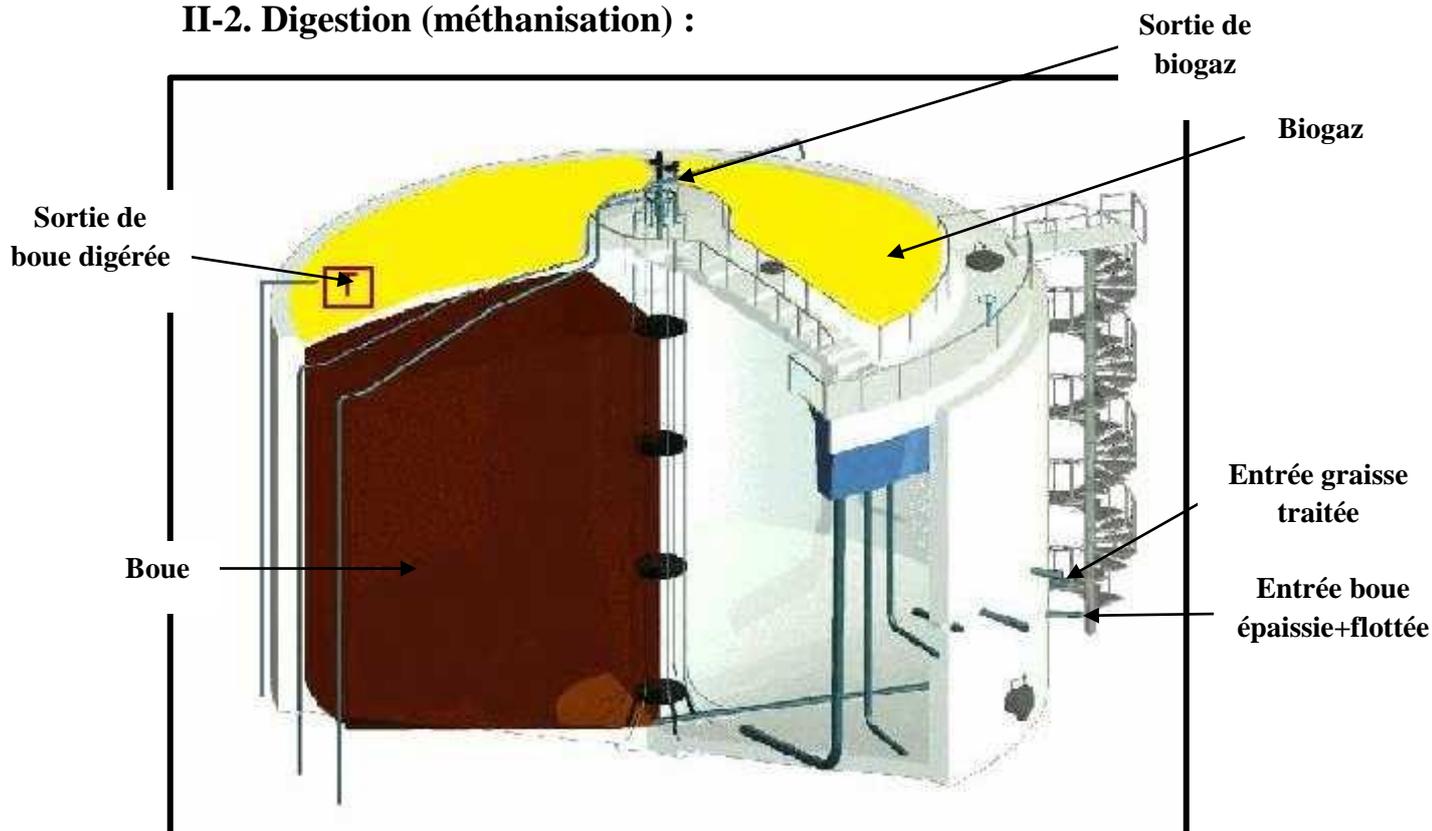


Figure 4: Coupe longitudinale d'un digesteur anaérobie

La méthanisation ou digestion anaérobie est un procédé naturel de transformation de la matière organique par des bactéries méthanogènes. Les boues riches en MO sont introduites dans des enceintes confinées appelées digesteurs à l'intérieur desquelles les réactions de fermentation sont optimisées et contrôlées, elles y séjournent pendant 3 à 4 semaines. Les digesteurs sont maintenus à une température de 37°C et brassés pour maintenir des conditions favorables au développement de micro-organismes.

Plusieurs populations bactériennes se développent et transforment les composés organiques complexes formés de longue chaîne hydrocarbonée en molécules simples à un seul carbone tels que le méthane (CH₄) et dioxyde de carbone (CO₂). En fait, Le biogaz produit est composé majoritairement de méthane (70%).

Le résidu de la digestion est stable, désodorisé, débarrassé en majeure partie des germes pathogènes. La méthanisation facilite le traitement des boues quelque soit leur destination finale (valorisation agronomique, incinération ...), et quelque soient les traitements intermédiaires appliqués (déshydratation, séchage solaire ...).

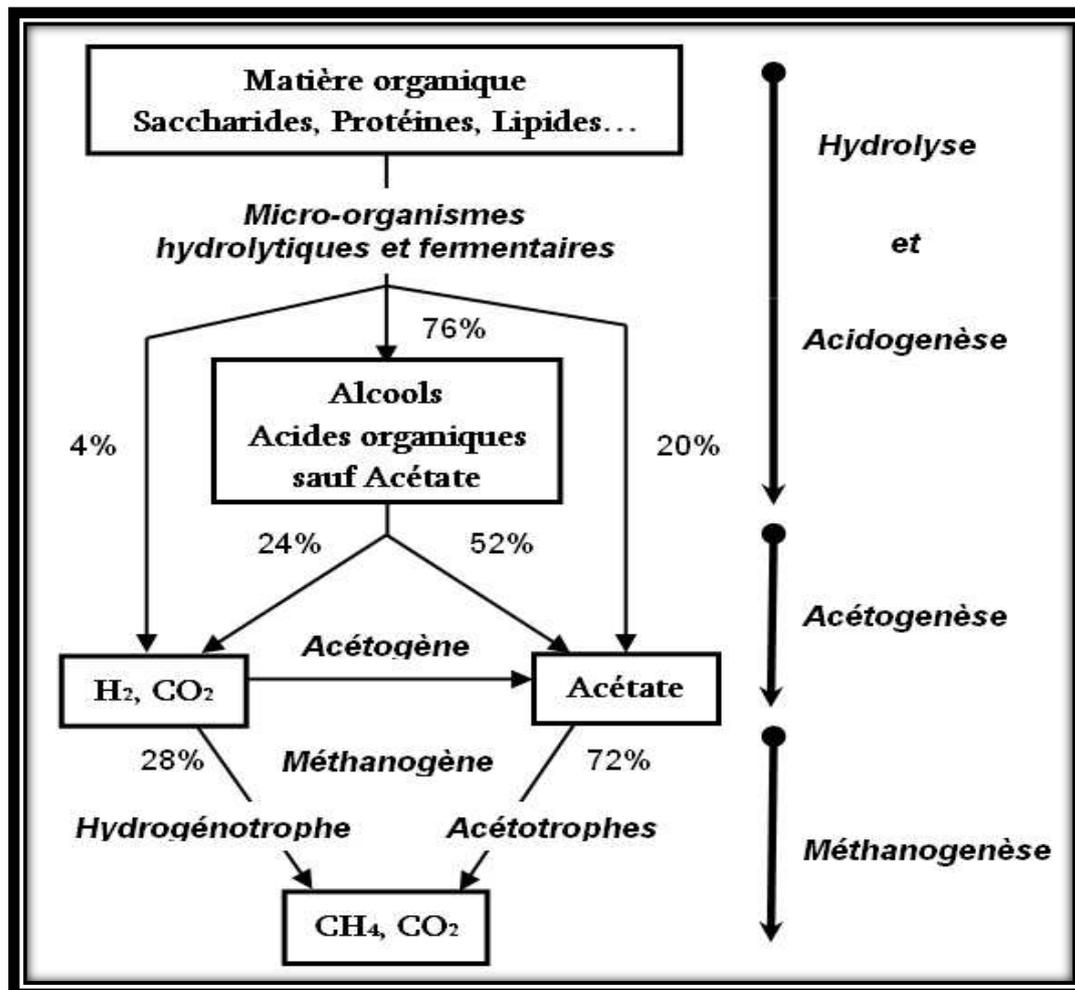


Figure 5: Schéma explicative du processus de la digestion anaérobie

En effet, la méthanisation comporte les avantages suivants :

- réduit de 40 % en moyenne les quantités de boues à traiter.
- élimine fortement les nuisances olfactives.
- produit une digestion stabilisée, débarrassée en grande partie des germes pathogènes (bactéries, virus et parasites) et présente un pouvoir fertilisant.
- réduit les teneurs en composés organiques volatils.

II-3. Stockage :

Les boues digérées s'écoulent par gravité depuis les quatre digesteurs vers deux unités de stockage de forme circulaire dont la capacité est de 1800m³. Le stockeur est non couvert et équipé de trois agitateurs submersibles assurant l'homogénéité de la boue digérée.

Le réservoir joue également le rôle de stockage intermédiaire avant la déshydratation, un local de pompage est installé à proximité du stockeur dans lequel se trouvent les pompes d'alimentation des filtres à bande (FAB).



Photo 11: Le stockeur

II-4. Déshydratation mécanique par filtres à bandes (FAB) :

Les boues digérées extraites du stockage sont envoyées du stockeur de boues vers la déshydratation. Cette opération est effectuée sur des FAB. Ces derniers sont alimentés par des pompes situées dans un local à côté du stockeur.

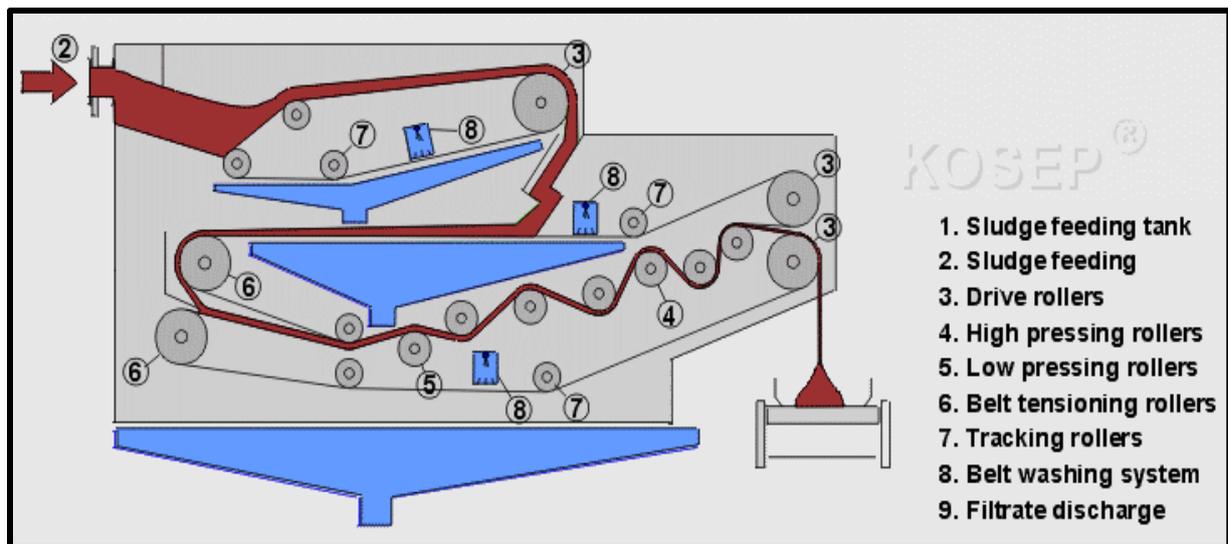


Figure 6: Filtre-pressé à bande (Manuelle processus phase2)

La déshydratation des boues est réalisée par 5 filtres à bandes fonctionnant en parallèle de 425 Kg MS/h.

Afin d'améliorer le taux de capture de fiabiliser la déshydratation, limitant ainsi les variations de siccité, les boues sont floculées.

La floculation des boues est réalisée par adjonction de polymères en produit sec. Un dispositif de préparation et d'injection de polymère en ligne par pompes doseuses est prévu.

Les boues déshydratées auront une siccité minimale de 25% MS.

L'eau échappant et autres rejets issus du processus sont collectés et envoyés en tête de la station.

La boue déshydratée est embarquée dans des conteneurs et rejetées dans la décharge.



Photo 12:Filtre à bandes

Chapitre 3:

Analyses et valorisation des boues déshydratées

I. Introduction :

Au niveau de la ville de Marrakech le traitement des eaux usées consiste à décanter les éléments polluants particuliers et à extraire les éléments dissous qui sont transformés en matière déposées suite à un traitement approprié. Ainsi, à la sortie de la station, il en résulte d'une part une eau épurée rejetée dans le milieu naturel, et d'autre part, une eau pour l'irrigation des terrains de golf, mais ce projet rapportera aussi des inconvénients vu la quantité des boues déshydratées produite par les différentes étapes de traitement des eaux usées (atteint 140 t/j) qui est très riche en métaux lourds, substances organiques et en éléments polluants. Le terrain qui accueille les boues de la station d'épuration de Marrakech présente une superficie de 1.5 Ha. Il est crée en juillet 2011 et situé à proximité de la décharge, ce terrain arrive aujourd'hui à environ 100 % de saturation ce qui manifeste la création d'un nouveau terrain d'une superficie de 3Ha.

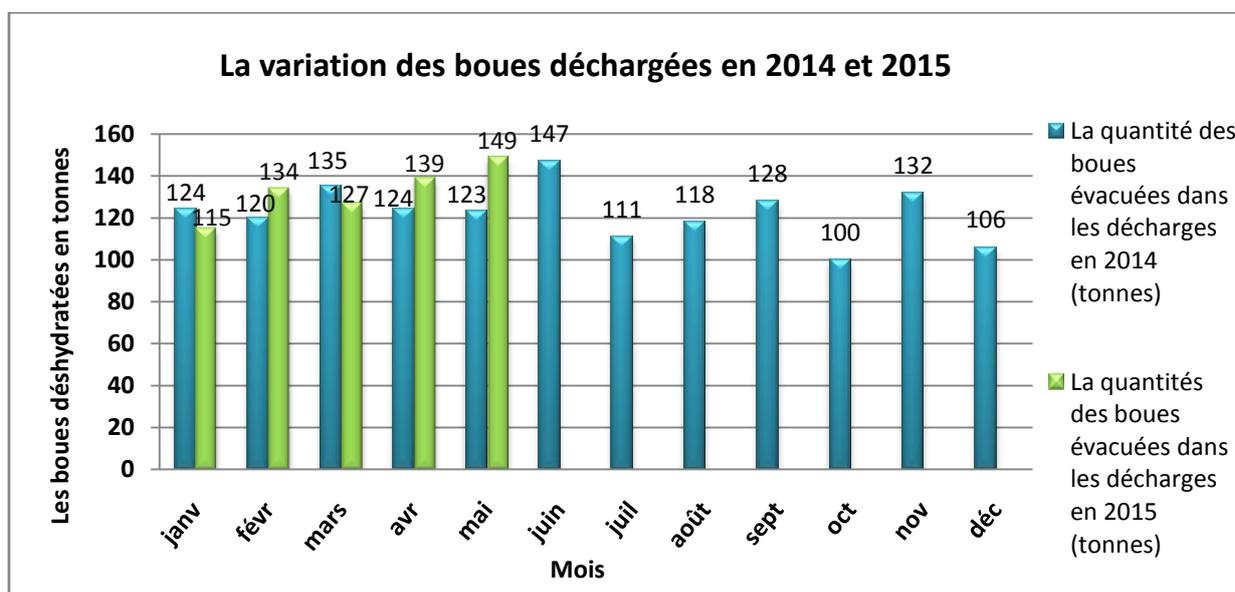


Figure 7: La variation des boues déshydratées déchargées en 2014 et 2015

De point de vue géologique cette décharge publique de la ville caractérisée par un socle perméable (schiste et granite altérés) va constituer une source potentielle de pollution des eaux de la nappe phréatique et celles de l'oued Tensift situé près de la décharge, de surcroît, dégager des gaz nocifs à impact négatif sur l'atmosphère.

Dans les autres pays y'a deux voies de valorisation des boues des stations d'épuration :

1. Valorisation énergétique qui regroupe plusieurs techniques qui convertissent les boues en énergie tel que l'incinération et la méthanisation.
2. Valorisation biologique ou agronomique grâce à la présence de matière organique et d'éléments fertilisants (azote, phosphore, potassium et calcium) dans ces boues.

Au Maroc on n'a pas encore pratiqué des voies de valorisation des boues de la station d'épuration, mais vu des raisons économiques, financières et plutôt environnementales, la direction technique de RADEEMA a lancé l'étude des voies d'élimination de ces boues.

Et pour réglementer ses utilisations, il faut qu'on respecte des normes, alors qu'on a enregistré un vide législatif au niveau de la loi 28-00 «Dahir n°1-06-153 du 22 novembre 2006 portant promulgation de la loi n° 28-00 relative à la gestion des déchets et à leur élimination », C'est pour cela que nous avons utilisé les normes européennes, précisément la directive française (86/278/CEE) qui a pour objectif de réglementer l'utilisation des boues d'épuration.

II. Matériels et méthodes :

On a prélevé des échantillons des boues déshydratées produite par la STEP de Marrakech le 05, 06 et le 08 juin 2015 pour effectuer les analyses suivantes dans les laboratoires de la STEP, et de la géosciences et Environnement de la Faculté des Sciences et Techniques ainsi qu'à la Faculté des Sciences Semlalia.

II-1. Matière sèche (MS) ou la siccité :

La matière sèche ou siccité est la matière retenue lorsque l'eau est retirée de la boue. Ce paramètre renseigne sur la consistance des boues. Des échantillons de 100 g ont été placés dans des cupules en aluminium préalablement pesées à vide. Les cupules ont ensuite été placées à l'étuve à 105°C pendant 24 heures. Les échantillons ont été mis dans le dessiccateur une demi-heure avant d'être pesés pour l'absorption d'humidité.



Photo 13: Mesure de la matière sèche des boues déshydratées

$$\% \text{ MS} = \frac{P_3 - P_1}{P_2 - P_1} * 100 \rightarrow \% \text{ MS} = \frac{40,937 - 19,817}{119,817 - 19,817} * 100 = 21.12\%$$

MS: Matière sèche (Siccité) (%)

P₁ : Poids de la cupule vide (g)

P₂ : Poids de boue déshydratée avant séchage + poids de la cupule (g)

P₃ : Poids de la boue après séchage + poids de la cupule (g)

II-2. Teneur en eau (T) :

La teneur en eau d'un solide est la quantité d'humidité rapportée à sa masse totale.

$$\% \text{ T} = \frac{P_h - P_s}{P_h} * 100 \rightarrow \% \text{ T} = \frac{100 - 21.12}{100} * 100 = 78.88\%$$

T : Teneur en eau (%)

P_h : Poids humide (P₂) sans poids de cupule (g)

P_s : Poids sec (P₃) sans poids de cupule (g)

II-3. Calcimétrie (C) :

La calcimétrie est la mesure du pourcentage de CaCO_3 dans un échantillon, l'appareil de mesure la plus fréquemment utilisée est **le calcimètre de Bernard**.

Un calcimètre permet de mesurer le volume de CO_2 dégagé par action de l'acide chlorhydrique (HCl) sur le carbonate de calcium (CaCO_3) d'un échantillon de boue.

On remplit au même niveau le niveau de la solution salée du tube gradué et de l'ampoule du calcimètre et on note la division correspond au V_1 sur le tube gradué, après on introduit 0.4g d'échantillon broyé dans un erlenmeyer.

On remplit un petit tube avec l'acide chlorhydrique (HCL) et on l'introduit dans l'erlenmeyer avec une pince et avec précaution pour ne pas le verser, puis on bouche l'erlenmeyer avec le bouchon relié au tube gradué de calcimètre de Bernard, et on renverse l'acide contenu dans le tube sur l'échantillon, on agite de temps en temps l'erlenmeyer pour activer la réaction. À la fin de l'effervescence on note la division correspond au V_2 sur le tube gradué, et on note le volume de CO_2 dégagé : $V_2 - V_1$

- Pour l'échantillon témoin (carbonate pur) le volume de CO_2 dégagée est :

$$V_{\text{témoin}} = V_2 - V_1 = 112 - 67 = 45 \text{ ml de } \text{CO}_2 \text{ dégagé.}$$

- Pour l'échantillon N_1 : le taux de carbonate est :

- On a $V_{\text{ech.1}} = V_2 - V_1 = 39 - 37 = 2 \text{ ml de } \text{CO}_2 \text{ dégagé.}$

Et on sait que le carbonate pur contient 100 % de CaCO_3

Donc : $V_{\text{témoin}} = 45 \text{ ml de } \text{CO}_2 \text{ dégagé} \rightarrow 100\% \text{ de } \text{CaCO}_3$

$V_{\text{ech.1}} = 2 \text{ ml de } \text{CO}_2 \text{ dégagé} \rightarrow X\% \text{ de } \text{CaCO}_3$

$$X\% = \frac{100\% \cdot V_1}{V_{\text{témoin}}} * 100 \rightarrow X\% = \frac{100\% * 2}{45} * 100 = 4.4\%$$

→ Alors le taux de carbonate dans l'échantillon N_1 est **4.4 %**

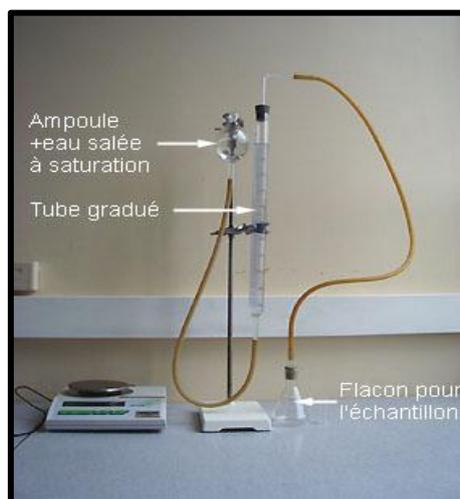


Photo 14: Calcimètre de Bernard

II-4. Matière organique :

La matière organique désigne la matière décomposée d'origine animale, végétale, et bactérienne, des composées organiques issus de déchets de l'environnement.

On prend 4.27g d'échantillon séché précédemment dans l'étuve pendant 24h à 105°C, on le met dans un creuset en céramique après l'avoir peser vide, on place le creuset à four à moufle pendant 4h à 550°C, après on note le poids final et on trouve le pourcentage de la MO par la relation suivante :

$$\% \text{ M.O} = \frac{P_1 - (P_2 - P_C)}{P_1} * 100$$

$$\rightarrow \% \text{ M.O} = \frac{4.27 - (24.614 - 23.055)}{4.27} * 100 = 63.49\%$$

P₁: Poids sec sans poids de creusets (g)

P₂: Poids incinéré dans le four à moufle + poids de creusets (g)

P_C: Poids de creusets vide (g)



Photo 20: Mesure de la matière organique des boues

II-5. Les éléments traces métalliques (ETM) :

Tous les ETM sont présents naturellement à l'état de traces dans le sol. En effet, ils sont présents dans tous les compartiments de l'environnement, mais en général en quantités très faibles.

Un grand nombre de métaux lourds sont utiles pour la vie comme le fer, cependant ils deviennent toxique lorsque leur concentration augmente et dépassent les normes.

On place 250ml d'échantillon séchée de boue déshydratées à l'étuve pendant 24h à 105°C

On met le résidu restant en solution chauffé en plaque chauffante à bain de sable à 250°C par 3.5ml d'HCNO₃ et 7.5 d'HCl.

On complète avec HCl dilué 5% après que la solution devient limpide.

La solution obtenue est ajustée à 5 ml par l'eau distillée et sera conservée en tube pour le dosage en spectrométrie et absorption atomique par l'analyseur portable.



Photo 21: Analyseur portable des matériaux

III. Résultats et interprétation :

III-1. Les résultats des analyses des éléments traces métalliques :

Paramètres	Echantillon du 05/06/2015	Echantillon du 06/06/2015	Echantillon du 07/06/2015	Echantillon du 08/06/2015	valeurs limites tolérants européennes par mg/kg de MS
Cadmium (Cd)	1,14	1,2	1,1	1,12	10
Chrome (Cr)	2613,89	2614	2615,23	2616	1000
Cuivre (Cu)	165,17	164,85	165,1	165,3	1000
Nickel (Ni)	81,5	83	83,16	83,45	200
Plomb (Pb)	311,57	312,01	313,14	313,65	800
Zinc (Zn)	854,09	854,19	855,01	855,93	3000
Cr+Cu+Ni+Zn	3714,65	3716,04	3718,5	3720,68	4000

Tableau 7: Résultats des analyses des ETM de la STEP de Marrakech 2015

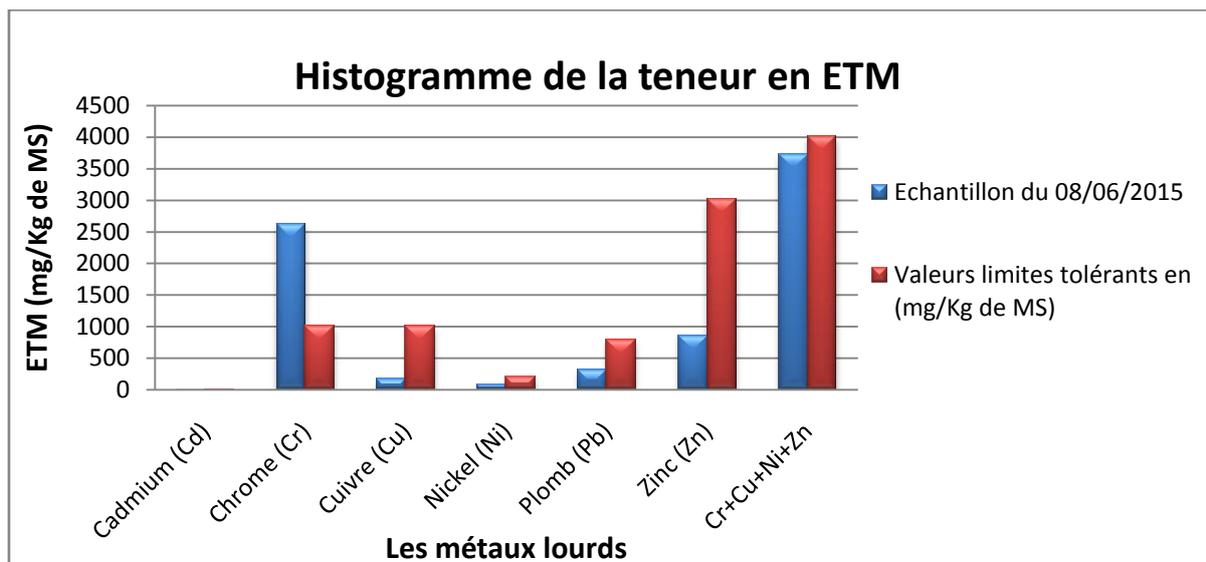


Figure 8: Histogramme de la teneur en ETM de l'échantillon du 08/06/2015

D'après l'historgramme si dessus, on voit que les valeurs obtenus respectent tous les normes européennes sauf le chrome, on le trouve avec des concentrations énormes qui dépassent les normes.

III-2. Les résultats des analyses géochimiques et agronomiques :

Paramètres	Résultat
PH	6.8
Matières sèches	21.12%
Teneur en eau	78.88%
CaCO ₃	4.4%
Matières organiques	63.49%

Tableau 8: Résultats d'analyse de la valeur agronomique et géochimique

III-3. Interprétation :

A partir de la Figure8, les analyses des éléments traces métalliques montrent que les teneurs de Cadmium, Zinc, Cuivre et le Plomb dans la boue ne dépassent pas les valeurs limites considérées comme seuil de tolérance dans les sols. Le chrome par contre dépasse trois fois à peu près les limites tolérées à cause des eaux issues des unités industrielles exactement les tanneries, ce qui va poser un problème, il va provoquer une contamination des sols et par conséquent de la nappe phréatique, ce qui va permettre de constituer ce qu'on appelle un risque environnemental et sanitaire.

Les boues d'épuration sont considérées comme problématiques en raison de leur comportement dans les couches profondes du sol lorsqu'elles sont stockées dans des décharges. En milieu alcalin, on estime que la stabilité des chromates peut atteindre 50 ans, et qu'ils peuvent migrer vers les nappes aquifères, même au travers des sols cohérents.

Pendant les périodes pluviales, les lixiviats des boues chargées en chrome peuvent provoquer une contamination rapide du sol puis de la nappe.

D'après les données du tableau 8, on constate que ces boues sont relativement alcalines et très riches en matière fertilisants comme l'azote, le phosphore et le calcium. Elles peuvent donc être réutilisées à des fins de fertilisation des sols, d'autant plus que le faible pourcentage en Carbonates (4%) limitera le colmatage et favorisera l'infiltration des eaux destinées à l'irrigation. Cependant, l'utilisation de ces boues en tant que fertilisants doit être effectuée selon la nature et la demande des sols et avec un traitement pour éliminer le chrome.

IV. procédés d'élimination et valorisation des boues de STEP :

Actuellement les boues sont mises en décharge mais vu des raisons économiques et plutôt environnementales, la direction technique de RADEEMA a lancé en 2013/2014 une étude d'une voie d'élimination de ces boues. On parle ici de l'incinération.

IV-1. Incinération :

D'un point de vue réglementaire, il n'y a pas de réglementation spécifique pour l'incinération des boues de stations d'épuration.

Les boues peuvent être incinérées sous diverses formes :

- Incinération spécifique : les boues à 20 – 30 % de siccité sont brûlées seules ou en mélange avec des graisses.
- Co-incinération avec les ordures: La Co-incinération peut s'effectuer avec des boues séchées (60 à 90 % de siccité) ou avec des boues pâteuses (20 – 25 % de siccité).

Dans la STEP de Marrakech le type d'incinération choisie est l'incinération à lit fluidisé.

➤ Principe :

La combustion des matières organiques (résiduelles) s'achève dans la zone de postcombustion où les fumées sont portées à une température d'environ 850°C pendant une période de 6 à 7 secondes (incluant un temps de contact de 2 secondes minimum à une température supérieure ou égale à 850°C conformément à la réglementation européenne).

Le grand avantage de ce système de combustion est de détruire complètement toutes les matières organiques volatiles dans les gaz.

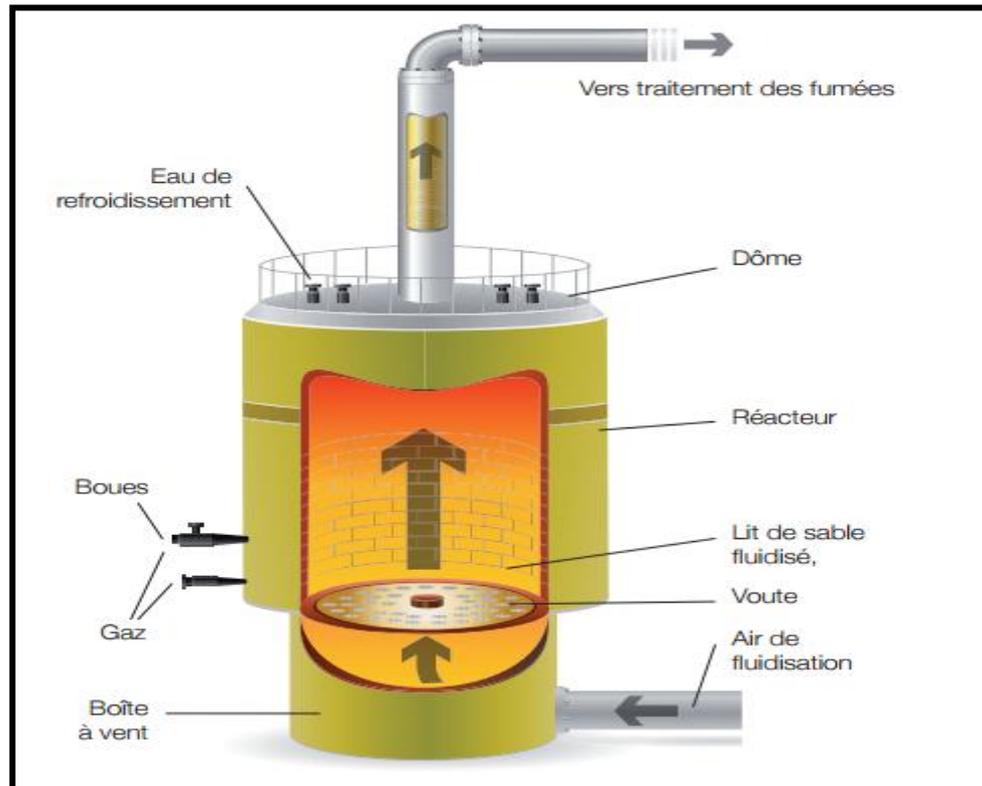


Figure 9: Four à lit fluidisé (Images du moteur de recherche Google)

- Investissement : 70 000 000,00 DH
- Amortissement : 20ans
- Exploitation : 150 DH /t Boue humide incinérée.
- Charge annuelle : 11 600 000,00 DH/an.
(Y compris amortissement à DH-Constant).
- Taux de cendre : 11%
- Cendre de l'incinération : 6000 t/an.
- Hypothèse : Valorisation totale du produit.
- Prix de vente théorique : 1933Dh/t

Le revenu annuel de la station est donc de l'ordre de 11 598 000,00 Dhs (1 933 * 6 000), valeur comparable à la charge annuelle de la station (11 600 000,00 Dhs). Ces calculs montrent que l'installation thermique d'incinération n'est pas rentable puisque l'amortissement des investissements des infrastructures n'est pas inclus dans la charge annuelle.

C'est pour cette raison que la STEP de Marrakech a annulée l'installation thermique d'incinération. Cependant, elle propose une autre méthode plus simple et rentable de point de vue économique : il s'agit du séchage solaire.

IV-2. Séchage :

Le séchage est une opération unitaire du traitement des boues consistant à évaporer de l'eau libre et liée.

Dans ce rapport on s'intéresse seulement au séchage solaire car c'est le seul type proposé par la STEP, ce projet va lancer le 1^{er} Septembre 2015.

➤ Principe :

La profondeur de boue lors du remplissage peut varier de 10cm à 50cm selon la nature des boues. Ce lit de séchage se trouve sous serre (Figure 10), ce qui permet de garder la chaleur, d'avoir une température de l'air et des boues plus élevée, mais également d'accélérer le séchage par les rayons du soleil.

Afin de diminuer le temps de séjour des boues et d'augmenter la siccité, des ventilateurs sont souvent installés dans les serres. De plus, le dimensionnement du lit doit prendre en compte le climat, le bilan hydrique et la siccité des boues en entrée.

Cette technique est très avantageuse car elle utilise une source d'énergie renouvelable, le soleil. Les boues séchées par cette technique, ayant une siccité élevée entre 60 et 80%, peuvent être acceptées par diverses filières de valorisation énergétique ou d'élimination. De plus, les boues sont hygiénisées par la chaleur.

Cependant, cette technique a également des limites : sa performance dépend beaucoup du climat, la production d'odeur n'est pas négligeable et elle demande une surface d'implantation importante.

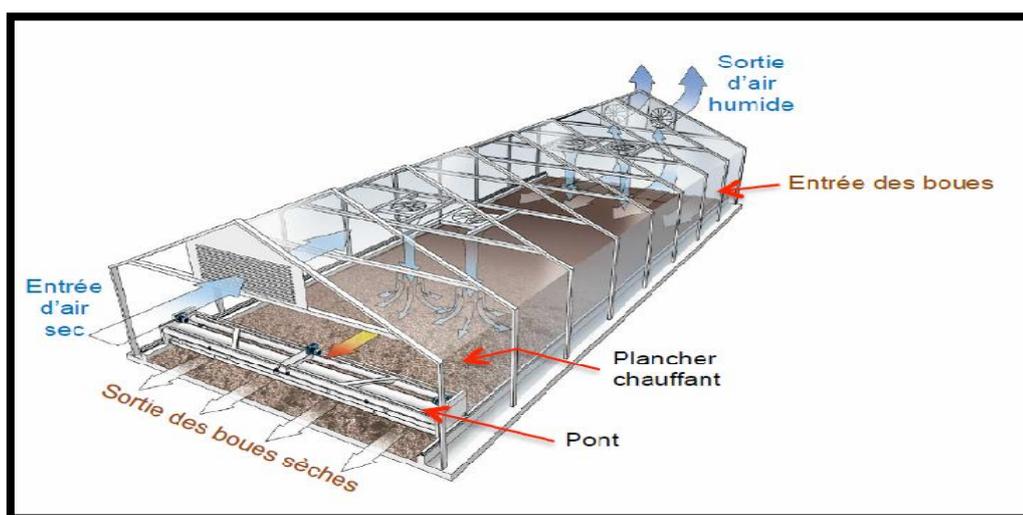


Figure 10: Schéma du fonctionnement d'une serre fermé (outilssolaire.com)

Le séchage solaire est une solution de traitement de boues et un projet qui sera réalisée à 30 Km de la STEP de la ville de Marrakech grâce aux coûts d'exploitation peu élevés et par les faibles coûts de fonctionnement et un faible impact écologique.

Le recours à cette solution s'applique surtout à des boues préalablement déshydratées (15 à 25 % de siccité).c'est le cas de la siccité des boues déshydratées produit par la STEP de Marrakech, et aussi son climat semi-aride caractérisée par de longues périodes d'ensoleillement.

V. Valorisation et élimination :

V-1. Le compostage :

Le compostage est un processus de décomposition et de transformation « contrôlées » de déchets organiques sous l'action de populations microbiennes diversifiées évoluant en milieu aérobie.

V-1-1. Principe de compostage :

Le principe de traitement est basé sur une fermentation aérobie d'un mélange de boues et d'un produit structurant de type déchets verts. La réaction biologique permet une augmentation significative de la température, le séchage du produit et une stabilisation du mélange. Les procédés mis en œuvre peuvent aller du plus simple (aération naturelle des andains stockés sur une plate-forme étanche) au plus complexe (aire de compostage totalement confinée avec une aération forcée contrôlée). Ce procédé permet de réduire le tonnage de boues de 60 %, la teneur en matières sèches du compost atteignant 600 kg/ tonne de produit brut.

V-1-2. Les étapes de compostage des boues :

V-1-2-1. Réception et mélange au coproduit :

À réception, les boues sont pesées avant d'être mélangées avec des matériaux carbonés (coproduit tel que le refus de criblage issu du compostage de déchets verts). La qualité du mélange influe directement sur les conditions du compostage.

V-1-2-2. Mise en silo de fermentation :

Le mélange boues/coproduit est ensuite placé dans un silo couvert équipé de canaux de ventilation. Ceux-ci permettent d'insuffler de l'air dans le tas en fermentation, afin de fournir l'oxygène consommé par les micro-organismes et donc d'accélérer le processus de compostage.

V-1-2-3. Contrôle des températures :

Le compostage est le résultat d'une fermentation aérobie (en présence d'oxygène). Cette fermentation a la particularité d'être exothermique, c'est-à-dire de dégager de la chaleur. La mesure de la température permet de contrôler l'état de la fermentation. La température idéale pour une bonne hygiénisation du compost de boues est comprise entre 65 et 75°C.

V-1-2-4. Retournement :

Après la première phase de fermentation (3 à 4 semaines) la température du mélange chute en dessous de 60°C, c'est le signe du ralentissement de la fermentation, généralement dû à un tassement du tas. Pour recréer de la porosité et homogénéiser le tas, les andains sont transférés avec la chargeuse, d'un silo à un autre.

V-1-2-5. Criblage :

Après 6 à 7 semaines de fermentation, le produit obtenu est criblé à une maille de 20 à 30 mm, afin de séparer les particules fines (qui seront épandues) des éléments grossiers (qui seront repris en tant que coproduit). Le compost obtenu est ensuite placé sur l'aire de maturation.

V-1-2-6. Maturation :

La durée de maturation influe beaucoup sur la qualité et la stabilité des propriétés agronomiques du compost fini, c’est pour cela que nous y attachons une importance toute particulière et laissons mûrir le compost 6 à 8 semaines.

V-1-2-7. Épandage :

Le compost, une fois mûr, est analysé et épandu sur des surfaces agricoles dédiées.

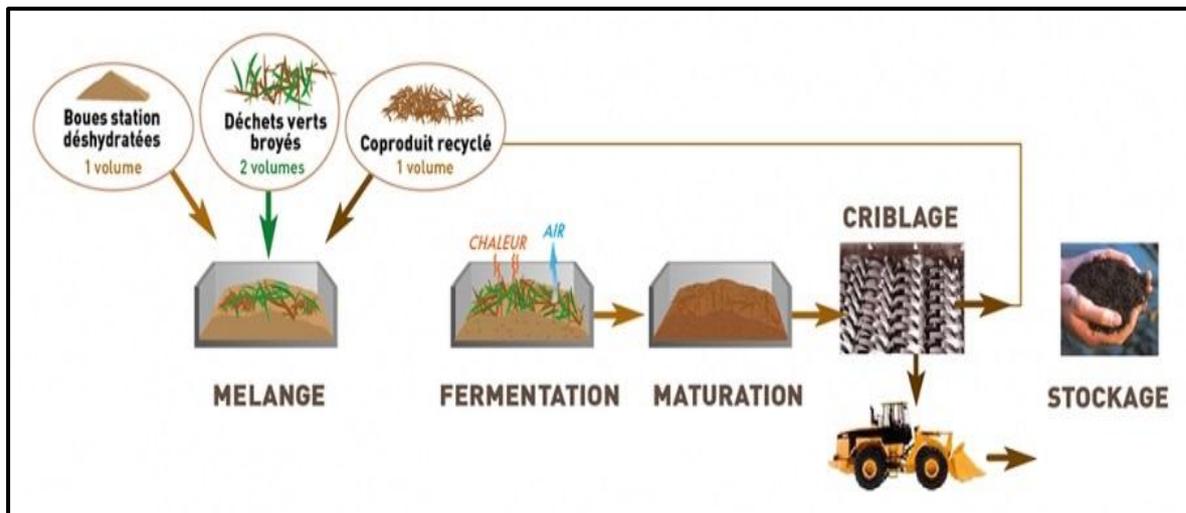


Figure 1: Les différentes étapes de production d’un compost (STEP-plaquette.pdf)

V-2. Cimenterie :

La valorisation des boues en cimenterie se développe depuis ces dernières années. Le principe est, après une étape de séchage, de valoriser le pouvoir énergétique de la matière organique de la boue séchée en la substituant aux énergies fossiles et de valoriser la matière minérale de la boue, en particulier la chaux (en cas de chaulage), en incorporant la boue séchée aux matières premières constituant le ciment.

➤ Impact des boues sur le ciment :

Tout comme le charbon, l’utilisation de boues sèches en cimenterie a une influence sur la qualité du ciment. Le principal effet reconnu à ce jour est la diminution des résistances mécaniques par une trop forte teneur en phosphate. La teneur maximale de 0,5 % de phosphate dans le ciment est généralement admise. Les boues sont susceptibles d’apporter entre 3 et 6 g de phosphate/kg de MS. La teneur des boues en phosphate est donc rarement limitant. De même, la présence de métaux lourds dans les boues n’affecte pas la qualité du ciment en raison d’une teneur moyenne.

Conclusion générale

Les quantités des boues de la station d'épuration sont en augmentation, et atteindront presque 600 000 Tonnes de MS/an en 2030. Ceci est le résultat de la croissance démographique de la ville de Marrakech.

La destination actuelle des boues de la STEP est la décharge sauvage de la ville qui est à proximité d'Oued Tensift. Le comblement de cette dernière pose de gros soucis pour l'Etat, notamment pour trouver un dépôt où évacuer les boues. En plus de cela, s'ajoute l'impact de ces boues sur l'environnement en raison de la production de gaz à effet de serre et les risques certains de pollution de la nappe phréatique.

La valorisation agricole des boues sera la meilleure voie sur le plan économique grâce à la grande quantité des MO présente dans les boues et aussi à la répartition des terrains agricole dans la région de Marrakech Tensift El 'Haouz. Les boues seront valorisés par compostage et produits utilisables comme fertilisants pour la production agricole.

Pour la ville de Marrakech l'incinération est un procédé qui permet la valorisation énergétique de tout le carbone présent dans les résidus à traiter, et non pas seulement de la fraction organique biodégradable, mais il présente des contraintes principalement liées au coût très élevés de cette opération. Cette technique reste aussi néfaste de point de vue écologique et environnemental puisqu'elle participe à la diffusion de gaz très toxiques et surtout à effet de serre.

Donc le domaine agricole reste une meilleure solution pour réutiliser ces boues mais à conditions qu'elles répondent aux normes internationales et qu'elles ne contiennent pas de polluants qui puissent contraindre la vie de la population. Il suffit de faire un traitement spécifique pour réduire les fortes teneurs en chrome en amont avant d'être acheminé vers la station d'épuration.

ANNEXES

Les caractéristiques des ouvrages

I. La ligne eau

1. Prétraitement :

a. Fosse à bâtard :

Volume : 4,5 m³

b. Pré-dégrillage :

- L'étape du pré-dégrillage est assurée par une grille manuelle
- L'écartement des barreaux : 200 mm
- Largeur du canal : 3 m

c. Dégrillage moyen :

- 4 unités dont 1 manuelle
- Ecartement des barreaux : 100 mm
- Largeur du canal : 1,5 m
- 1 vis d'évacuation des déchets dans une benne de 20 m³

d. Dégrillage fin :

- 4 unités dont 1 manuelle ;
- Ecartement des barreaux : 10 mm ;
- 1 vis d'évacuation des déchets dans une benne de 20 m³.

e. Dessablage – déshuilage :

- Constitue le démarrage de la file boues
- 2 unités doubles
- 1 pont par unité double
- Surface totale : 400 m²
- Volume totale : 1200 m³

f. Traitement des sables :

- Pompes embarquées : 4 unités de 20 m³/h
- 1 fosse de stockage
- 2 pompes de 80 m³/h
- 1 classificateur de 80 m³/h

g. Traitement des graisses :

- Pompe de 2 m³/h
- 1 tamisage

2. Traitement primaire

a. Décantation primaire

- 1 ouvrage de répartition
- 3 décanteurs de 39 m de diamètre
- Surface totale : 3 585 m²
- Volume total : 3971 m³
- 3 ponts racleur
- 5 pompes à boue (2 au décanteur A et 3 pour les décanteurs B et C)

3. Traitement secondaire

a. Bassin d'aération

- Matériaux béton
- Nombre n = 4
- Volume actif 16034 m³
- Longueur 76,6 m
- Largeur 38 m
- Surface 2620 m²
- Niveau d'eau 6,12 m

b. Clarificateurs

- Matériaux béton
- Nombre n = 4
- Volume actif 10100 m³
- Diamètre 56,7 m
- Surface 2525 m²
- Niveau d'eau 4,00 m

4. Traitement tertiaire

a. Bassin de coagulation

- Matériau béton
- Nombres 2
- Longueur 4,7 m
- Largeur 4,7 m
- Surface 22,1 m²
- Niveau d'eau 3,47 m
- Volume 76,7 m³

b. Bassin de floculation

- Matériau béton
- Nombres n = 4
- Longueur 6,0 m

- Largeur 6,35 m
- Surface 38,1 m²
- Niveau d'eau 3,4 m
- Volume 129,5 m³

c. Filtre à sable

- Nombres n = 4, x = 5, total = 20
- Longueur 8,11 m
- Largeur 3,40 m
- Surface 27,57 m²
- Hauteur d'eau max 2,20 m
- Hauteur du sable 1,20 m
- Hauteur sous dalles 0,82 m

d. Bassin d'eau boueuse

- Matériau béton
- Nombres 1
- Longueur 22,8 m
- Largeur 5,9 m
- Surface 134,5 m²
- Hauteur d'eau max 2,50 m

e. Système de désinfection UV

- Type Trojan UV 3000 Plus
- Fabricant Trojan
- Nombre 2 groupes de 2 unités par chenal
- Débit 2200 m³/h par chenal
- Dose UV en fin de vie 40 mJ/cm²
- Puissance installée 64 kW

II. La ligne boue

1. Épaississement

a. Épaississement gravitaire

- Type gravitaire
 - Diamètre : 15 m
 - Surface unitaire : 177 m²
 - Hauteur cylindrique : 3,5 m
- L'extraction des boues des épaisseurs se fait par le biais de 3 pompes volumétriques de 7 à 20 m³/h.

b. Flottation

- Matériaux béton

- Nombre 2
- Volume actif 282 m³
- Diamètre 10,7 m
- Profondeur 3,67 m
- Surface 90 m²
- Niveau d'eau 3,14 m

2. Digestion

- Matériaux béton
- Nombre n = 2
- Volume actif 6000 m³
- Diamètre 25,54 m
- Hauteur totale 17,78 m
- Hauteur de boues 12,3 m
- Surface 460 m²

3. Stockeurs

- Volume : 1800 m³
- Agitateurs : 3 unités
- Hauteur : 6,5 m

4. Filtre à bandes

- Nombre 5
- Débit 21,2 m³/h
- Siccité garantie en sortie 26 %
- Puissance installée Floculateurs 1,1 kW
- Filtres à bande 2 x 2,2 kW

III. Ligne biogaz

1. Gazomètre

- Nombre 1
- Capacité 2150 m³
- Puissance installée 2 x 3 kW

2. Torchère

- Nombre 1
- Capacité 750 m³/h

3. Cogénération

- Nombre 2
- Capacité 2091 kW
- Puissance des alternateurs 1400 kW

Le cadre législatif de la STEP

EAU :

Décret n° 2-04-553 DU 24 janvier 2005 relatif aux déversements, écoulements, rejets, dépôts directs ou indirects dans les eaux superficielles ou souterraines

Article 11 – On entend, au sens du présent décret, par valeur limite de rejet, la valeur limite d’un paramètre indicateur de la pollution, qui ne doit pas être dépassée dans le sens de la détérioration de la qualité de l’eau, pour un déversement.

Article 12 – Les caractéristiques physiques, chimiques, biologiques et bactériologiques de tout déversement doivent être conformes aux valeurs limites de rejet fixées par arrêtés conjoints des autorités gouvernementales chargées de l’Intérieur, de l’Eau, de l’Environnement, de l’Industrie et de toute autre autorité gouvernementale concernée. Ces arrêtés fixent également les échéanciers dans lesquels les déversements doivent se conformer aux dites valeurs qui peuvent être générales ou spécifiques pour certaines activités.

Article 13 – Les valeurs limites de rejet visées à l’article 11 ci-dessus sont révisées dans les formes et conditions de leur fixation, tous les dix (10) ans ou chaque fois que la protection de la qualité de l’eau ou l’évolution des technologies l’exigent.

Article 20 – Les rendements des dispositifs d’épuration visés à l’article 15 et à l’article 16 ci-dessus, sont définis comme étant les pourcentages d’abattement de la quantité de pollution véhiculée par les eaux usées, après traitement par les dits dispositifs. En l’absence de mesures, les rendements des dispositifs d’épuration à appliquer conformément à l’article 15 et à l’article 16, sont ceux fixés par arrêté conjoint des autorités gouvernementales chargées de l’intérieur, de l’eau, de l’environnement, de l’industrie, de l’artisanat et des mines.

Valeurs limites spécifiques de rejet applicables aux déversements d’eaux usées des agglomérations urbaines	
Paramètres	Valeurs limites
DBO5 mg O2/l	120
DCO mg O2/l	250
MES mg /l	150

Valeur limites des rejets fixés au décret (Janvier 2005)

Au Maroc on n’a pas des directives réglementer pour l’utilisation des boues d’épuration ou des directives du conseil relative à la protection de l’environnement et notamment des sols, c’est pour cela on a utilisé les normes européennes, précisément la directive française (86/278/CEE) qui à pour objectif de réglementer l’utilisation des boues d’épuration.

Boues :

DIRECTIVE DU CONSEIL
du 12 juin 1986
relative à la protection de l'environnement et notamment des sols, lors de l'utilisation
des boues d'épuration en agriculture
(86/278/CEE)

Article premier

Le but de la présente directive est de réglementer l'utilisation des boues d'épuration en agriculture de manière à éviter des effets nocifs sur les sols, la végétation, les animaux et l'homme, tout en encourageant leur utilisation correcte.

Article 2

Aux fins de la présente directive, on entend par:

- a) «boues»:** i) les boues résiduaires issues de stations d'épuration traitant des eaux usées domestiques ou urbaines et d'autres stations d'épuration traitant des eaux usées de composition similaire aux eaux usées domestiques et urbaines;
- ii) les boues résiduaires de fosses septiques et d'autres installations similaires pour le traitement des eaux usées;
- iii) les boues résiduaires issues de stations d'épuration autres que celles visées aux points i) et ii);
- b) «boues traitées»:** Les boues traitées par voie biologique, chimique ou thermique, par stockage à long terme ou par tout autre procédé approprié de manière à réduire, de façon significative, leur pouvoir fermentescible et les inconvénients sanitaires de leur utilisation;
- c) «agriculture»:** tout type de culture à but commercial et alimentaire, y compris aux fins de l'élevage;
- d) «utilisation»:** l'épandage des boues sur les sols ou toute autre application des boues sur et dans les sols.

Article 3

1. Les boues visées à l'article 2 point a) sous i) ne peuvent être utilisées en agriculture qu'en conformité avec la présente directive.
2. Sans préjudice des directives 75/442/CEE et 78/319/CEE:
 - les boues visées à l'article 2 point a) sous ii) peuvent être utilisées en agriculture sous réserve des conditions que l'État membre concerné peut estimer nécessaires afin d'assurer la protection de la santé de l'homme et de l'environnement,
 - les boues visées à l'article 2 point a) sous iii) ne peuvent être utilisées en agriculture que si leur utilisation est réglementée par l'État membre concerné.

Article 4

Les valeurs relatives aux concentrations en métaux lourds dans les sols recevant des boues, aux concentrations en métaux lourds dans les boues et aux quantités maximales annuelles de ces métaux lourds pouvant être introduites dans les sols à destination agricole, figurent aux annexes I A, I B et I C.

Article 5

Sans préjudice de l'article 12:

- 1) les États membres interdisent l'utilisation des boues lorsque la concentration en un ou plusieurs métaux lourds dans les sols dépasse les valeurs limites qu'ils fixent conformément à l'annexe I A et ils prennent les mesures nécessaires pour assurer que ces valeurs limites ne soient pas dépassées du fait de l'utilisation des boues;
- 2) les États membres réglementent l'utilisation des boues de telle sorte que l'accumulation des métaux lourds dans les sols ne conduise pas à un dépassement des valeurs limites visées au point 1. Pour ce faire, ils appliquent l'une ou l'autre des procédures prévues aux points a) et b) suivants:
 - a) les États membres fixent les quantités maximales de boues exprimées en tonnes de matière sèche qui peuvent être apportées aux sols par unité de surface et par an, en respectant les valeurs limites de concentration en métaux lourds dans les boues qu'ils fixent conformément à l'annexe I B ou
 - b) les États membres assurent le respect des valeurs limites de quantités de métaux introduites dans les sols par unité de surface et par unité de temps, figurant à l'annexe I C.

Article 6

Sans préjudice des dispositions de l'article 7:

- a) les boues sont traitées avant d'être utilisées en agriculture. Les États membres peuvent toutefois autoriser, dans les conditions qu'ils fixent, l'utilisation des boues non traitées si elles sont injectées ou enfouies dans les sols;
- b) les producteurs de boues d'épuration fournissent régulièrement aux utilisateurs toutes les informations visées à l'annexe II A.

Article 7

Les États membres interdisent l'utilisation des boues ou la livraison des boues en vue de leur utilisation:

- a) sur des herbages ou des cultures fourragères, s'il est procédé au pâturage ou à la récolte de cultures fourragères sur ces terres avant l'expiration d'un certain délai. Ce délai, qui est fixé par les États membres en tenant compte notamment de leur situation géographique et climatique, ne peut en aucun cas être inférieur à trois semaines;
- b) sur des cultures maraîchères et fruitières pendant la période de végétation, à l'exception des cultures d'arbres fruitiers;
- c) sur des sols destinés à des cultures maraîchères ou fruitières qui sont normalement en contact direct avec les sols et qui sont normalement consommées à l'état cru, pendant une période de dix mois qui précède la récolte et pendant la récolte elle-même.

Article 8

L'utilisation des boues est effectuée compte tenu des règles suivantes:

- l'utilisation doit tenir compte des besoins nutritionnels des plantes et ne peut compromettre la qualité des sols et des eaux superficielles et souterraines,

— si des boues sont utilisées sur des sols dont le pH est inférieur à 6, les États membres tiennent compte de l'accroissement de la mobilité des métaux lourds et de leur absorption par les plantes et diminuent, le cas échéant, les valeurs limites qu'ils ont fixées conformément à l'annexe I A.

Article 9

Les boues et les sols sur lesquels celles-ci sont utilisées sont analysés suivant le schéma mentionné aux annexes II A et II B.

Les méthodes de référence d'échantillonnage et d'analyse sont indiquées à l'annexe II C.

Article 10

1. Les États membres veillent à ce que des registres soient tenus à jour dans lesquels sont notés:

- a) les quantités de boues produites et celles livrées à l'agriculture;
- b) la composition et les caractéristiques des boues par rapport aux paramètres visés à l'annexe II A;
- c) le type de traitement effectué tel qu'il est défini à l'article 2 point b);
- d) les noms et adresses des destinataires des boues et les lieux d'utilisation des boues.

2. Ces registres sont tenus à la disposition des autorités compétentes et servent à établir le rapport de synthèse visé à l'article 17.

3. Les méthodes de traitement et les résultats d'analyse sont communiqués sur leur demande aux autorités compétentes.

Article 11

Les États membres peuvent exempter des dispositions de l'article 6 point b) et de l'article 10 paragraphe 1 points b), c) et d) et paragraphe

2, les boues issues de stations d'épuration d'eaux usées dont la capacité de traitement est inférieure à 300 kg DBO5 par jour, correspondant à 5 000 unités équivalent habitants et qui sont destinées pour l'essentiel au traitement des eaux usées d'origine domestique.

Article 12

Les États membres peuvent, si les conditions l'exigent, adopter des mesures plus sévères que celles prévues dans la présente directive.

Toute décision de cet ordre sera média tement communiquée à la Commission, conformément aux accords existants.

ANNEXE I A
VALEURS LIMITES DE CONCENTRATION EN MÉTAUX LOURDS
DANS LES SOLS

**(mg/kg de matière sèche d'un échantillon représentatif des sols dont le pH
est de 6 à 7, tel que défini à l'annexe II C)**

Paramètres	Valeurs limites (1)
Cadmium	1 à 3
Cuivre (2)	50 à 140
Nickel (2)	30 à 75
Plomb	50 à 300
Zinc (2)	150 à 300
Mercuré	1 à 1,5
Chrome (3)	—

(1) Les États membres peuvent autoriser un dépassement des valeurs limites reprises ci-dessus dans le cas de l'utilisation des boues sur des terres qui, lors de la notification de la présente directive, sont consacrées à l'élimination des boues mais sur lesquelles s'effectuent des cultures à but commercial destinées exclusivement à la consommation animale. Les États membres communiquent à la Commission le nombre et la nature des sites concernés. Ils veillent en outre à ce qu'il n'en résulte aucun danger pour l'homme et l'environnement.

(2) Les États membres peuvent autoriser un dépassement des valeurs limites pour ces paramètres sur des sols dont le pH est constamment supérieur à 7. En aucun cas, les concentrations maximales autorisées en ces métaux lourds ne doivent dépasser de plus de 50 % les valeurs reprises ci-dessus. Les États membres veillent en outre à ce qu'il n'en résulte aucun danger pour l'homme et l'environnement et notamment pour les nappes d'eau souterraines.

(3) Il n'est pas possible à ce stade de fixer des valeurs limites pour le chrome. Le Conseil fixera ces valeurs limites à un stade ultérieur sur la base de propositions que la Commission présentera dans un délai d'un an suivant la notification de la présente directive.

ANNEXE I B
VALEURS LIMITES DE CONCENTRATION EN MÉTAUX LOURDS
DANS LES BOUES DESTINÉES À L'UTILISATION EN AGRICULTURE
(mg/kg de matière sèche)

Paramètres	Valeurs limites
Cadmium	20 à 40
Cuivre	1 000 à 1 750
Nickel	300 à 400
Plomb	750 à 1 200
Zinc	2 500 à 4 000
Mercuré	16 à 25
Chrome (1)	—

(1) Il n'est pas possible à ce stade de fixer des valeurs limites pour le chrome. Le Conseil fixera ces valeurs limites à un stade ultérieur sur la base de propositions que la Commission présentera dans un délai d'un an suivant la notification de la présente directive.

ANNEXE II A ANALYSE DES BOUES

1. En règle générale, les boues doivent être analysées au moins tous les six mois. Si des changements interviennent dans la qualité des eaux traitées, la fréquence de ces analyses doit être augmentée. Si les résultats des analyses ne varient pas d'une manière significative sur une période d'un an, les boues doivent être analysées au moins tous les douze mois.

2. Dans le cas de boues issues des stations d'épuration visées à l'article 11, si une analyse des boues n'a pas été effectuée dans les douze mois qui précèdent la mise en œuvre dans chaque État membre de la présente directive, une analyse doit être effectuée dans un délai de douze mois suivant cette mise en œuvre ou, le cas échéant, dans un délai de six mois suivant la décision d'autoriser l'utilisation en agriculture des boues issues d'une telle station.

Les États membres décident de la fréquence d'analyse ultérieure en fonction des résultats de la première analyse, des changements éventuels intervenus dans la nature des eaux usées traitées et de tout autre élément y afférent.

3. Sous réserve du paragraphe 4, les paramètres suivants doivent être analysés:

- matière sèche, matière organique,
- pH,
- azote et phosphore,
- cadmium, cuivre, nickel, plomb, zinc, mercure, chrome.

4. Pour le cuivre, le zinc et le chrome, lorsqu'il a été démontré, à la satisfaction de l'autorité compétente de l'État membre, que ces métaux ne sont pas présents ou ne sont présents que dans une quantité négligeable dans les eaux usées traitées par la station d'épuration, les États membres décident de la fréquence des analyses à effectuer.

Bibliographie et webgraphie

- Amir, 2000. Traitement des boues de stations d'épuration par le procédé de compostage
Mémoire de DESA, Univ. Cadi Ayyad, Fac. Sci. Semlalia, Marrakech, 40 p.
- Amir.S,(2005).contribution a la valorisation de boues de station d'épuration par compostage :Devenir
des micropolluants métallique et organiques et bilan humique du compost, Thèse doctorat, Institut
national polytechnique de Toulouse, 11p
- AMADOU.H, 2007. « Modalisation de séchage solaire sous serres des boues de station d'épuration
urbains. (Page 51)
- BOEGLIN J.Cl., (2001) – Traitements et destinations finales des boues résiduares
ingénieur chimiste. Thèse d'Inge., IPI, Colmar, 26 p..
- Brison.C, Perret J.M.,CanlerJ.P., 2010. «Le séchage solaire des boues : Etat actuel de l'art et retours
d'expérience» pages (15-22) et pages (28-33).
- Directive DU CONSEIL du 12 juin 1986 relative à la protection de l'environnement et notamment des
sols, lors de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture (86/278/CEE), ANNEXE I A et
ANNEXE I B
- Département d'assainissement liquide Services d'assistance technique des
collectivités territoriales à l'épuration et suivi des eaux (SATESE)2001- Manuel du conducteur de
station de l'épuration des eaux usées, RADEEMA ,40 p.
- Echab, A., 1998. Reutilisation des boues de stations d'épuration des eaux usées en Agriculture :
Impact des métaux lourds. thèse de 3ème cycle, Univ. Cadi Ayyad, Fac. Sci. Semlalia, Marrakech,
133p.
- MAUDOUI M., (1999) - Séchage de boues : quelles solutions ?, 74 p..
- OUAZANI R., (2009) – Les boues des stations d'épuration. Cours Master I, Inge. de
Manage. et Assaini., Université Cadi Ayad, FSSM, 26 p..
- RADEEMA, (2011) - Marrakech Incinération. Document d'étude préliminaire, 27p.
- RADEEMA, (2011) - Traitement secondaire et tertiaire et Traitement des boues et du biogaz -
Traitement de l'air vicié, document PDF.
- actu-environnement.com/ae
- fr.wikipedia.org/wiki
- marrakechcode.com/eaux-usées-de-Marrakech/
- pathologie-beton.fr/pathologie