



Faculté des Sciences et Techniques
Marrakech



Département des sciences de la terre

Licence Sciences et Techniques

Eau et Environnement

Mémoire de fin d'études

**Les boues résiduaires de la station d'épuration
de Marrakech : caractéristiques et impacts
environnementales**

Soutenu par :

KARAFI Kaoutar & MOUSTAOUI Farida

Le 27 JUIN 2012

Devant le jury composé de :

Yamina BOURGEOINI : FST Marrakech (Encadrante)
Brahim IGMOULLAN : FST Marrakech (Examinateur)
M.El Mehdi SAIDI : FST Marrakech (Examinateur)

2011-2012



Nous tenons tout particulièrement à exprimer notre profonde gratitude ainsi que notre très grande reconnaissance et nos sincères remerciements à notre encadrante Mlle Yamina BOURGEOINI, Professeure à la faculté des Sciences et Techniques Marrakech, département des sciences de la terre pour l'encadrement attentionné, les conseils et critiques constructifs et pertinents qu'elle n'a jamais cessée de nous prodiguer tout au long de ce travail.

Nos vifs remerciements à notre encadrant Mr Yassine BISSI qui a tant déployé d'efforts pour la réussite de ce programme. Sa sympathie, son accueil chaleureux et sa disponibilité à rendre le service ont constitué, en outre, des ingrédients nécessaires au bon déroulement du stage.

Nos vifs remerciements s'adressent aussi à Mr M. AGOUSSINE et Mr M.E.SAIDI, professeurs à la faculté des Sciences et Techniques Marrakech, en leur exprimant notre profonde gratitude, et nos vifs remerciements pour leur disponibilité, aide, conseils et son grand soutien moral.

Nos sincères remerciements s'adressent également à Mr Brahim IGMOULLAN qui a bien voulu siéger dans ce jury.

Nos sincères remerciements s'adressent aussi à Mmes et Mrs les professeurs du département des Sciences de la terre, FST Marrakech, pour nous avoir permis d'acquérir une excellente formation en eau et Environnement, une formation didactique et appréciable tout au long de notre cursus. Nous leur exprimons notre reconnaissance et remerciements.

Merci A tous.



Ce mémoire est dédié A Nos Chers Parents, KARAFI Mokhtar, MOUSTAOUI Abderrahman, JAZOULI Khadija et ISSIL Rokia qui nous ont soutenu tout au long de nos études et qui sans leurs sacrifices, leur disposition de tous les moyens nécessaires et leurs compréhensions nous ne saurons parvenir à réaliser ce travail.

Nous les remercions pour tout ce qu'ils ont fait,

Que Dieu les récompense pour tous leurs bienfaits.

A nos Chers frères et sœurs : Ahmed, Mohamed, Salah Eldin et la belle Hasna.

Enfin une grande pensée à nos familles et à nos amis (es) qui nous ont soutenu tout au long de nos études.

Résumé

Ce travail consiste en une étude sur l'impact de la boue d'épuration mise en décharge sur l'environnement.

La fonction d'une station d'épuration est de traiter les eaux usées afin de pouvoir rejeter dans le milieu naturel une eau épurée. Ce traitement s'accompagne de la formation d'un sédiment résiduel, c'est la boue d'épuration (boue déshydratée).

Au cours de ces dernières années, la station de traitement et de réutilisation des eaux usées de Marrakech se concentre sur la problématique des boues d'épuration. A ce sujet, leur mise en décharge cause une problématique environnementale par la contamination des sols et par conséquent la nappe phréatique.

Les travaux effectués ont également permis de proposer des solutions qui diminueront l'impact de ces boues sur l'environnement.

Liste des Abréviations :

BP	: Boue Primaire.
BS	: Boue Secondaire.
CTO	: Composés Traces Organiques.
DBO5	: Demande Biochimique en Oxygène à 5 jours.
DCO	: Demande Chimique en Oxygène.
ETM	: Eléments Traces Métalliques.
FAB	: Filtre à Bandes.
MeS	: Matières en Suspension.
MeSV	: Matière en Suspension Volatile.
NTK	: Azote Total Kjeldhal.
PCB	: Polychlorobiphényles.
PE	: Poly-Electrolyte.
Pt	: Phosphore total.
RADEEMA	: Régie Autonome de Distribution de l'Eau et d'Electricité de Marrakech.
STEP	: Station d'Epuration des Eaux Usées.
UV	: Ultra Violet

Sommaire

Remerciement.....	2
Résumé.....	4
Abréviations.....	5
Introduction.....	8
Présentation de la RADEEMA.....	9
Chapitre1 : Généralité sur la région d'étude.....	10
I/ Contexte géologique et géographique.....	11
II/ Contexte climatologique et hydrologique.....	12
III/ Contexte démographique.....	13
Chapitre 2 : Le cycle de traitement des eaux usées.....	14
I/ Définition des eaux usées.....	15
II/ Assainissement liquide de la ville de Marrakech	15
III/ La station d'épuration des eaux usées	16
III-1/ Les objectifs de la STEP.....	18
III-2/ Les étapes de traitement des eaux usées.....	18
III-2-1/ Le prétraitement ou traitement primaire.....	19
• Résultat de traitement primaire.....	21
III-2-2/ Traitement secondaire.....	21
• Résultat de traitement secondaire.....	23
III-2-3/ Traitement tertiaire.....	24
• Résultat de traitement tertiaire.....	26
Chapitre 3 : Traitement de la boue.....	27
I/ Epaissement gravitaire.....	29
II/ La digestion anaérobie.....	30
III/ Stockage des boues digérées.....	33
IV/ Déshydratation.....	33
V/ Traitement de biogaz.....	34
V-1/ Désulfuration.....	34
V-2/ Stockage.....	34
V-3/ Cogénération.....	35
Chapitre 4 : Impact de la boue d'épuration mise en décharge sur l'environnement.....	36
I/ Présentation de décharge.....	37
I-1/ Situation géographique.....	37
I-2/ Caractéristique topographique.....	37
I-3/ Caractéristique géologique	38
I-4/ Hydrogéologie.....	38
Conclusion	39
II/ Problématique.....	40
III/ L'impact environnemental de la boue.....	40
III-1/ Impact sur le sol.....	41
III-2/ Impact sur les ressources en eau.....	41
III-3/ Impact sur l'air.....	41
IV/ Impact de la boue déshydraté.....	42
IV-1/ Quantité des boues déshydratées.....	42
IV-2/ Analyses et interprétation des boues déshydratées.....	43
IV-2-1/ La siccité.....	43
a- Définition.....	43
b- Méthodologie.....	43
c- Analyse et interprétation.....	43
IV-2-2/ L'ETM et CTO.....	44
a- Norme des boues déshydratées.....	44
b- Les analyses des boues de la STEP en 2010.....	45
c- Les analyses des boues de la STEP en 2012.....	46

IV-3/ L'impact des ETM sur les sols et les ressources en eau.....	48
IV-3-1/ Le Chrome hexavalent (Cr (VI)).....	49
IV-3-2/ L'impact du Chrome (VI) sur l'environnement.....	50
a- Sur le sol et les ressources en eau.....	50
b- Sur les micro-organismes.....	50
c- Sur les végétaux.....	50
IV-3-3/ L'élimination du Chrome.....	51
a- Réduction du Cr (VI) en Cr (III).....	51
b- Précipitation chimique du Cr sous forme hydrolyses.....	51
• Définition.....	51
• Mécanisme de précipitation.....	51
c- Traitement par électrocoagulation.....	52
V/ Solutions.....	52
V-1/ compostage de la boue déshydraté.....	52
V-1-1/ Définition.....	52
V-1-2/ Technique de compostage.....	53
V-1-3/ Qualité de compost produit.....	54
V-2/ Incinération.....	54
V-2-1/ Définition.....	54
V-2-2/ solution proposées par la RADEEMA.....	55
a- Description.....	56
b- Principe de fonctionnement.....	56
Conclusions.....	61
Liste des figures.....	62
Liste des tableaux.....	63
Annexes.....	64
Références bibliographiques.....	69

Introduction

La gestion des ressources en eau met en évidence la question de la capacité de production de l'eau en fonction des besoins des différents utilisateurs et de sa gestion par rapport à la demande sociale, dans un contexte de forte croissance démographique et d'augmentation des besoins en eau dans les différents secteurs d'activités.

La ville de Marrakech est caractérisée par une mauvaise répartition de précipitation et de sécheresse. En effet, les ressources en eaux totales sont estimées à 1.455 millions de m³ dont 935 Mm³ d'eau de surface et 520 Mm³ souterraine, alors que l'utilisation est estimée à 1.555 Mm³ dont 103 Mm³ pour l'eau potable et 1.452 Mm³ pour l'irrigation. Les perspectives d'évolution indiquent que ce déficit ne pourra être épongé que par un effort de mobilisation des ressources, et une récupération des eaux usées. Pour ce fait la RADEEMA a réalisé la 1^{ère} phase pour l'épuration des eaux usées, et la 2^{ème} phase pour la réutilisation des eaux traitées. En effet, ce projet de réutilisation de l'eau épurée soulagera le stress hydrique que connaît le bassin hydraulique.

L'épuration des eaux usées, avant leur déversement dans la nature, constitue un moyen efficace pour la lutte contre la pollution. Après l'épuration de ces eaux la station produit également de la boue. L'objet de notre projet de fin d'étude consiste à la réalisation d'une étude sur l'impact de cette boue d'épuration sur l'environnement. Afin de trouver une solution à cette situation.

Cette boue d'épuration constitue une source d'énergie non négligeable. La valorisation de cette dernière se fait au niveau de l'extraction du méthane, qui par son utilisation dans une unité de cogénération fournit de la chaleur et de l'électricité, nécessaires au fonctionnement de la station. Cependant les boues résiduelles générées par cette activité constituent une nouvelle menace pour l'environnement de par leur forte concentration en charge polluante. Dans ces conditions, on n'aurait pas protégé notre environnement mais uniquement transféré la pollution des eaux usées vers un nouveau sous-produit inconnu, dangereux et difficile à éliminer.

Le stage est effectuée au sein de département d'exploitation assainissement et exactement au STEP, ce qui nous permet d'acquérir d'avantage de connaissances sur la protection de l'environnement, des eaux superficielles, des nappes d'eau souterraines, d'améliorer la situation des espaces naturels et de minimiser les risques de contamination par les maladies transmissibles par les eaux usées non traitées ainsi que les mauvaises odeurs.

Présentation de la RADEEMA

En 1970 la distribution d'eau et l'électricité étaient gérées séparément. En effet c'est en 1962 que fût crée la Société d'Electricité de Marrakech (S.E.M) qui avait pour tâche d'assurer la distribution d'électricité au sein de la ville de Marrakech.

En 1964 la ville signe un protocole d'accords pour le rachat de la concession qui fût confiée à la Société Marocaine de Distribution.

Et c'est en décembre 1970 à la suite des délibérations du conseil communal de la ville entrant dans le cadre de la nationalisation des sections concédées qu'il fût décidé de la création de la Régie Autonome de Distribution d'Eau et d'Electricité de Marrakech.

Et c'est en 1984 que le conseil municipal vota la création de la Régie Autonome Intercommunale de Distribution d'Eau et d'Electricité de Marrakech.

La Régie Autonome Intercommunale de Distribution d'eau et d'électricité de Marrakech est un établissement semi-public à caractère industriel et commercial doté d'une autonomie financière. Elle a pour mission d'assurer la distribution d'eau et d'électricité au sein des préfectures de Marrakech Mènera, et Sidi Youssef Ben Ali.

Enfin le premier janvier 1998, la RADEEMA a pris en charge la gestion du service de l'assainissement liquide suite aux délibérations de la communauté urbaine de Marrakech a cause de l'augmentation de la densité de la population dans le milieu urbain, la ville de Marrakech a connu des problèmes d'ordre sanitaire et ceci est dû aux déchets d'origine humaine, des matières fécales, et d'urine qui présentent les sources d'une multitude d'infections et de maladies.

Les taux de raccordement pas réseau sont respectivement de :

- Eau : 94,7%.
- Assainissement liquide : 87,8%.
- Electricité : 93,5%.

Chapitre 1 : Généralités sur la région d'étude

I/ Contexte géologique et géographique

I-1/Géographie

La plaine de l'Haouz contenant la ville de Marrakech a une largeur de 150km d'Est en Ouest et de 40km du Sud au Nord, s'étend à l'intérieur du Maroc, sur environ 4000 km² entre le 31^{me} et le 32^{me} degré de la latitude Nord. Elle est constituée de chaîne de Haut Atlas au sud et le massif de Jbilate au Nord, le Moyen Atlas à l'Est et les collines de Mzoudia à l'Ouest. Son altitude s'abaisse régulièrement de l'Atlas aux Jbilet de 900mètres à 300mètres. L'Atlas culmine à 4165m (Jbel Toubkal) et les Jbilet à 1061m. Le point le plus occidental de la plaine est à 85km de la côte atlantique dont il est séparé par des Hauts plateaux (Fig.1).

I-2/Géologie

La plaine du Haouz connaît toute fois une répartition très inégale dans le sous-sol de la plaine allant du nord au sud du haut Atlas aux Jbilates. Tous les étages de la série géologique, du primaire au quaternaire récent, sont représentés. Elle est formée sur un substratum paléozoïque essentiellement schisteux et imperméable, ce substratum primaire schisteux est recouvert par des formations secondaires et tertiaires variées, notamment des grès rouges du Permo-Trias ainsi que des calcaires, des marnes et des grès du Crétacé et de l'Eocène puis des dépôts alluviaux graveleux datant de quaternaire ;ces dépôts sont le produit d'érosion des roches de l'atlas charriés par un réseau hydrographique et ils sont insérés dans une matrice argileuse. Ces dépôts détritiques, insérés dans une matrice argileuse sont caractérisés par leur extrême hétérogénéité. Les collines calcaires Jbel Guéliz et Koudiat al Abid sont les seuls reliefs de cette plaine, issus de l'érosion du socle paléozoïque. (Fig.1).

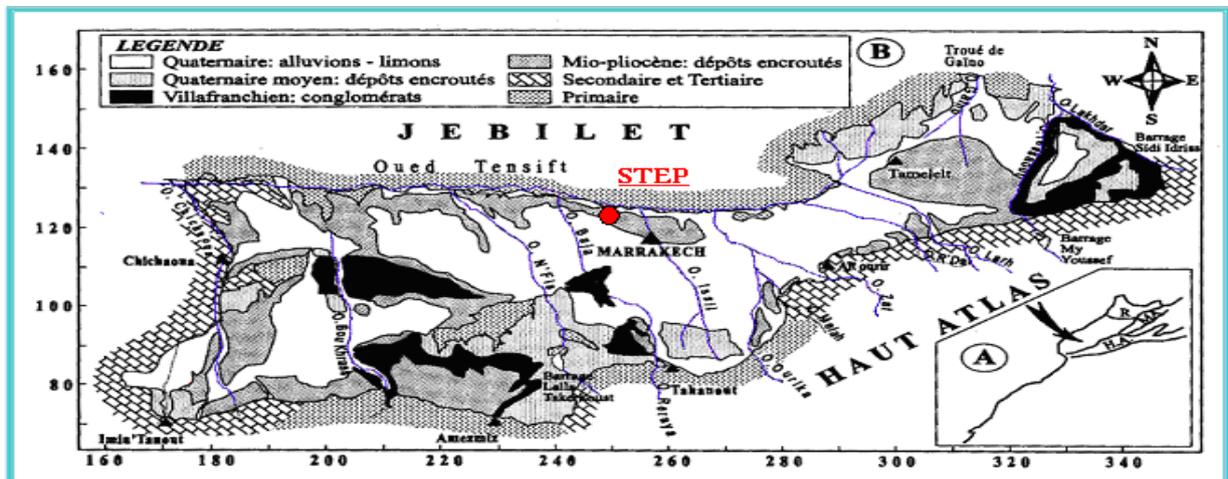


Fig.1 : Carte de situation géographique et géologique de la nappe du Haouz (RAZOKI,2000).

II/ Contexte climatologique et hydrologique

II-1/Climatologie

Le climat est de caractère aride avec de forts contrastes de températures qui sont élevées avec des amplitudes journalières et annuelles importantes (maximales moyennes mensuelles de 18 et 38°C respectivement en janvier et juillet, minimales de 5 et 19°C). La pluviométrie y est faible, partout inférieure à 300mm, et de plus irrégulière dans le temps et l'espace. L'humidité relative à Marrakech, s'abaisse de 73 % en décembre-janvier à 33 % en juillet-août; elle descend à 18 % l'après-midi en juillet et atteint souvent 0 %. L'évaporation en plaine est estimée à 2500mm/an.

II-2/Hydrologie

L'Oued Tensift qui constitue le principal cours d'eau de la région, coule d'Est en Ouest dans la plaine du Haouz au pied des Jbilet. Les principaux affluents de la rive gauche du Tensift prennent naissance dans la Province du Haouz : Oued R'Dat, Zat, Ourika, Rhéraya et N'fis. Le débit total produit par ces oueds est de l'ordre de 20 m³/s, soit un volume moyen annuel de 600 Mm³. La qualité des eaux de surface est bonne à l'exception de l'aval des rejets des centres. Alimentant en grande partie le barrage de Lalla Takerkoust, située à 30km environ en amont du centre Tnine l'Oudaya.

II-3/Hydrogéologie

Parmi les différentes nappes existantes, l'unique nappe qui présente une réelle importance dans la plaine du Haouz est la nappe phréatique : Seules les formations continentales de remplissage renferment une nappe importante et généralisée. Mais ces formations continentales sont très hétérogènes et de perméabilité très variable. Elle est limitée au Nord par les schistes imperméables des Jbilet, au Sud par la bordure nord du Haut Atlas, à l'Ouest par les calcaires du plateau de Chichaoua et à l'Est par l'Oued Lakhdar. La nappe circule du Sud vers le N.W ou le Nord. Par suite l'absence des formations calcaires du Secondaire ou du Tertiaire implique qu'il n'existe pas de nappes profondes sous l'ensemble de la plaine. La perméabilité moyenne diminue à mesure que l'on s'enfonce, les faciès devenant de plus en plus argileux. Les eaux de cette nappe circulent pratiquement dans les alluvions mio-

plioquaternaires ayant une hétérogénéité complexe, tant horizontale que verticale. Cette complexité est à l'origine de la variation des caractéristiques hydrodynamiques de cette nappe. L'alimentation de la nappe est assurée par les sous-écoulements des oueds atlasiques à leur entrée dans le Haouz grâce aux propriétés pétro-physiques des dépôts fluviaux fortement favorables à l'infiltration.

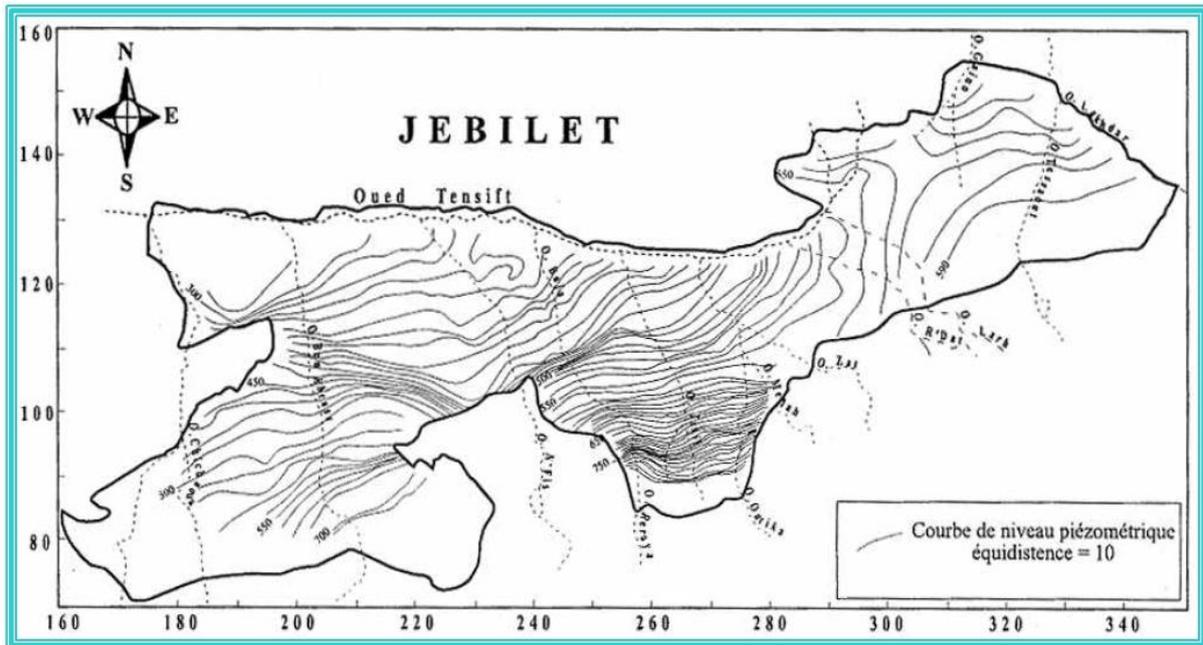


Fig. 2: Carte piézométrique de la nappe de Haouz de 1986 (DRPE, 1988).

III /Contexte démographique

En 1994, la population de la ville de Marrakech était de 672506 habitants et la densité de 12454 habitants/Km². La densité a doublé au cours des 23 dernières années : elle était de 6162 habitants/Km² en 1971 et 8143 habitants/Km² en 1982.

Ces dernières années, l'accroissement démographique à Marrakech s'est accéléré en raison d'un accroissement naturel et de l'exode rural. Il compte une population d'environ 909 000 habitants en 2010, concentrée surtout à Marrakech-Médina, Ménara-Guéliz et Sidi Youssef Ben Ali (Tab.1).

Années	1971	1982	1994	2004	2010
Populations (Hab)	332741	439728	672506	823154	909000

Tab. 1 : Evolution démographique de la ville de Marrakech de 1971 à 2010.

(<http://www.pnud.org.ma/agenda21/agenda/Agenda21/Marrakech/ProfilMarrakech.pdf>)

Chapitre 2 : Le cycle de traitement des eaux usées

I-Définition des eaux usées

Les eaux usées sont des eaux altérées par les activités humaines à la suite d'un usage domestique, industriel, artisanal, agricole, ainsi que les eaux de ruissellement.

La ville de Marrakech connait une croissance démographique importante qui va influencer sur la consommation de l'eau et par conséquent l'augmentation de production des eaux usées.

	2006	2010	2015	2020	2030
Population (HAB)	872.290	916.780	1.044.129	1.135.949	1.318.315
Consommations (m ³ /an)	35.287.470	37.451.058	49.353.356	56.056.810	66.480.524
Taux de raccordement au réseau d'assainissement (%)	89	95	95	98	98
Débit moyen total des eaux usées (m ³ /j)	73.142	82.815	109.186	127.932	151.721

Tab. 2 : Evolution de la production des eaux usées.

II-Assainissement liquide de la ville de Marrakech

Les eaux usées d'origine domestiques et industrielles sont collectées par un réseau d'assainissement complexe pour être traitées dans des stations d'épuration avant d'être rejetées dans le milieu naturel. Les longueurs des réseaux connaissent dernièrement une croissance importante résumée au tableau suivant:

Année	2006	2007	2008	2009
Nombre de clients	164773	177688	190619	197921
Longueur du réseau en (km)	1494	1635	1696	1780

Tab.3 : La croissance de réseau d'assainissement de Marrakech au cours des années.

Les zones desservies par le réseau d'assainissement liquide de la ville de Marrakech sont :

- **Arrondissement Médina ;**
- **Arrondissement Sidi Youssef Ben Ali ;**
- **Arrondissement Ménara ;**
- **Arrondissement Guéliz ;**

- Arrondissement Annakhil ;
- Municipalité Mechouar Al Kasbah.

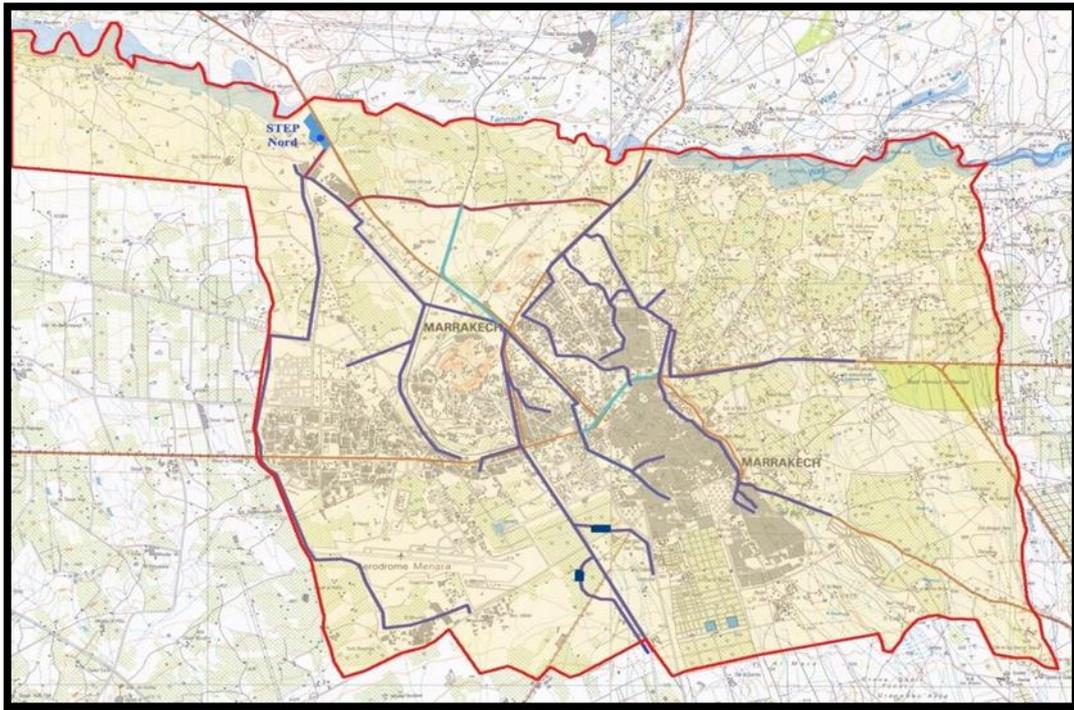


Fig.3 : Carte montre le réseau d'assainissement du Marrakech. (www.radeema.ma)

Le type de collecteur existant est en général unitaire sauf pour la zone industrielle Sidi Ghanem où les collecteurs sont pseudo-unitaires. Tous ces collecteurs mènent au point de déversoir d'orage à Elazzouzia puis à la station d'épuration.

III- La Station d'épuration des eaux usées

Il a fallu 5 ans depuis l'année 2006 pour mettre en place ce projet innovateur, qui été conçu dans le but d'accompagner le développement urbanistique et touristique de la ville.

La réalisation de ce projet s'inscrit dans le cadre de la diminution suffisamment de la quantité des substances polluantes continues dans les eaux usées pour que l'eau finalement rejetée dans le milieu naturel (oued Tensift), l'amélioration de la qualité de l'air à travers la contribution à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, préserver les ressources hydriques et l'environnements, la rationalisation et l'économie des richesses naturelles, d'une ville qui ne cesse de subir de fortes pressions dues à la fois, à la croissance démographique et à la poussée urbanistique qui ne cesse de s'accroître.

La station de traitement située au nord de la ville de Marrakech, sur la route de SAFI, en rive gauche de l'oued Tensift. S'étalant sur une superficie de 17ha. Le choix du site est motivé d'une part par, sa côte la plus basse qui permet la collecte et le transport gravitaire des eaux usées, et d'autre part par sa situation très proche de la décharge contrôlée et aménagée pour l'évacuation des sous produits du traitement, à savoir les boues déshydratées, le sable et les refus de grilles.

La station de traitement a été réalisée en deux phases:

- La première phase déroulée sur 2 ans (2006-2008) a concerné la construction et la mise en service du traitement primaire, de la quasi-totalité des eaux usées de la ville de Marrakech évaluées à 90.720 m³/jour. Elle est mise en service le Juillet 2008.
- La deuxième phase a été lancée dès fin 2008 et a pris fin en septembre 2011 avec la réalisation des traitements secondaire et tertiaire et la réutilisation des eaux traitées. La deuxième composante du projet qui est le réseau de réutilisation comprend 5 stations de pompage situées le long du parcours des conduites du nord vers le sud de la ville, et 80km de conduites reliant la station aux projets golifiques et la palmeraie. (Figure 6)

la station d'épuration des eaux usées de Marrakech dispose d'un système de cogénération d'énergie électrique à partir de biogaz produit par les digesteurs méthaniques, qui est de l'ordre de 30 mille KWh/jour, couvrant ainsi quelque 50 pourcents des besoins en énergie électrique de la station à terme de sa réalisation.



Fig. 4: Le réseau de réutilisation des eaux usées traité de Marrakech. (www.radeema.ma)

III-1/ Les objectifs de la Step

Parmi les objectifs pour laquelle la Station de Traitement et de Réutilisation des Eaux Usées était mis en place on peut distinguer :

- Amélioration des conditions sanitaires de la population.
- Réduction des nuisances olfactives.
- Réutilisation des eaux traitées pour l'irrigation des espaces verts.
- Préservation des ressources en eau.
- Développement touristique.

III- 2/ Les étapes de traitement des eaux usées

Les eaux usées provenant de la ville de Marrakech sont rassemblées dans un déversoir d'organe à Elazzouzia (à environ 2km de la STEP). L'eau est acheminée gravitairement jusqu'à l'entrée de la station, où va commencer le processus d'épuration.

- ❖ Les eaux usées entrées à la station ont un débit fluctuant selon les variations de climat :

	en temps sec	en temps de pluie
Débit moyen journalier en (m ³ /j)	90,720	—
Débit pointe en (m ³ /j)	184,896	235,872
Débit moyen eaux usées en (m ³ /h)	3,780	—
Débit pointe eau usée en (m ³ /h)	7,704	9,828

Tab.4 : Charge Hydraulique des eaux usées entrantes.

Remarque:

En temps de pluie, les eaux passent directement au by-pass qui va évacuer l'eau vers l'oued Tensift.

- ❖ La charge polluante acceptée par la station en temps sec est :

Les charges polluantes	Valeurs nominales (kg/j)
DBO5	58100
DCO	144600
MES	53000
NTK	11000
PT	2000

Tab.5 : Charge polluante nominale en temps sec.

❖ D'après le bulletin des analyses de la ligne eau du 21/05/2012 :

Paramètres	Concentration en (mg /l)
MeS	236
DBO5	340
NTK	89,9
Pt	10,21

Tab.6 : La concentration de charge polluante entrante à la STEP.

Donc l'objectif de traitement de ces eaux est de minimiser la concentration de certaines substances : DBO5, DCO, NTK, MES, N-NH4 +, et NO3 pour en fin réutiliser ces eaux pour l'irrigation.

L'eau entrante à la station passe par la fosse à bâtards à un volume égale 4,5m³ pour éliminer les déchets solides volumineux : les cailloux, les chiffons, les branches, les plastics...

III-2-1 : Le prétraitement ou le traitement primaire

Il consiste à faire passer les eaux usées dans :

- **Un système de dégrillage ;**
- **Un système de dessablage et de déshuilage ;**
- **Un répartiteur ;**
- **Des décanteurs ;**

a- Un système de dégrillage

Il retient les éléments les plus grossiers (>10mm) qui peuvent être retenu par une construction avec des ouvertures de taille uniforme. Selon le mode de nettoyage on distingue : dégrillage manuel et automatique.

b- un système de dessablage et de déshuilage

Les eaux sont, dans un second temps, écoulées dans un ouvrage combiné qui permet de récupérer les matières les plus lourdes qui se déposent au fond (les sables et les graviers) et les flottants qui sont récupérés en surface ce sont les huiles et les graisses qui sont difficilement biodégradables.

Remarque:

- Le sable est pompé vers un Laveur de sable pour l'éliminer de l'eau puis il est rejeté dans la décharge.
- Au niveau de déshuileur, il y a une pompe qui envoie la graisse vers l'unité de traitement de graisse.

c- Le répartiteur

Les eaux prétraitées rejoignent un répartiteur dont la fonction est de répartir le débit sur les trois décanteurs circulaires.

d- Les décanteurs

Les décanteurs consistent à laisser l'eau au repos durant deux heures et demie. Les matières en suspension tombent au fond du bassin sous l'effet de pesanteur, elles constituent des boues qui sont évacuées vers la filière de traitement des boues. Alors que les graisses flottent à la surface puis ratisser par les racleurs est évacué vers le traitement de graisse.

Chaque décanteur comporte deux racleurs : un racleur superficiel pour les matières flottantes et racleur au fond contre l'accumulation des boues.

Remarque:

La hauteur de la boue ne doit pas dépasser 10cm au niveau de décanteur.

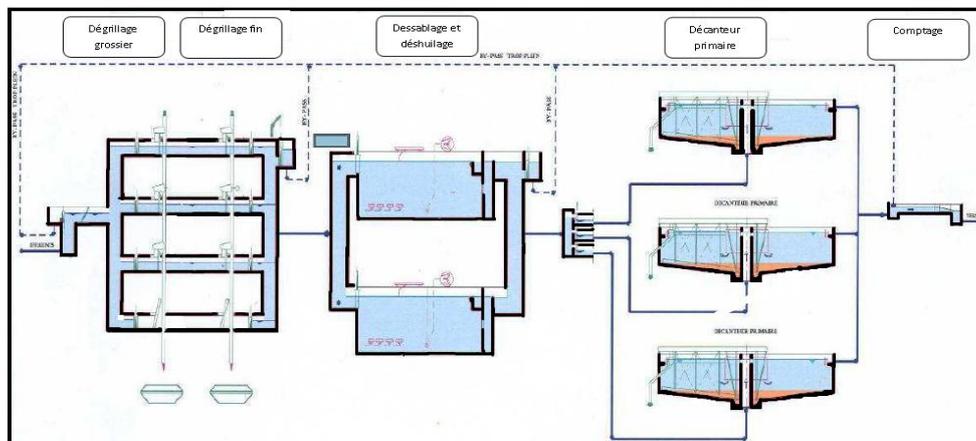


Fig.5 : Schéma de traitement primaire des eaux usées.

Résultat de traitement primaire

- ❖ Charge polluante en sortie du traitement primaire :

Charge polluante	Valeurs nominales en (kg/j)
DBO5	39500
DCO	96882
MeS	16960
NTK	9350
Pt	1800

Tab.7 : La charge polluante après le traitement primaire.

- ❖ L'efficacité du traitement primaire est estimée donc à:
 - Une réduction de **90 %** des matières décantables (totales et volatiles) ;
 - Un abattement de la DBO5 et de la DCO de respectivement **+/- 32 %** ;
 - Un abattement limité à **15 %** pour le NTK suivant estimation Phase 1 ;
 - La valeur considérée est inférieure (+/- 9%) ;
 - Un abattement probable de **10 %** pour le Pt.
- ❖ D'après le bulletin des analyses de la ligne eau du 21/05/2012 :

Paramètres	Sortie primaire en (mg/l)
MeS	258
DBO5	440
NTK	101,12
Pt	12

Tab.8 : La concentration de la charge polluante en sortie primaire.

À l'issue de l'unité de décantation primaire, on a 3 sorties : eaux traitées, boues primaires et graisses. Les eaux traitées passent par un chenal de sortie (Venturi), avant d'être déchargé vers le traitement secondaire.

III-2-2- Le traitement secondaire

Le principal objectif de ce traitement est de réduire la pollution carbonée et azotée essentiellement soluble en eau (dioxyde de carbone) et en boues.

L'eau issue de la décantation primaire est dirigée vers la première chambre de répartiteur ou se trouve aussi la boue recyclée puis elle passe vers :

- **La zone de contact;**
- **Les sélecteurs;**

- **Les bassins d'aérations;**
- **L'ouvrage de dégazage;**
- **Les clarificateurs.**

a- Zone de contact

Elle est constituée de quatre unités, chaque unité à un volume de 608m³ et une surface de 152m².

b- Les sélecteurs

Ce sont les entrées des bassins d'aérations, ils ont pour but de limiter le risque de production d'organisme filamenteux. Chaque sélecteur est disposé en amont du bassin d'aération.

c- Les bassins d'aérations

L'eau s'écoule gravitairement vers les quatre bassins d'aération ouverte d'un volume total de 75000m³, ils consistent un traitement biologique, dans lesquels on injecte de l'air grâce à des diffuseurs d'air. Ce traitement repose sur l'activité des bactéries qui vont se nourrir des matières organiques et d'éliminer le carbone, l'azote et le phosphore contenus dans les eaux résiduaires.

d- Ouvrage de dégazage

C'est la sortie de bassin d'aération, il est pour but de débarrasser la liqueur mixte des bulles d'air, et pour prévenir l'éventuelle flottation d'une partie des boues dans les clarificateurs. Le volume de la zone de dégazage est 323m³, et le temps de séjours moyen est 8min.

e- Les clarificateurs

L'eau est ensuite laissée au repos durant environ neuf heures et demie dans quatre clarificateurs circulaires gravitaires d'un volume total utile de 40000m³. L'eau et les boues biologiques (matière en suspension) s'y séparent par un processus naturel de décantation.

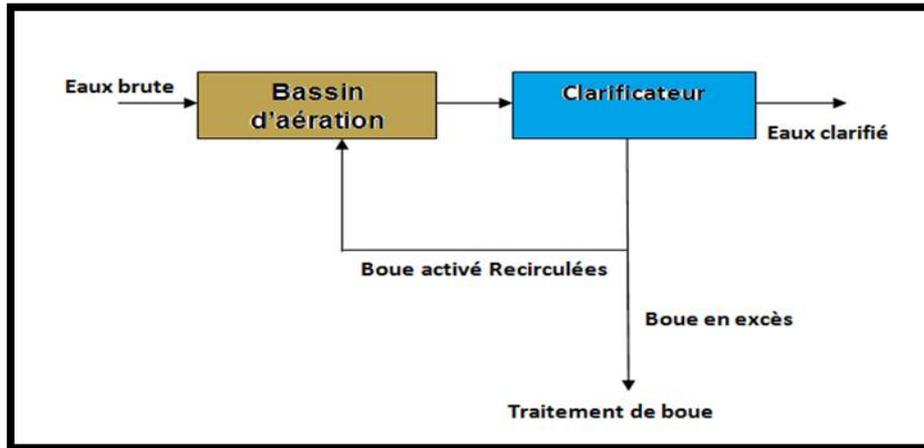


Fig.6 : Schéma de traitement secondaire.

Résultat de traitement secondaire

Les matières en suspension à éliminer sont constituées, d'une part des matières en suspension naturellement présentes dans l'eau clarifiée, et d'autre part de celles résultant du dosage du chlorure ferrique (phosphate ferrique et hydroxyde ferrique) et du poly-électrolyte.

Paramètre	Concentration en (mg/l)
MeS sortie clarificateur	15
Fe(OH) ₃	5,2
FePO ₄	24,3
PE	0,05

Tab.9 : La charge polluante à la sortie de clarificateur.

❖ D'après le bulletin des analyses de la ligne eau du 21/05/2012 :

Paramètres	Sortie secondaire en (mg/l)
MeS	86
DBO ₅	15
NTK	3,89
Pt	5,94

Tab.10 : La concentration de charge polluante en sortie secondaire.

- ❖ Une partie importante de l'eau ainsi traitée est rejetée au milieu naturel (oued Tensift) et la reste passe au traitement tertiaire en fonction du débit d'eau d'irrigation demandé.
- ❖ Une partie des boues secondaires est évacuée vers le traitement des boues, l'autre partie recyclée vers la première partie de la chambre de répartition puis vers le bassin d'aération pour maintenir la masse biologique nécessaire au fonctionnement de l'installation.

III-2-3-Traitement tertiaire

Le traitement tertiaire vise à éliminer les dernières MeS et le phosphore, Plus une désinfection des eaux est impérative pour l'élimination des germes pathogènes présents dans l'eau.

- ❖ Ce traitement se fait en trois étapes :
 - **Une coagulation floculation;**
 - **Une filtration;**
 - **Désinfection UV et Chloration.**

a- coagulation-floculation

L'eau clarifiée est pompée vers deux réservoirs de coagulation. Chaque réservoir est équipé d'un mélangeur rapide permettant de disperser le coagulant énergiquement. Le coagulant est le chlorure ferrique en solution (40%). Afin d'avoir une bonne répartition des temps de séjour, l'arrivée d'eau s'effectue au bas du réservoir et la sortie s'effectue en haut. Après la coagulation, l'eau passe à deux flocculateurs où le flocculant est le poly-électrolyte. Chaque flocculateur alimente un module de cinq filtres.

Remarque:

- Dosage de chlorure ferrique : 34 mg/l.
- Dosage de poly-électrolyte : 0,05 mg/l.

Résultat

- Concentration en P-PO4 IN : 14 mg-P/l.
- Concentration en P-PO4 OUT : 9 mg-P/l.

b- Filtration

A la sortie des flocculateurs, l'eau pénètre à une vitesse lente dans le chenal d'alimentation de filtres, quatre chenaux placés en lignes sont prévus, et chaque chenal alimente un module de cinq filtres. L'eau est admise dans le compartiment d'alimentation des filtres par une vanne murale à commande pneumatique. La vidange des chenaux d'entrée se fait au moyen de vannes manuelles vers le chenal d'évacuation des eaux boueuses de lavage.

La filtration est réalisée par une couche de sable de granulométrie de 0,5 à 0,6mm et de densité apparente de 1,6Kg / m³.

Remarque:

Une fois les filtres sont colmatés, il faut procéder à les laver, le lavage comprend deux phases: injection simultanée d'air et d'eau puis un rinçage à l'eau seulement.

c- Désinfection UV et Chloration

➤ Désinfection U.V

Désinfection U.V. est la technologie la plus rentable et la plus efficace pour lutter contre l'ensemble des micros organismes contaminant l'eau. De plus, il ne laisse aucun produit chimique dans l'eau et ne lui change pas le gout. Le traitement eau par ultraviolet produit une eau potable sure.

❖ Critères de dimensionnement :

Débit maximum en (m³/h)	4,400
Doses UV en (mj/cm²)	40

➤ Chloration

L'efficacité de cette méthode est de détruire les pathogènes ciblés.

Résultat de traitement tertiaire

❖ D'après le bulletin des analyses de la ligne eau du 21/05/2012 :

Paramètres	Sortie tertiaire en (mg/l)
MeS	3,69
DBO5	4
NTK	4,48
PT	6,05

Tab.11 : La concentration de charge polluante en sortie tertiaire.

Pour l'effluent du traitement tertiaire, les performances complémentaires suivantes sont demandées :

	DBO5	DCO	MeS	NGL	Pt
Concentration en (mg/l)	<10	<95	<5	<20	<Pt

Tab.12 : Performances pour l'effluent du traitement tertiaire.

. L'eau traitée est finalement stockée dans un bassin d'une capacité de 9000m³, avant de passer par un circuit de 80kilomètres de conduites alimenté par cinq stations de pompage.

Ce réseau permettra d'acheminer l'eau aux différents points d'usage, notamment la palmeraie de Marrakech (810ha) bénéficiant de 3 millions de m³ d'eau par an, ainsi que les 19 complexes golfs qui seront alimentés en 23 millions de m³ d'eau par an.

Chapitre 3 : Traitement de la boue

La ligne eau produit deux types de boues, les boues primaires issues de la décantation et les boues secondaires issues du traitement biologique. Ces boues sont composées de:

Composition de la boue	Substances organiques	Fluoranthène
		Benzofluoranthène
		Polychlorobiphényles
	Substances minérales	Cadmium
		Chrome
		Cuivre
		Mercure
		Nickel
		Plomb
		Zinc
	Autres substances	Champignons
		Virus
Microbes		

Tab.13 : la composition de la boue primaire et secondaire.

Le traitement des boues se fait pour les raisons suivantes :

- Réduction de volume (déshydratation des boues).
- Réduction de masse (stabilisation aérobie-anaérobie).
- Augmentation de la fraction solide des déchets.

❖ Les boues sont caractérisées par :

➤ La siccité : les boues sont constituées d'eau et de matières sèches. La siccité est le pourcentage massique de matière sèche. Ainsi une boue avec une siccité de 10 % présente une humidité de 90 %.

- Boues liquide : siccité de 0 à 10%.
- Boues pâteuses : siccité de 10 à 25%.
- Boues solides : siccité de 25 à 85%.
- Boues sèches : siccité supérieure à 85%.

➤ Le taux de matières volatiles sèches (MVS) : la matière sèche est constituée de matières minérales et de matières organique qui sont appelées matières volatiles sèches. La concentration en MVS est un taux par rapport à la matière sèche totale. Le suivi de ce taux permet de connaître la stabilité d'une boue sur une échelle.

- ❖ Les étapes de traitement de la boue :

Ces deux types de boue primaire et secondaire vont subir un traitement spécial résumé aux étapes suivantes :

I/Épaississement gravitaire

Dans un souci environnemental visant à limiter la consommation de réactifs sur la station, la solution de l'épaississement gravitaire a été adoptée au lieu de l'épaississement mécanique au polymère. Les boues issues des décanteurs primaires sont généralement épaissies par un épaisseur gravitaire, et les boues biologiques par flottation ou centrifugation. L'objectif de l'épaississement est d'augmenter la concentration des boues en vue de les envoyer vers la digestion avec une concentration suffisante (entre 50 et 70g/l).

- ❖ Récapitulatif des boues avant et après l'épaississement :

	Unité	valeur nominale avant l'épaississement	valeur nominale après épaississement
MeS* Primaires	kg/j	40.523	37.281
MeSV	kg/j	26.268	24.166
volume BP	m ³ /j	5.400	532
MeS ** Secondaires	kg/j	27.025	24.863
MeSV	kg/j	20.809	19.144
volume BS	m ³ /j	3.378	553
MeS	kg/j	67.548	62.144
MeSV	kg/j	47.077	43.310

Tab.14 : La quantité MeS, MeSV et le volume de boue avant et après l'épaississement.

L'extraction des boues des épaisseurs se fait par le biais de 3 pompes volumétriques de 7 à 20 m³/h. Les épaisseurs sont alimentées par le haut et les boues sont reprises à l'herse et envoyées par pompage vers les digesteurs.

Remarque 1: Cette étape peut être précédée de l'ajout de flocculant organique de synthèse (poly électrolytes) ou minéraux (chaux, sels de fer ou d'aluminium), afin de faciliter la séparation des phases solides et liquides des boues.

Remarque 2: les boues secondaires provenant de traitement biologique passent au flottateur, ce dernier est basé sur l'injection des polymères dans les boues, ce qui sépare les phases liquides et solides par différence de densité, les boues provenant de flottateur sont stockées et homogénéisées dans une cuve couverte de 100m³ avant d'être pompées vers la digestion anaérobie des boues. Cette cuve est située à proximité immédiate des digesteurs. Elle est

équipée de deux agitateurs. Les boues secondaires sont pompées après vers la digestion à l'aide de pompe volumétrique.

II/ La digestion anaérobie

Les graisses et Les boues mixtes (regroupent les boues issues d'épaississeur et de flottateur) sont généralement fermentescibles et se prêtent bien par voie anaérobie : La méthanisation ou digestion anaérobie.

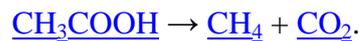
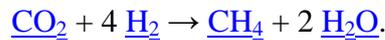
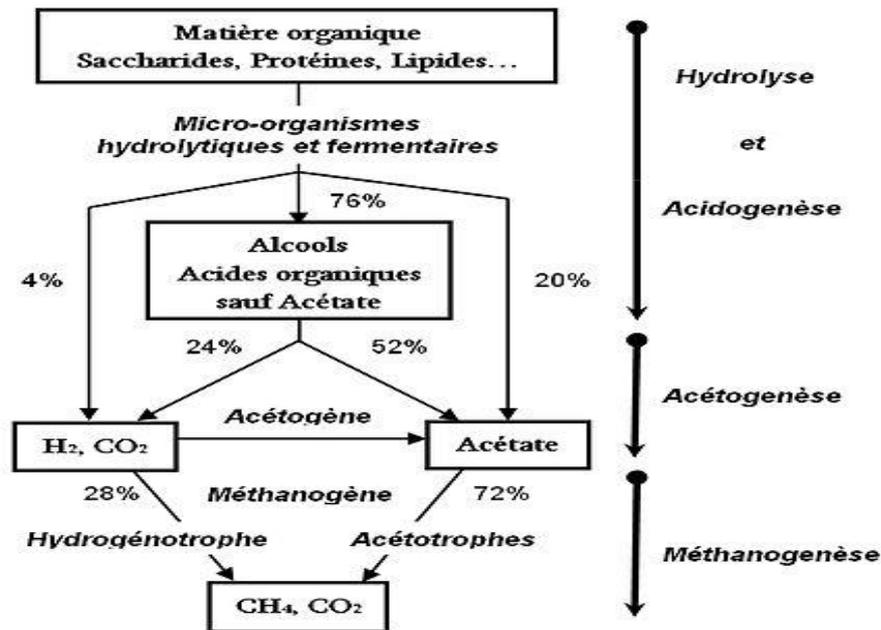
C'est un procédé naturel de transformation de la matière organique en énergie par des bactéries en absence d'oxygène. Conduite dans des digesteurs à l'intérieur desquelles les réactions de fermentation sont optimisées et contrôlées, il produit du biogaz valorisable en énergie renouvelable composé majoritairement de méthane, tout en réduisant la moitié de taux de matières organiques de nombreux déchets ou sous-produits biodégradables. Le résidu de la digestion (ou digestat) est stable, désodorisé, débarrassé en majeure partie des germes pathogènes et il présente des bonnes caractéristiques de déshydratation induisant une siccité finale plus élevée.

❖ Traitement de boue au niveau de digesteur:

Les boues sont extraites par pompe des épaisseurs et des flottateurs, et dirigées directement vers le digesteur. Le volume mis en œuvre est 24000m³. Il se répartit sur quatre files soit 6000 m³/file. Elles y séjournent pendant 3 à 4 semaines. Les digesteurs sont des enceintes fermées, privées d'oxygène. Ils sont maintenus à une température de 37°C (La digestion anaérobie est du type mésophile) pendant un temps de séjour supérieur à 20 jours et brassés pour maintenir des conditions favorables au développement de micro-organismes. Plusieurs populations bactériennes vont se développer et transformer les substrats organiques complexes à longue chaîne carbonée en molécules simples à un seul carbone : méthane (CH₄) et dioxyde de carbone (CO₂). Il y a ainsi production de biogaz. (Voir la partie de biogaz)

On distingue classiquement trois phases successives pour la méthanisation:

- L'hydrolyse et l'acidogénèse.
- L'acétogénèse.
- La méthanogénèse.



❖ Les paramètres de digestion anaérobie :

Température (°C)	entre 25 et 40
pH	entre 6,8 et 7,4.
Le temps de séjour moyen (jours)	20

Tab.15 : Les paramètres de digestion anaérobie.

Remarque

a) Brassage des boues

C'est un point relativement délicat à maîtriser, car Le digesteur doit être complètement mélangé pour assurer une digestion efficace.

b) Chauffage du digesteur

Le chauffage des digesteurs se fait par un circuit externe de recirculation: les boues sont pompées depuis le fond du digesteur. Elles passent dans un échangeur «eau chaude/boues».

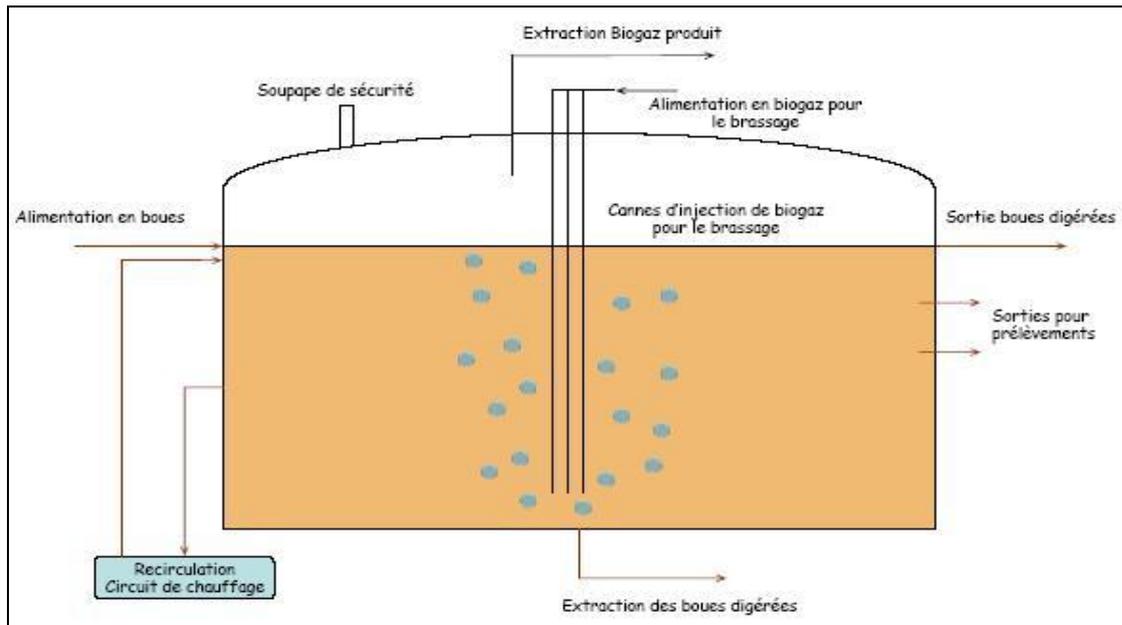


Fig.7 : Schéma de fonctionnement du digesteur.

Résultat :

- Dégradation de 50 % des matières volatiles des boues primaires;
- Dégradation de 40 % des matières volatiles des boues secondaires.

Donc 45,6 % de la matière volatile est détruite.

	Unité	Condition nominale
MeS Primaire	Kg/j	25.198
MeSV	Kg/j	12.083
Volume	m ³ /j	532
MeS Secondaires	Kg/j	17.205
MeSV	Kg/j	11.486
Volume	m ³ /j	553
MeS total	Kg/j	42.403
MeSV total	Kg/j	23.569
Volume total	m ³ /j	1.085

Tab.16: Récapitulatif des boues digérées.

Tout volume de boues entrant est égal au volume de boues digérées qui en sort.
L'extraction des boues digérées se fait par 4 pompes volumétriques de 112 m³/h.

III/Stockage des boues digérées

Après la digestion, les boues digérées s'écoulent gravitairement vers le stockeur (un bassin tampon couvert) placé en amont de la déshydratation. Le stockage des boues digérées doit présenter une capacité de stockage de un jour à la charge nominale, soit un volume de 1200m³ utile.

Le volume de la bâche est de 1800m³, correspondant à 2 jours de stockage et permettant de gérer le fonctionnement de la déshydratation 6 jours sur 7.

IV/ Déshydratation

Les boues digérées sont envoyées du stockeur de boues vers la déshydratation. Cette opération est effectuée sur des filtres à bandes FAB (Photo 1). Le conditionnement pour la déshydratation est réalisé à l'aide de polymère en poudre et de chaux.

➤ Déshydratation par polymère :

Pour obtenir des boues pâteuses qui occupent 10 fois moins de volume que lorsqu'elles étaient liquides. Les boues sont conditionnées avec des polymères pour améliorer les performances de déshydratation.

➤ Stabilisation à la chaux :

C'est le processus où la boue est mélangée avec la chaux pour élever le pH à plus de 12. Une élévation de température et de pH réduisent les agents pathogènes et les mauvaises odeurs. Donc le pH doit au minimum atteindre 12 pour deux heures de traitement suffisante.

Ce traitement en chaux augmente aussi la siccité à une valeur proche de 30% suivant le dosage réalisé. Pour atteindre une siccité de +/- 30% à l'aide de chaux vive, il faut un dosage de 150kg chaux / tonne de MeS pour une siccité initiale de 26%.

Résultat

Les boues déshydratées du mois de Mai ont une siccité supérieure à 14% donc elles sont à un état pâteuse.

❖ D'après le bulletin d'analyse du mois de Mai :

	Phase 1	Phase 2
MS boues digérées en (g/l)	32 (± 3)	32 (± 8)
Siccité en %	14	14
Boues déchargées en (tonne/j)	42 (± 23)	10 (± 2)

Tab.17 : Récapitulatif des boues déshydratées.

 **Les boues déshydratées sont rejetées dans la décharge.**

V/Traitement de biogaz

Le traitement de la boue présente l'avantage non seulement de stabiliser la boue en réduisant sa teneur en matières organiques mais également de produire un biogaz, utilisé ultérieurement pour la production d'électricité et de chaleur utilisée pour le réchauffement des boues via la cogénération. Le biogaz de la station d'épuration est composé principalement de méthane CH₄ (60% à 65 % environ), de dioxyde de carbone CO₂ (35 % environ), et il contient également de l'hydrogène sulfuré H₂S (de 0,3 à 0,5 %).

La production de biogaz est calculée sur base de la dégradation de la matière organique.

V-1/ Désulfuration

Le sulfure d'hydrogène est typiquement le contaminant qui pose le plus de problèmes du fait de sa toxicité et de son caractère corrosif pour la plupart des équipements. De plus, la combustion du H₂S émet du dioxyde de soufre SO₂, nocif pour l'environnement. C'est pour cela qu'il faut séparer l'H₂S le plus rapidement.

Après production par les digesteurs, le biogaz est envoyé par un by-pass vers la désulfuration, qui fonctionne par l'injection des polymères qui séparent l'hydrogène de soufre de manière autonome.



V-2/ Stockage

Après désulfuration, le biogaz est stocké dans le gazomètre. L'existence de deux gazomètres chacun d'eux à une capacité de stockage de 2000m³. La somme des volumes des deux gazomètres conduira à une capacité de stockage équivalente à :

- +/- 23 % de la production journalière attendue pour un biogaz à 65% de méthane.
- +/-21,1% pour un biogaz à 60% de méthane.

Remarque:

En cas de surproduction de biogaz et après remplissage du gazomètre, le biogaz excédentaire est brûlé dans la **torchère**. Pour des raisons de sécurité, cette torchère permet de brûler l'ensemble de la production de biogaz de la station, soit 750 m3/h.

Elle fonctionne de manière autonome. L'existence de deux torchères d'une capacité de 600 Nm³/h.

V-3/ Cogénération:

Les biogaz issus de la désulfuration et de Stockage permettent au moyen de deux unités de cogénération indépendantes permettant de brûler 349 Nm³/h de biogaz, produisant 834 kWh d'énergie électrique. Chacune d'eux produit deux sortes d'énergie : l'énergie électrique et l'énergie thermique. Le bilan énergétique est de :

- +/- 35 % en énergie électrique soit 1,47 MW.
- +/- 45 % en énergie thermique soit 1,9 MW.

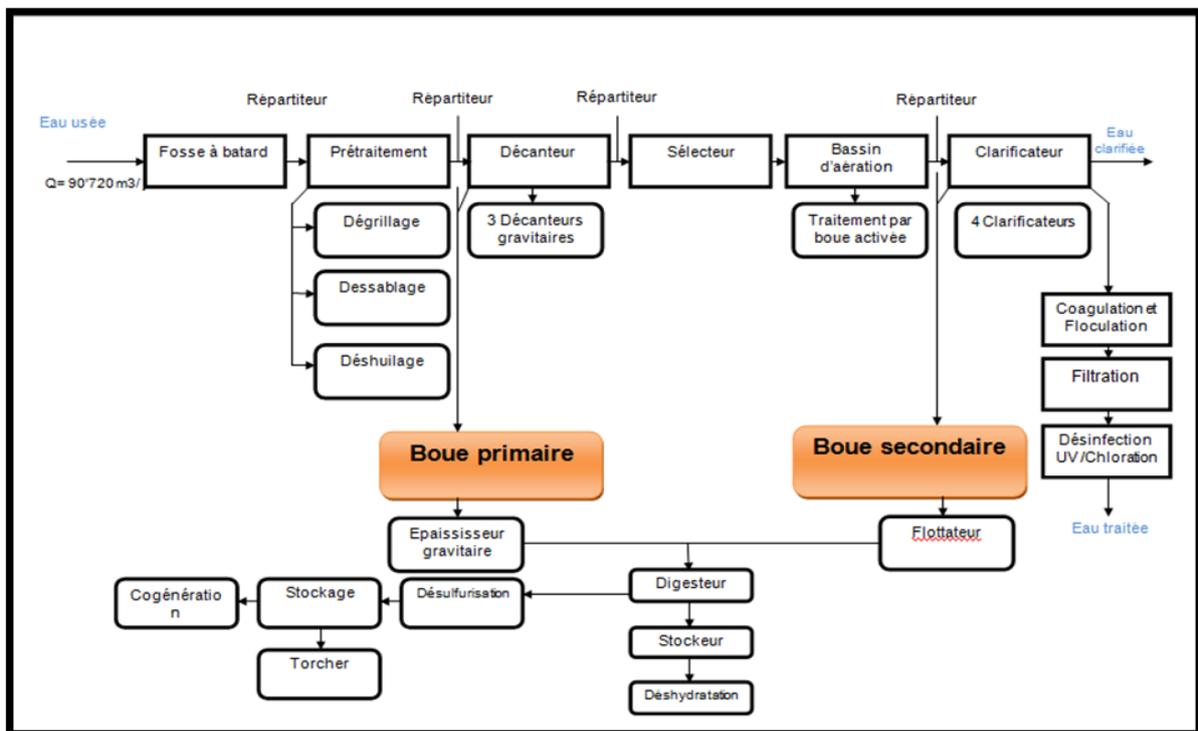


Fig. 8 : Schéma de traitement des eaux usées, des boues, et de biogaz.

Chapitre 4 : Impact de la boue d'épuration mise en décharge sur l'environnement

I/ Présentation de décharge

I-1/ Situation géographique

La décharge publique de Marrakech est un site non contrôlée se trouve au nord de la ville environ 500m après la traversée du pont de l'oued Tensift, en rive droit de l'oued. Elle a été ouverte en 1978 et elle s'étend sur une superficie de 14hectares. Elles présentent des risques pour l'environnement présentés essentiellement dans la dégradation de la qualité des eaux de la nappe phréatique et de l'oued Tensift.

Le site de décharge est environ 1km de STEP ou les boues traitées sont rejetées dans un terrain de superficie 1,5Hectards dans la décharge.



Fig.9 : Carte de situation de l'extension de la décharge et de la STEP.

I-2/ Caractéristiques topographiques

Le site de décharge se situe à la limite de la plaine alluviale sud de l'oued Tensift. Ce dernier apparaît aujourd'hui comme un inconvénient majeur, ne l'était pas au moment du choix à cause du caractère déjà très pollué de l'oued en amont (Commune urbaine de Marrakech, Juin 2006).

La décharge présente une topographie presque régulière, avec une légère pente (moins de 5%) de l'Est vers l'Ouest.

I-3/Caractéristiques géologiques

La décharge chevauche deux formations différentes au niveau lithologie et âge :

- La formation qui constitue les 2/3 du site, à l'est, est constituée par des schistes du Paléozoïque. Ce sont les schistes de Sarhlef qui ont l'aspect de flysch à petits bancs gréseux.
- La formation qui représente le 1/3 restant, du côté ouest en direction de l'oued Tensift, est constituée à la base par des conglomérats et des croûtes calcaires et à la partie supérieure par du limon appartenant au Quaternaire (Hakkou. 2001).

I-4/ L'hydrogéologie

Le site est caractérisé par deux milieux qui contiennent des réservoirs: un poreux et l'autre fissuré. Le premier présente une porosité d'interstices avec des pores interconnectés. et le deuxième présente une porosité de fissure avec des fractures ouvertes, diversement interconnectées.

Les milieux fissurés sont sensibles à la variation climatique saisonnière et leur alimentation est plus ponctuelle et se fait au niveau des zones d'infiltrations préférentielles fracturées (Toughzaoui. 2009).

Les formations aquifères les plus importantes sont : les schistes de Sarhlef et le granite de Bamega. Ces deux formations sont affectées d'une forte fracturation qui engendre une continuité hydraulique entre elles. La nappe d'eau fissurale contenue dans ces formations est relativement peu profonde (6 à 10mètres).

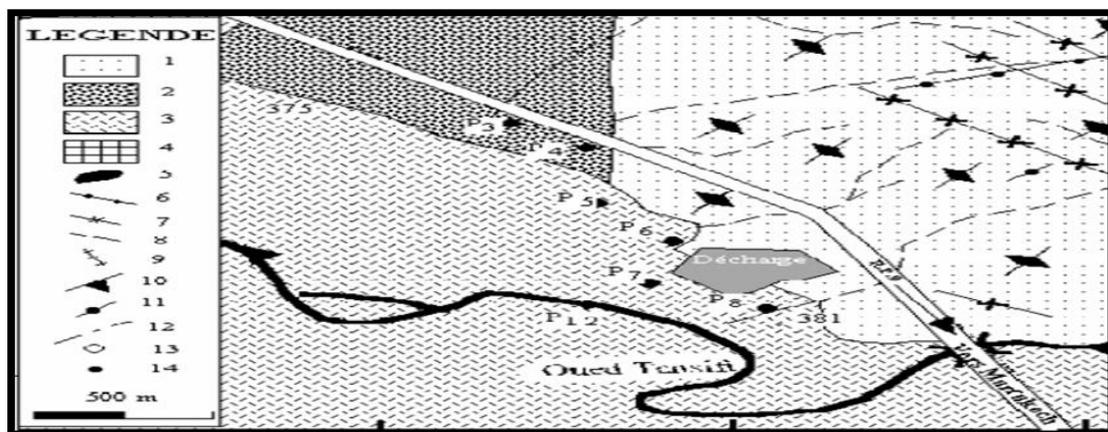


Fig.10 : Géologie du secteur de la décharge publique de Marrakech (Hakkou, 2001).

Légende :

1-Schistes de Sarhlef (Viséen supérieur – Namurien). 2-Conglomérats ou cailloutis et limons en croûte. 3-alluvions récentes. 4-Granite du Bamega. 5-Filon de rhyolite. 6-Filons quartzocarbonatés minéralisés en sulfures de Pb. 7- Filons quartzo-carbonatés. 8-Filons de quartz. 9- Filons de quartz contenant des minéralisations de différents sulfures. 10-Schistosité.11- Stratification. 12-Faille. 13- Forage. 14–Puits.

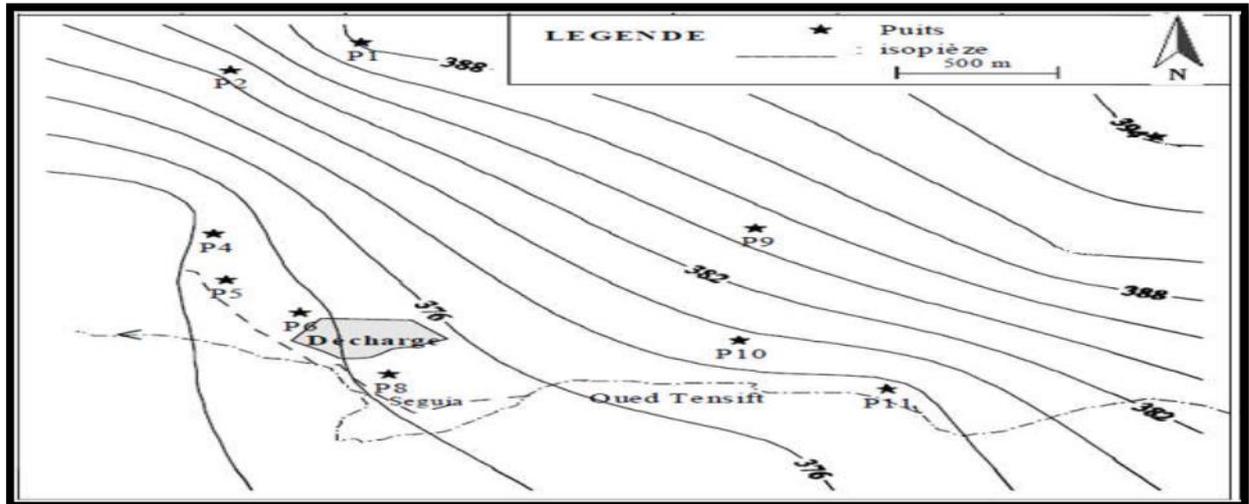


Fig.11 : Piézométrie de la région de la décharge publique de Marrakech réalisée à partir des données recueillies en juin 1999.

- P1 à P9 : des puits implantés dans des schistes.
- P10 à P11 : des puits implantés dans l'aquifère du Granite.

La zone d'alimentation de cette nappe est située au nord dans la partie la plus élevée des Jebilets.

La carte piézométrique (Fig. 4) montre que l'écoulement de la nappe se fait généralement du NE vers le SW en direction de l'oued Tensift qui forme en même temps l'exutoire naturel dans cette région.

Conclusion

De points de vue géologique : prédominance de deux unités lithologiques i) des alluvions à matrices sableuse ii) un socle schisteux.

De point de vue hydrogéologique : la décharge est caractérisée par la présence de la nappe d'eau dans des faibles profondeurs. L'écoulement est du NE-SW avec un gradient faible qui témoigne d'une vitesse d'écoulement faible. Les formations affectées d'une forte fracturation qui engendre une continuité hydraulique entre elles.

II/ Problématique

La pollution des eaux brutes par les métaux lourds est l'un des problèmes actuels dont la gravité augmente avec le développement industriel.

La station d'épuration urbaine a pour rôle d'éliminer la pollution contenue dans les effluents domestiques et industriels avant leur rejet dans le milieu naturel. Si l'eau, en fin de traitement, est épurée, la pollution initiale se trouve stockée et concentrée dans les boues issues des diverses étapes de traitement de l'eau, donc dans la boue déshydratée.

Le problème posé, au niveau de la station d'épuration, se situe au niveau des boues déshydratées, car elles sont riches en éléments traces métalliques, CTO, et des agents pathogènes.

Contrairement aux polluants organiques susceptibles de se dégrader, les éléments traces métalliques peuvent être nocifs à l'environnement (ressources en eaux, le sol, et l'air) du fait de leur stabilité et de leur persistance dans la nature.

La principale voie d'élimination de ces boues est la mise en décharge, cela en effet peuvent provoquer la contamination du milieu écologique s'ils étaient lixiviés vers les eaux souterraines, les eaux de surfaces où consommés par les êtres vivants.

Ce problème est récent, mais il deviendra de plus en plus grave avec le temps, car la production des boues déshydratées est amenée à augmenter dans les années à venir.

L'industrialisation croissante, l'accroissement de la population et de son niveau de vie, et l'amélioration de la qualité des effluents liquides de la station sont des facteurs ayant contribué à ce que les rejets des boues déshydratées augmentent.

III/ L'impact environnemental de la boue d'épuration mise en décharge

Les boues d'épuration sont considérées comme des déchets dangereux, elles sont potentiellement contaminées par un ensemble de substances polluantes, en raison des processus physico-chimiques impliqués dans le traitement des eaux usées, qu'il tend à se concentrer les métaux lourds et les composés organiques faiblement biodégradables ainsi que, des organismes pathogènes (virus, bactéries ...etc) présent dans les eaux usées.

La principale voie d'élimination de la boue d'épuration est donc la mise en décharge. Cette solution est le procédé le moins écologique, elle présente plutôt des inconvénients que des avantages en termes environnementaux, et elle peut entraîner des modifications sur le sol, les eaux de surfaces, les eaux souterraines, et l'air.

III-1/ Impact sur le sol

Le fait d'apporter des boues dont la qualité chimique et organique est différente de celle du milieu récepteur va entraîner des modifications de ce milieu (Jocteur Monrozier, 2001).

La plupart des polluants présents dans les boues d'épuration sont adsorbés par les particules du sol.

Les modifications de la composition du sol vont essentiellement dépendre des propriétés du sol récepteur (sol de décharge), le substratum de la décharge, de situation géographique dans laquelle s'y trouve, et du climat du milieu.

Marrakech est caractérisée par un climat aride et par des terrains alluviaux au niveau de la décharge donc cela va favoriser l'activité des microorganismes et par conséquent la diffusion de ses pollution (métaux lourds) vers les sous sol se qui va provoquer la modification de leur propriétés.

III-2/ Impact sur les ressources en eaux

Les lixiviats ou jus de décharge sont le résultat de la percolation des eaux des pluies à travers les déchets qui se chargent bactériologiquement et chimiquement. Ces lixiviats constituent le principal contaminant de la nappe phréatique.

Les boues contiennent notamment des eaux et des éléments polluants. Ces éléments peuvent nuire à l'environnement, particulièrement les eaux souterraines et les eaux de surface, lorsqu'ils sont rejetés en grande quantité. Les eaux souterraines ou de surfaces sont contaminées par percolation dans le sol des jus de décharge. Ces derniers vont être très riches en éléments polluants contenues dans les boues d'épuration. Les lixiviats peuvent percoler dans les nappes phréatiques, lors d'une période fortement pluvieuse et suivant au l'écoulement des eaux, ils vont affecter les eaux de surface.

III-3/ Impact sur l'air

Le transport des quantités importantes des boues d'épuration et la mise en décharge présentent l'impact le plus important à cause de la dispersion des substances toxiques dans l'atmosphère et principalement l'émission gazeuse de sulfure et de l'azote qui peuvent être dangereuses pour la santé humaine et animale.

Les éléments en traces métalliques et les substances organiques volatiles ils peuvent être aussi responsable de dégagement gazeux toxiques à effet de serre ainsi qu'être la source de nuisances olfactives, issues des gaz produits par fermentation (CH₄), et visuelles.

IV/ Impact de la boue déshydratée

IV-1/ Quantité des boues déshydratées

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 l'actuelle décharge ce qui permet de limiter le désagrément lié à l'apport des boues déshydratées. Ce terrain arrive aujourd'hui à environ 100 % de saturation ce qui manifeste la création d'un nouveau terrain d'une superficie de 3Ha (en cour de construction).

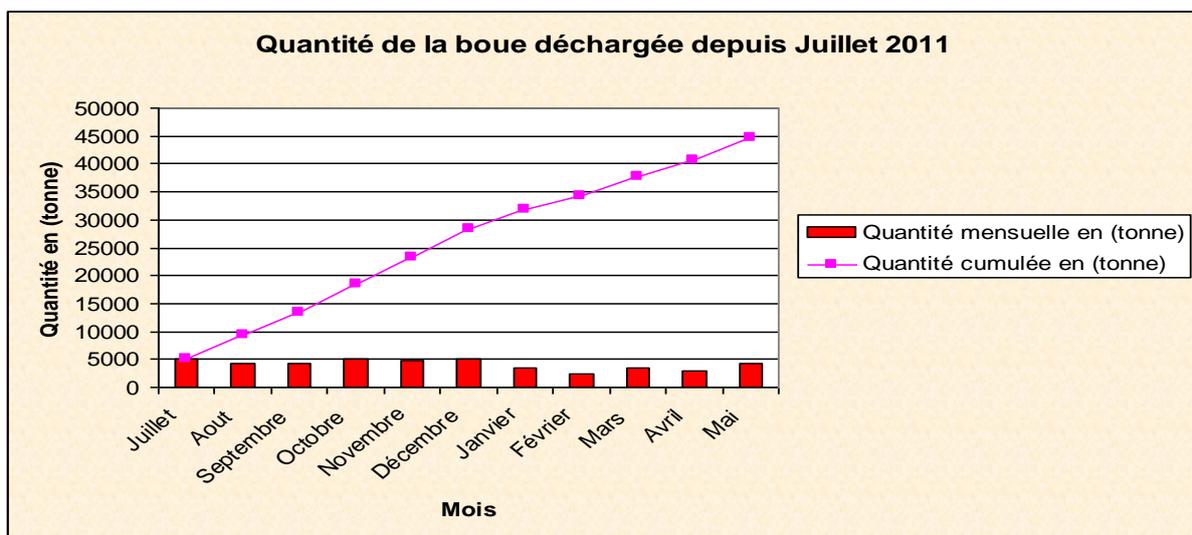


Fig.12 : Quantité de la boue déchargée depuis Juillet 2011.

La variation mensuelle de la quantité de la boue déchargée est irrégulière, elle varie entre 3000 et 5000 tonnes .Pendant onze mois la STEP est rejetée environ 450000 tonnes de boues déshydratées, cette quantité importante exprime l'augmentation de la superficie avec le temps et des valeurs élevés d'ETM, CTO et des agents pathogènes.

Remarque

L'ancien terrain a une superficie de 2,5Ha, il est utilisé pendant 4 ans et contient environ 995400 tonnes de la boue en cas de l'absence de perte (pas de lixiviat).

IV-2/ Analyse et interprétation des boues déshydratées

IV-2-1/ La siccité

a- Définition

Les boues sont constituées d'eau et de matières sèches. La siccité est le pourcentage massique de matière sèche. Ainsi une boue avec une siccité de 10 % présente une humidité de 90 %.

- boues liquide : siccité de 0 à 10%.
- boues pâteuses : siccité de 10 à 25%.
- boues solides : siccité de 25 à 85%.
- boues sèches : siccité supérieure à 85%.

b- Méthodologie

L'appareil utilisé pour la mesure de la siccité c'est le thermobalance (Photo 2), il consiste à réchauffer 10 mg de boue à 105°C pendant une demi-heure. La mesure obtenue s'exprime en pourcentage. Ce dernier peut se multiplier par 10 pour donner la quantité de matière sèche en mg.

c- Analyse et interprétation:

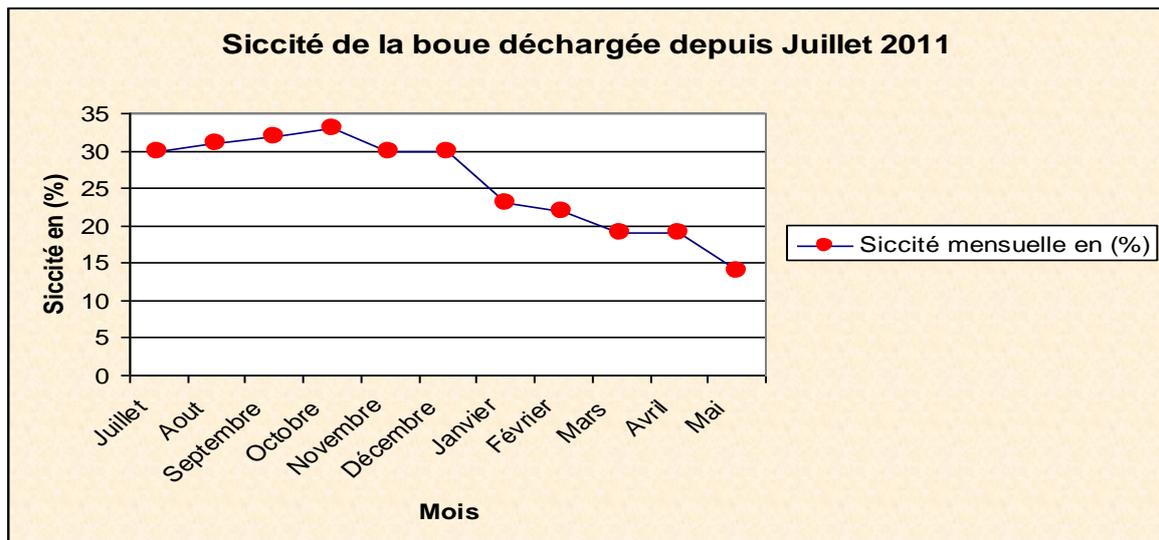


Fig.13 : La siccité de la boue déchargée depuis Juillet 2011.

De juillet 2011 à janvier 2012 la siccité moyenne est entre 25 et 35 % donc la boue est solide, car elle est issue seulement d'une décantation primaire qui favorise des boues

concentrées (boue primaire). Alors que depuis janvier 2012 la boue déshydratée est pâteuse, elle issue d'une boue mixte (boue primaire et secondaire). La siccité est entre 14 et 25% donc une humidité entre 75 et 87%. La présence d'une quantité importante de l'eau signifie que la boue contient une grande majorité des agents pathogènes qui sont donc jugés représentatifs du risque à estimer : les Entérovirus (virus), Salmonelles (bactéries) et œufs d'Helminthes viables (parasites).

La mise en décharge de cette boue (Photo 3) favorise une quantité importante de lixiviat qui est riche en des agents pathogènes et des autres éléments solubles dans l'eau.

IV-2-2/ L'ETM et CTO

a- Les normes des boues déshydratées

Les critères d'innocuité sont les ETM, CTO, microbes pathogène et inertes indésirables.

ETM	Valeur limite en mg/kg	Valeur limite en mg/kg		
		Cas général	Cas pâteuse	
Cadmium (Cd)	10			
Chrome (Cr)	1000			
Cuivre (Cu)	1000			
Mercure (Hg)	10			
Nickel (Ni)	200			
Plomb (Pb)	800			
Zinc (Zn)	3000			
Cr+Cu+Ni+Zn	4000			
		CTO		
		Fluoranthène	2	1,5
		Benzo(a)fluoranthène	0,8	0,8
		Benzo(b)fluoranthène	5	4
		Somme 7 PCB	2,5	2,5

Tab.18 : les normes d'ETM et CTO de la boue déshydratée.

Remarque :

- Ces substances proviennent essentiellement de déchets industriels.
- En règle général, les métaux lourds sont insolubles dans la zone de pH rencontrée dans la station d'épuration ($7,3 < \text{pH} < 7,9$) et ils se fixent par absorption / adsorption sur les matières en suspension.

b- Les analyses des boues de la STEP en 2010

Les tableaux suivants résument les résultats de deux échantillons d'analyses faites sur les boues déshydratées de la STEP en 2010.

- Eléments Traces Métalliques

	Echantillon du 25/02/2010		Echantillon du 15/03/2010		Valeurs limites
	Sur sec (mg/kg MS)	% valeur limite	Sur sec (mg/kg MS)	% valeur limite	
Cadmium (Cd)	2,05	21%	2,03	20%	10
Chrome (Cr)	372,47	37%	269,76	27%	1.000
Cuivre (Cu)	168,85	17%	186,76	19%	1.000
Mercure (Hg)	2,22	22%	1,69	19%	10
Nickel (Ni)	24,53	22%	24,7	12%	200
Plomb (Pb)	177,79	22%	175,89	22%	800
Zinc (Zn)	645,61	22%	723,32	24%	3.000
Cr+Cu+Ni+Zn	1.211,46	30%	1.204,54	30%	4.000

Tab.19 : Quantité d'ETM de l'échantillon 25/02/2010 et 15/03/2010.

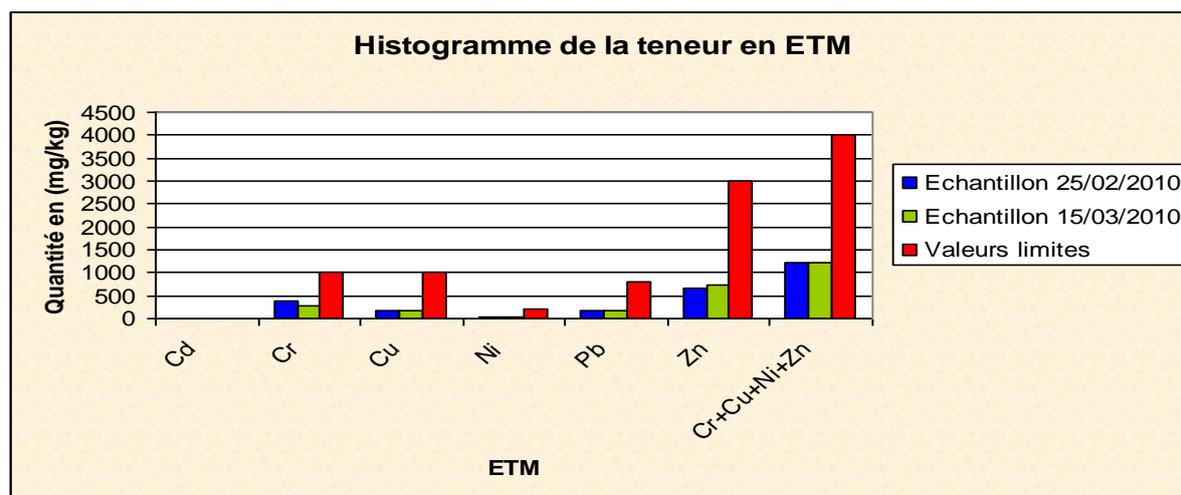


Fig.14 : Histogramme de la teneur en ETM de l'échantillon 25/02/2010 et 15/03/2010.

- Composés Traces Organiques en (mg/kg MS)

Composés Traces Organiques	Valeur en (mg/kg)		Valeur limite en mg/kg
	Echantillon du 25/02/2010	Echantillon du 15/03/2010	
Fluoranthène	0,2621	0,2957	2
Benzo(a)fluoranthène	0,1048	0,0739	0,8
Benzo(b)fluoranthène	0,0839	0,0739	5
Somme 7 PCB	0,1834	0,1848	2,5

Tab.20 : Quantité des CTO de l'échantillon 25/02/2010 et 15/03/2010.

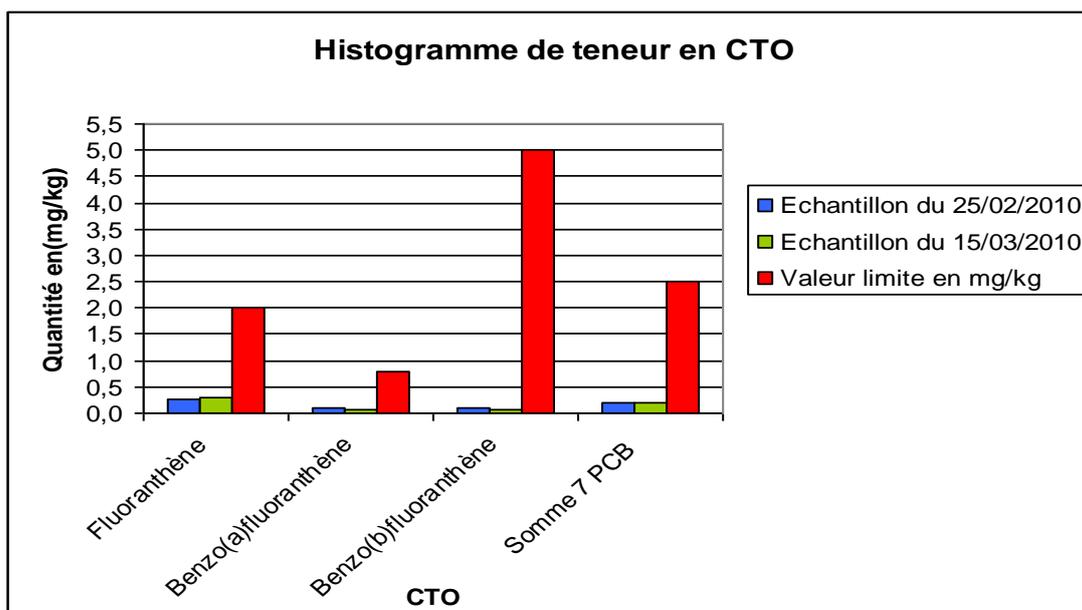


Fig.15 : Histogramme de la teneur en CTO de l'échantillon 25/02/2010 et 15/03/2010.

La qualité des boues déshydratées produite au début de fonctionnement de la station a permis d'établir des valeurs d'ETM et CTO faibles qui ne dépassent pas les normes et qui ne déconseillent pas leur élimination à la décharge. L'ETM ne subit que petite variation pendant un moi mais leur valeurs sont proche au limite. Les CTO sont des produits chimiques (hydrocarbures, détergents, restes de peinture et de solvant, produits de nettoyage ou de désinfection...) qui sont plus ou moins dégradés par l'activité microbologique du sol. Cependant, au même titre que les ETM, les CTO peuvent devenir toxiques pour les micro-organismes des sols à haute dose ; or ces derniers sont indispensables à la fertilité des sols.

c- Les analyses des boues de la STEP en 2012

Les analyses sont effectués le 14/02/2012 et le 14 /05/2012.

- **Eléments Traces Métalliques**

	Echantillon 14/02/21012		Echantillon 14/05/2012		
	Sur sec (mg/kg MS)	% valeur limite	Sur sec (mg/kg MS)	% valeur limite	Valeur limite
Cadmium (Cd)	1,1	11	1,14	11,4	10
Chrome (Cr)	1658	165,80	2613,89	261,38	1000
Cuivre (Cu)	176,5	17,65	165,17	16,51	1000
Nickel (Ni)	81	40,05	164	82	200
Plomb (Pb)	107	13,37	311,57	38,94	800
Zinc (Zn)	1255	41,85	854,09	28,46	3000
Cr+Cu+Ni+Zn	3278,6	81,96	3797,15	94,92	4000

Tab.21 : Quantité d'ETM de l'échantillon 14/02/2012 et 14/05/2012.

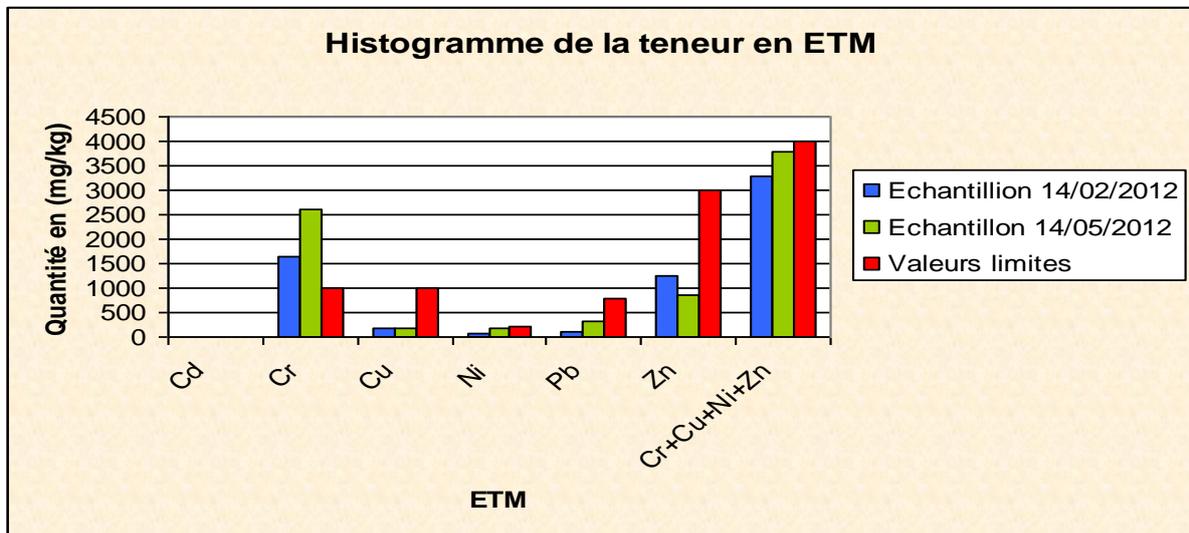


Fig.16 : Histogramme de la teneur en ETM de l'échantillon 14/02/2012 et 14/05/2012.

Les analyses de deux échantillons montrent que l'ensemble de l'ETM ne dépasse pas la norme mais il est proche à la valeur limite à cause de la teneur élevée de chrome, 1658mg /kg pour le premier échantillon et 2613,89mg/kg pour le deuxième échantillon.

D'après le tableau 22, Les teneurs en ETM des boues de la station d'épuration augmentent de 2010 à 2012 à cause de développement industriel. les teneurs en Nickel, Plomb, et Zinc rencontrées dans les boues des échantillons de 14/02/2012 et 14/05/2012 sont élevés par rapport aux échantillons de 2010 mais ils sont nettement inférieures aux valeurs limites imposées alors que l'ensemble de ses EMT est proche à la valeur limite à cause de la teneur élevée de chrome qui dépasse 1000mg/kg ce qui va poser un problème au niveau de la décharge. Ils

vont 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.

Comparaison des analyses des échantillons de 2010 et 2012 :

		Moyenne des deux échantillons 2010 en (mg/kg)	Moyenne des deux échantillons 2012 en (mg/kg)
ETM	Cadmium	2,04	1,12
	Chrome	321,115	2135,945
	Cuivre	177,805	170,835
	Mercure	1,955	—
	Nickel	24,615	122,5
	Plomb	176,84	209,285
	Zinc	684,465	1054,545
	Cr+Cu+Ni+Zn	1208	3537,875
CTO	Fluoranthène	0,278	—
	Benzo(a)fluoranthène	0,094	—
	Benzo(b)fluoranthène	0,078	—
	Somme 7 PCB	0,0184	—

Tab. 22 : Comparaison des ETM et CTO des échantillons de 2010 et 2012.

Les analyses des deux échantillons de 2012 montrent une augmentation de toutes les quantités des ETM avec des teneurs élevés en Chrome et Zinc. Le Chrome dépasse la norme par un écart de 1135,945 mg/kg, cette quantité importante due essentiellement au l'industrie de tannerie et peut provoquer des grands impacts environnementaux surtout en cas de Chrome hexavalent.

IV-3/ L'impact des ETM sur le sol et les ressources en eau

- ❖ Les sols acides et pauvres en humus (PH inférieur à 6), augmentent la mobilité des métaux lourds. Ces derniers ne s'accumulent pas et sont transférés vers les nappes phréatiques ou absorbés par les plantes et présentent alors un risque pour la santé.
- ❖ Les sols basiques riches en humus piègent les métaux lourds, il n'y a donc pas de risque immédiat pour la santé. Mais le sol est contaminé durablement et la concentration en métaux lourds augmente avec les années. Ces derniers sont

susceptibles d'être libérés quand l'environnement est modifié (acidification du sol sous l'effet des changements de température, d'humidité, etc.).

IV-3-1/ Le Chrome hexavalent (Cr (VI))

D'après les analyses (voir fig.18), la quantité en chromes dans les boues déshydratées dépasse les normes. Cette quantité élevée est issue de l'industrie métallurgique et chimique.

La ville de Marrakech est caractérisée par l'existence des tanneries ce qui provoque l'augmentation des quantités en chrome dans les effluents d'assainissement et par conséquent dans les boues déshydratées, cette quantité varie selon les périodes de production de Mars à Juillet (ces périodes occupent une position privilégiée dans l'économie de Marrakech).

L'apport de boue augmente théoriquement le stock du sol en Chrome, et par conséquent la contamination de la nappe phréatique et des eaux de surface.

Remarque:

Le chrome existe uniquement à l'état trivalent dans l'environnement. Dans le sol, le chrome (VI) est rapidement réduit en chrome (III) par son action oxydante sur la matière organique. Le chrome hexavalent ou trivalent est notamment utilisé en tannerie afin d'éviter toute dégradation bactérienne des peaux, le chrome peut oxyder partiellement des substances organiques ou jouer le rôle de désinfectants, il reste donc dans l'effluent à traiter une grande variété de substances organiques du chrome, vraisemblablement sous la forme de chrome VI ou de chrome III. Le chrome hexavalent (chrome VI) très toxique (risque de cancer) dû à ses caractéristiques d'oxydant puissant et à la perméabilité des membranes [Irwin 1997b, Cheung 2000, Bergeron 2001], une intoxication provoquant des problèmes digestifs et cardiaques [Bergeron 2001, Cheung 2000]. Le chrome(VI) provient d'émissions résidentielles et industrielles [Irwin 1997b, Bergeron 2001].

Les composés hexavalents sont de puissants agents oxydants qui réagissent avec la matière organique, étant alors réduits à leur forme moins néfaste.

IV-3-2/ L'impact du Chrome (VI) sur l'environnement

a- sur le sol et les ressources en eau

Les boues contenant du chrome 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 de sols cohérents

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

b- Sur les micro-organismes

La présence du métal chrome peut être tolérée par certains micro-organismes. Par contre, à de fortes concentrations le chrome (VI) a des effets toxiques et mutagènes. 10 à 12 mg de chrome (VI) par litre peuvent inhiber le développement de bactéries du sol alors que les mêmes concentrations en chrome (III) n'ont aucun effet sur ce développement. Le chrome a un effet sur les bactéries saprophytes et nitrifiantes, sur les champignons filamenteux, les algues et sur le phytoplancton.

c- sur les végétaux

Comme pour les micro-organismes, le chrome ne semble pas être essentiel à la vie des plantes. Sa toxicité vis à vis du règne végétal est rare dans les systèmes naturels. Certaines plantes poussent sur des sites hautement contaminés en chrome. Certains auteurs s'accordent à dire qu'il n'y a pas d'absorption du chrome par les végétaux mais seulement une absorption racinaire sans passage vers les autres parties de la plante. Cependant, une étude récente a montré que la jacinthe d'eau cultivée en milieu riche en chrome hexavalent était capable de se reproduire au niveau de ses racines. Le chrome (III) est alors stocké au niveau de celles-ci mais aussi dans d'autres parties de la plante comme les feuilles et le pétiole, sous forme libre ou complexée avec l'oxalate.

IV-3-3/ L'élimination du chrome

Il est important de connaître que les boues ne peuvent pas être valorisées si le chrome dépasse la valeur limite réglementaire. Dans un souci économique, l'extraction de chrome au niveau des réseaux de tannerie ou en amont de station sera moins coûteuse, ainsi l'extraction en phase liquide est plus facile que dans la boue.

Parmi les techniques proposées pour l'extraction de chrome :

a- Réduction du Cr (VI) en Cr (III)

C'est une réaction qui fait transformer Cr (VI) qui est très toxique et très soluble en Cr (III) qui est peu toxique et très peu soluble en faisant appel à un réactif de précipitation selon la réaction :



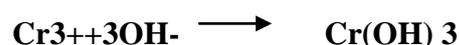
b- Précipitation chimique du chrome sous forme hydroxydes

❖ Définition :

La précipitation est une réaction chimique qui transforme une substance dissoute dans l'eau, forme un composé insoluble ou très peu soluble qui précipite jusqu'à sa limite de solubilité.

❖ Mécanisme de précipitation :

Ajout d'un réactif soluble qui en combinaison avec les ions indésirables préexistants dans l'eau, forme un composé insoluble ou très peu soluble qui précipite jusqu'à sa limite de solubilité. La précipitation se fait après l'élimination des MES par dégrillage ou décantation de bain résiduaire et par l'addition du carbonate de sodium (Na_2CO_3), Les métaux « dans ce cas le chrome » sont précipités généralement sous forme d'hydroxyde selon la réaction :



Après décantation, l'hydroxyde de chrome est déshydraté par filtration.

c- Traitement par électrocoagulation

Le traitement par électrocoagulation consiste en une dissolution électrochimique d'une anode métallique de fer ou d'alumine a pour obtenir un abattement de 100% du chrome après une demi-heure de traitement avec le fer et avec la plus forte densité de courant, mais ce traitement est moins utilisé grâce au coûts très élevés.

V/ Solutions

Les boues déshydratées peuvent être utilisées après l'extraction de chrome comme fertilisant organique et participer ainsi à la reconstitution de l'humus des sols. Elles peuvent être soit épandues directement, ou être au préalable chaulées, compostées ou séchées. Comme elle peuvent être éliminées par incinération pour une valorisation énergétique. Elles sont alors séchées thermiquement.

V-1/ Compostage de la boue déshydratée

V-1-1/ Définition

Le compostage est un procédé biologique de conversion et de valorisation des matières organiques (sous-produits de la biomasse, déchets organiques d'origine biologique...) en un produit stabilisé, hygiénique, riche en composés humiques, dans des conditions contrôlées en présence de l'oxygène de l'air. (Satin & Selmi).

La boue d'épuration est composée de l'eau et de matières organiques et minérales, donc elle peut être valorisée pour la production de compost. Le compostage de la boue c'est le mélange de la boue avec un agent gonflant (déchet verts, palettes ...) dans une zone aérée pour assurer une fermentation accélérée par la dégradation biologique. Le produit obtenu, le compost de qualité qui peut être utilisé en agriculture. Cette technique présente de nombreux avantages, parmi les quelles :

- L'augmentation naturelle de la teneur en matière sèche, d'où diminution des volumes de déchets ;
- Le traitement simultanément de boues et de déchets verts ;
- le produit de compostage présente une faible germe pathogène et d'adventice, et il est bien stabilisé donc ne génère pas d'odeurs ;

- la méthode acceptable par les citoyens.

V-1-2/ Technique de compostage

La technique de compostage est simple, elle est basée sur :

- La collecte des déchets verts, des palettes...
- Le mélange déchets-boues ;
- La fermentation ;
- La finition des composts : maturation, tamisage, stockage et contrôle avant la distribution.

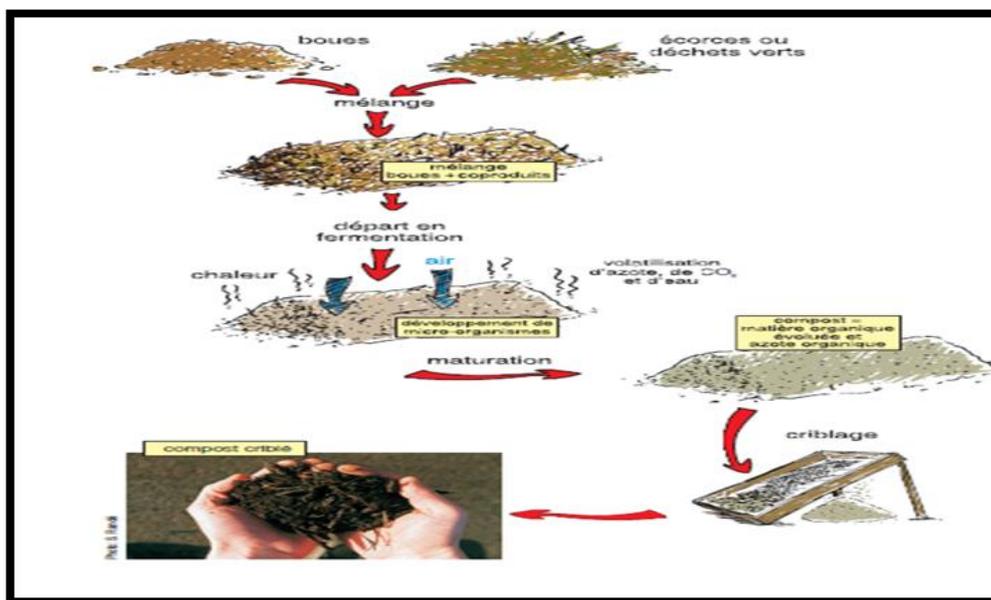


Fig.17 :Schéma explicatif de compostage de la boue déshydratée (Rapport Tabou(e) Story /Mission recyclage agricole. p.2 Groupe Freppel/Edac Colmar - Juin 2001).

En général le compostage entraîne une augmentation de la siccité de produit à traité sans aucune variation de la masse. En effet un tonne de boues à 20% de siccité permettra de produire un tonne de compost à 50% de siccité sachant qu'il faut généralement pour cela ajouter aux boues 2 fois leur volume en déchets vert. Ce résultat est un fait du à l'augmentation naturellement de la température pendant le compostage.

V-1-3/ Qualité de compost produit

Les boues d'épuration ont des propriétés agronomiques utiles dans le domaine de l'agriculture, elles sont riches en azote et phosphore. D'après les analyses de l'échantillon de boue 14/05/2012, la boue déshydratée contient environ 26365,05mg/kg de phosphore.

Le compost intervient principalement contribue à améliorer la fertilité des sols.il est aussi un fertilisant azoté, phosphaté et potassique.

Si par supposition, la boue déshydratée contient un kilogramme par tonne de chaque élément de valeur agronomique le compost de cette boue va caractérisé par :

	C/N	MO*	Ntk*	P2O5*	K2O*
Compost de boues	1,8	5	1,2	1,3	5

*en kg /tonne.

Tab.23 : caractéristiques agronomiques de compost de boue d'épuration.

Donc le compostage de la boue entraine une augmentation de sa fertilité et par conséquence l'enrichissement de sol par les micro-organismes et surtout par le phosphore et par le potassium.

L'utilisation de ce compost permet d'offrir aux végétaux des nutriments pendant au moins trois ans.et par conséquence il permet d'améliorer les caractéristiques physiques des sols et de lutter contre l'érosion.

V-2/ Incinération

V-2-1/ Définition

L'incinération est un traitement basé sur la combustion qui est utilisé pour brûler les boues d'épuration déshydratées, le traitement des fumées issues de cette incinération est souvent nécessaire.ces fumées sont alors dépoussiérées et neutralisées.

Il faut souligner qu'il s'agit d'une solution technique industrielle à durée de vie longue (estimée à environ 30 ans).

- ❖ L'incinérateur n'est pas seulement un four de combustion, c'est une installation industrielle complète, comprenant :
 - Le stockage des boues entrantes ;
 - L'alimentation du four ;
 - Le chauffage du four ;
 - La combustion des boues, avec apport d'oxygène ;
 - La récupération de chaleur sous forme de vapeur et d'électricité ;
 - Le traitement des résidus solides ;
 - Le contrôle et l'élimination des pollutions.
- ❖ Les types des fours existants :
 - Le four à grille ;
 - Le four tournant ;
 - Le four à lit fluidisé.

Remarque :

La plupart des métaux lourds ne peuvent être détruits par la combustion, et se retrouvent, par conséquent, dans les résidus. Pour réduire leur influence, la meilleure solution est de les éliminer en amont, avant l'incinération.

V-2-2/ La solution proposée par RADEEMA

Pour des raisons de coûts d'investissement et de souplesse d'exploitation, **la technologie des fours à lit fluidisé**, à ce jour, pris le dessus sur les autres techniques. C'est ce procédé que RADEEMA a retenu pour le traitement des boues déshydratées de la station d'épuration de Marrakech.

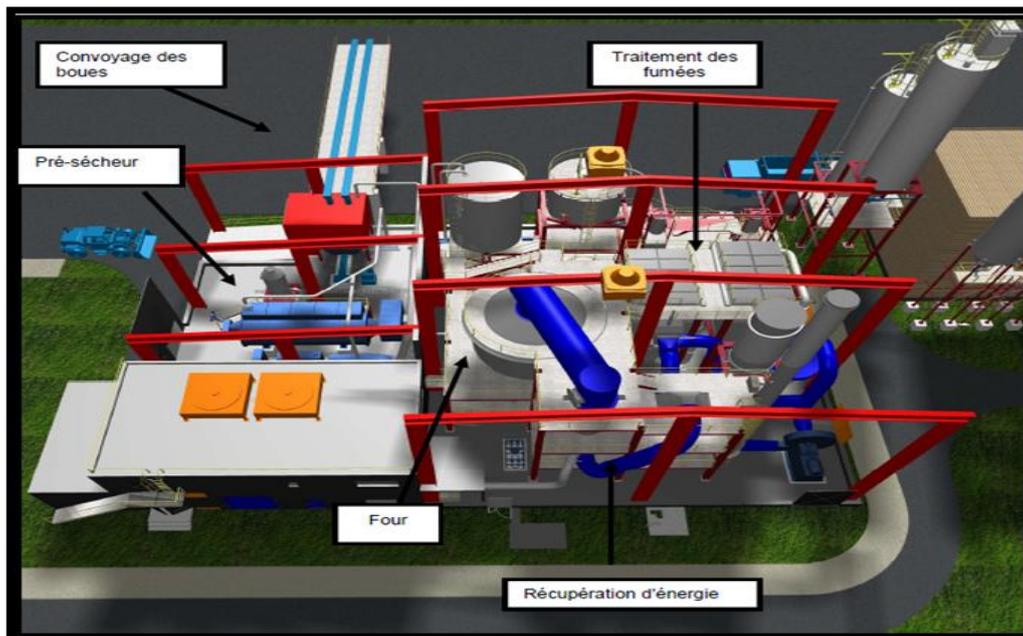


Fig.18 : Schéma d'Atelier d'incinération complet.

(Waterleau: Technical Description Sludge Drying and Thermal Oxidation Plant Marrakech, 2011).

a- Description

L'installation de l'incinération se compose des parties suivantes :

- Une unité de transfert des boues déshydratées,
- Un système de pré-séchage des boues,
- Un four à lit fluidisé ;
- Une récupération d'énergie,
- Une ligne de traitement des fumées de type sec ;
- Un ensemble de ventilateurs et suppresseurs;
- Un dispositif de reprise et d'évacuation des cendres.

b- Principe de fonctionnement

Les boues seront directement convoyées des unités de déshydratation de la STEP vers l'unité d'incinération. Cette dernière possède ensuite une trémie de réception. Les boues dépotées dans cette trémie sont stockées dans un silo.

❖ **Pré-séchage des boues :**

Le pré-séchage consiste à éliminer par évaporation l'eau restant dans la boue après déshydratation. La boue sera séchée de manière à atteindre des conditions d'auto-thermicité, c'est à dire qu'il ne sera pas nécessaire d'injecter du gaz pour assurer la combustion. Dans notre cas, la boue devra atteindre une siccité de l'ordre de 30%.

L'énergie nécessaire au pré-séchage sera récupérée des fumées dans le second échangeur de chaleur.

❖ **Procédé d'incinération à lit fluidisé :**

➤ **Incinération sur four à lit fluidisé à boîte à vent chaude :** (Photo 4)

Le four proposé comporte la particularité de disposer d'une boîte à vent entièrement réfractrice, et donc capable d'être alimentée en air très chaud ; ceci permet de **récupérer de manière optimale l'énergie thermique** des fumées, et ainsi d'atteindre des conditions d'auto-thermicité.

➤ **Principe de l'incinération sur four à lit fluidisé :**

La boue à incinérer est introduite dans le lit de sable d'un four à lit fluidisé chaude. Le mélange intensif et rapide entre le sable, la boue et l'air injecté à la base de la chambre de combustion conduit à une **incinération quasi immédiate et homogène** des résidus dans le lit. Le sable constitue un réservoir thermique qui limite les fluctuations de température.

❖ **La récupération d'énergie :** (Photo 5)

La récupération d'énergie se fait par deux échangeurs de température :

Un premier échangeur est associé au four à lit fluidisé. Cet échangeur de température est destiné à préchauffer l'air de fluidisation en prélevant une partie de la chaleur des fumées.

Un deuxième échangeur est nécessaire afin de fournir la chaleur nécessaire à l'étape de pré-séchage.

❖ **Traitement des fumées :**

Quelle que soit la technique de combustion utilisée, l'incinération des ordures ménagères génère des émissions polluantes : poussières (cendres volantes, cendres sous chaudière), gaz acides (HCl, SO_x, HF...), métaux lourds (plomb, chrome,...), dioxines et furanes (molécules organochlorées contenues dans les déchets ou formées lors de la combustion). Il est nécessaire de maîtriser ces émissions, à l'aide d'un système de traitement des fumées, pour éviter le transfert de pollution vers l'atmosphère.

Le traitement par voie sèche avec deux étapes de récupération des cendres qui est recommandé par l'étude de RADEEMA.

A partir de la sortie du second échangeur les équipements suivants :

- un cyclone permettant de capter les cendres volantes inertes ;
- un réacteur permettant d'assurer un temps de contact suffisant entre le bicarbonate, le charbon actif et les fumées pour le traitement des pollutions halogénées, soufrés, métaux lourds volatiles et dioxines / furannes.

Toute filière de gestion des boues présente des avantages et des inconvénients qui ne peuvent être efficacement évalués qu'au regard du contexte local. De nombreux éléments doivent être pris en compte pour choisir sa filière de gestion.

Incineration

Avantages

- Traitement adapté à toutes sortes de boues (primaire et secondaire, solide et liquide).
- Diminution du volume des déchets et leur masse, par l'élimination totale de l'eau interstitielle et la destruction des matières organiques par combustion à haute température (+ de 500°C).
- L'incinération permet de tirer la meilleure partie du contenu énergétique des déchets en produisant de la chaleur susceptible d'alimenter un réseau de chaleur urbain et/ou d'être transformée en électricité.

- Minimisation des consommations de ressources énergétiques et certains impacts environnementaux tels que l'effet de serre du fait notamment de la valorisation énergétique.
- L'incinération émet moins de gaz à effet de serre que le stockage, qui a inévitablement des fuites de méthane (puissant gaz à effet de serre) issu de la dégradation des déchets organiques.

Inconvénients

- L'incinération engendre des fumées et des matières minérales résiduelles nommées cendres ou se trouvent concentrés les métaux lourds (satin & selmi). Ces fumées contribuent à l'émission de polluants dans l'atmosphère, comme dioxine, furanne, dérivés de métaux lourds impossible de les neutraliser.
- L'incinération génère des déchets classés dangereux (résidus d'épuration des fumées) à éliminer dans des installations de stockage de déchets dangereux.
- L'incinération génère des mâchefers qui sont les résidus solides obtenus après combustion.
- Selon les techniques choisies (neutralisation des gaz acides des fumées par voie sèche ou humide, recyclage interne total ou non des rejets liquides), l'incinération contribue dans certains cas à l'émission de polluants liquides dans le milieu naturel.

Compostage

Avantages

- Cette valorisation permet une maîtrise des risques sanitaires, des nuisances olfactives des boues au niveau de la décharge.
- Le compost est riche en matière organique, donc sa valorisation agronomique va présenter beaucoup d'avantage pour le sol et la végétation.
- Les boues admises pour le compostage doivent en général présenter une siccité préalable de 20 à 25 %. Les composts obtenus sont d'excellents amendements organiques hygiénistes et stables.
- La pratique de l'épandage (ou compostage) est simple, nécessite peu d'investissement et offre des coûts d'exploitation très faible.

Inconvénients

- Impact sur le coût du transport et de l'épandage.
- Emission de N₂O à court terme.
- Emission de CH₄.
- Une tonne de boues donne l'équivalent d'une tonne de CO₂.

Conclusions

Dans ce travail Deux volets ont été traités et mis en évidence :

* La première partie a concerné une caractérisation des étapes de traitement des eaux usées et la détermination de la qualité physico-chimique de leur rejet.

Les analyses effectuées ont montré la présence de plusieurs éléments indésirables dans ces eaux. Ils sont issus essentiellement des rejets industriels et se concentrent dans la boue primaire et secondaire. Ces boues subissent une digestion et une déshydratation. Ce traitement ne réalise pas des très bons résultats au cours de l'absence des autres techniques de gestion de la boue.

La faible siccité et la grande quantité de Chrome (Cr) dans la boue présentent un risque environnemental en cas de leur mise en décharge surtout que cette dernière n'est pas contrôlée.

* La deuxième partie de ce travail est consacrée à l'étude du site de décharge, la qualité de la boue déchargée, sa gestion et son impact sur l'Environnement.

Le projet de réalisation d'une installation d'incinération est à l'étude, visant à diminuer la grande quantité de boue rejetée de la STEP de Marrakech et qui, outre de la préservation de sol et des ressources en eau d'éléments traces métalliques ; Ce projet nécessite une unité de traitement de résidus et de fumées pour protéger l'atmosphère de l'effet de serre.

La proposition de gestion des boues issues de l'épuration des eaux usées nécessite d'abord une élimination des éléments traces métalliques essentiellement le chrome (Cr) puis leur valorisation agricole et énergétique permet d'améliorer la qualité physico-chimique et bactériologique des rejets pour afin diminuer leur impact sur l'Environnement.

Liste des figures

Fig.1 : Carte de situation géographique et géologique de la nappe du Haouz.....	11
Fig. 2: Carte piézométrique de la nappe de Haouz de 1986.....	13
Fig.3 : Carte montre le réseau d’assainissement du Marrakech.....	16
Fig. 4: Le réseau de réutilisation des eaux usées traité de Marrakech.....	17
Fig.5: Schéma de traitement primaire des eaux usées.....	20
Fig.6 : Schéma de traitement secondaire.....	23
Fig.7 : Schéma de fonctionnement du digesteur.....	32
Fig. 8 : Schéma de traitement des eaux usées, des boues, et de biogaz.....	35
Fig.9 : Carte de situation de l’extension de la décharge et de la STEP.....	37
Fig.10 : Géologie du secteur de la décharge publique de Marrakech.....	38
Fig.11 : Piézométrie de la région de la décharge publique de Marrakech réalisée à partir des données recueillies en juin 1999.....	39
Fig.12 : Quantité de la boue déchargée depuis Juillet 2011.....	42
Fig.13 : La siccité de la boue déchargée depuis Juillet 2011.....	43
Fig.14 : Histogramme de la teneur en ETM de l’échantillon 25/02/2010 et 15/03/2010.....	45
Fig.15 : Histogramme de la teneur en CTO de l’échantillon 25/02/2010 et 15/03/2010.....	46
Fig.16 : Histogramme de la teneur en ETM de l’échantillon 14/02/2012 et 14/05/2012.....	47
Fig.17 :Schéma explicatif de compostage de la boue déshydratée.....	53
Fig.18 : Schéma d’Atelier d’incinération complet.....	56

Liste des tableaux

Tab.1 : Evolution démographique de la ville de Marrakech de 1971 à2010.....	13
Tab. 2 : Evolution de la production des eaux usées.....	15
Tab.3 : La croissance de réseau d’assainissement de Marrakech au cours des années.....	15
Tab.4 : Charge Hydraulique des eaux usées entrantes.....	18
Tab.5 : Charge polluante nominale en temps sec.....	18
Tab.6 : La concentration de charge polluante entrante à la STEP.....	19
Tab.7 : La charge polluante après le traitement primaire.....	21
Tab.8 : La concentration de la charge polluante en sortie primaire.....	21
Tab.9: La charge polluante à la sortie de clarificateur.....	23
Tab.10: La concentration de charge polluante en sortie secondaire.....	23
Tab.11 : La concentration de charge polluante en sortie tertiaire.....	26
Tab.12 : Performances pour l’effluent du traitement tertiaire.....	26
Tab.13 : la composition de la boue primaire et secondaire.....	28
Tab.14 : La quantité MeS, MeSV et le volume de boue avant et après l’épaississement.....	29
Tab.15 : Les paramètres de digestion anaérobie.....	31
Tab.16: Récapitulatif des boues digérées.....	32
Tab.17 : Récapitulatif des boues déshydratées.....	34
Tab.18 : les normes d’ETM et CTO de la boue déshydratée.....	44
Tab.19 : Quantité d’ETM de l’échantillon 25/02/2010 et 15/03/2010.....	45
Tab.20 : Quantité des CTO de l’échantillon 25/02/2010 et 15/03/2010.....	45
Tab.21 : Quantité d’ETM de l’échantillon 14/02/2012 et 14/05/2012.....	47
Tab. 22 : Comparaison des ETM et CTO des échantillons de 2010 et 2012.....	48
Tab.23 : caractéristiques agronomiques de compost de boue d’épuration.....	54

Annexes



Photo 1 : Filtre à bande



Photo 2 : Thermobalance



Photo 3 : Boue déchargée



Photo 4 : four à lit fluidisé.



Photo 5 : Récupérateur d'énergie.



LABORATOIRE MAROCAIN D'AGRICULTURE

SARL AU CAPITAL DE 1.000.000 DHS - RUE Fatima Beat N'BAEK N°1 Km 10.500 Route 111 Ain
Tel: 022 34 49-61 / 022-35-76-32 / Fax: 022 35-83-64 / E-Mail: labomag@maroc.ma

RAPPORT D'ANALYSE

N°123253

- - Région : MARRAKECH
- - Nom du client : WATERLEAU
- - Date de prélèvement : 02/02/2012
- - Date de réception : 03/02/2012
- - Date de fin d'analyse : 09/02/2012
- - Date d'édition : 10/02/2012
- - Nature de l'échantillon : Boues
- - Référence de l'échantillon : Primaires

MS = 48,0 g/c
MSU = 33,3 g/c

Analyse	Résultat	Unité
PLOMB (Pb)	1.71	mg/l boue
MERCURE (Hg)	0.05	mg/l boue
CADMIUM (Cd)	0.02	mg/l boue
NICKEL (Ni)	1.62	mg/l boue
CHROME (Cr)	11.94	mg/l boue
CUIVRE (Cu)	2.51	mg/l boue
ZINC (Zn)	45.67	mg/l boue

Coordinateur

Directeur de Laboratoire

La reproduction de ce rapport n'est autorisée que sous sa forme intégrale (page 1/1)



LABORATOIRE MAROCAIN D'AGRICULTURE

SARL AU CAPITAL DE 1.000.000 DHS - RUE Fatima Beat N'BAEK N°1 Km 10.500 Route 111 Ain
Tel: 022 34 49-61 / 022-35-76-32 / Fax: 022 35-83-64 / E-Mail: labomag@maroc.ma

RAPPORT D'ANALYSE

N°123251

- - Région : MARRAKECH
- - Nom du client : WATERLEAU
- - Date de prélèvement : 02/02/2012
- - Date de réception : 03/02/2012
- - Date de fin d'analyse : 09/02/2012
- - Date d'édition : 10/02/2012
- - Nature de l'échantillon : Boues
- - Référence de l'échantillon : Secondaires

MS = 41,3 g/c
MSU = 32,1 g/c

Analyse	Résultat	Unité
PLOMB (Pb)	3.10	mg/l boue
MERCURE (Hg)	0.12	mg/l boue
CADMIUM (Cd)	0.03	mg/l boue
NICKEL (Ni)	2.00	mg/l boue
CHROME (Cr)	5.68	mg/l boue
CUIVRE (Cu)	3.08	mg/l boue
ZINC (Zn)	66.75	Mg/l boue

Coordinateur

Directeur de Laboratoire

La reproduction de ce rapport n'est autorisée que sous sa forme intégrale (page 1/1)

**BODEMKUNDIGE DIENST VAN BELGIE** v.z.w.W.de Croijlan 48
B-3001 Heverlee
Tel.: 016 31 09 22 - Fax: 016 22 42 06
E-mail: info@bdb.beLeliestraat 63
B-8800 Roselare
Tel.: 051 20 54 00 - Fax: 051 20 54 20
E-mail: info@bdb.beBankrekening: 736-4030300-14
P.R.: 000-0499123-58
B.T.W.: BE 0420.415.024Staalnemer :
-Klant :65711
Waterleau
De Heer Bart Verrecht
Radioweg 18
3020 Herent**Beproeversverslag slijb**

Onderzoeksnummer: Y6388

Staalnummer : 1ième phase
Naam staal : Boue deshydratéeDatum staalname : -
Datum aankomst : 14.02.2012
Datum verslag : 09.03.2012**Landbouwkundige parameters**

Parameter	Resultaat labo	Eenheid	Startdatum analyse	Meth.BDB
Droge stof	27,5	%	27.02.2012	207
Chroom	1514	mg/kg DS	27.02.2012	-
Koper	291	mg/kg DS	27.02.2012	-
Lood	143	mg/kg DS	27.02.2012	-
Zink	891	mg/kg DS	27.02.2012	-

Onderzoek wordt verricht en adviezen worden verstrekt op voorwaarde dat de aanvrager afstand doet van ieder recht op aansprakelijkheidstelling.

Technisch verantwoordelijke laboratorium

Dr. ir. H. Vandendriessche

De analyseresultaten hebben uitsluitend betrekking op de geanalyseerde objecten. Het verslag mag niet worden gereproduceerd, behalve in volledige vorm, zonder de schriftelijke toestemming van de Bodemkundige Dienst van België vzw.

**BODEMKUNDIGE DIENST VAN BELGIE** v.z.w.W.de Croijlan 48
B-3001 Heverlee
Tel.: 016 31 09 22 - Fax: 016 22 42 06
E-mail: info@bdb.beLeliestraat 63
B-8800 Roselare
Tel.: 051 20 54 00 - Fax: 051 20 54 20
E-mail: info@bdb.beBankrekening: 736-4030300-14
P.R.: 000-0499123-58
B.T.W.: BE 0420.415.024Staalnemer :
-Klant :65711
Waterleau
De Heer Bart Verrecht
Radioweg 18
3020 Herent**Beproeversverslag slijb**

Onderzoeksnummer: Y6389

Staalnummer : 2ième phase
Naam staal : Boue deshydratéeDatum staalname : -
Datum aankomst : 14.02.2012
Datum verslag : 09.03.2012**Landbouwkundige parameters**

Parameter	Resultaat labo	Eenheid	Startdatum analyse	Meth.BDB
Droge stof	16,3	%	27.02.2012	207
Chroom	1802	mg/kg DS	27.02.2012	-
Koper	152	mg/kg DS	27.02.2012	-
Lood	71,1	mg/kg DS	27.02.2012	-
Zink	1620	mg/kg DS	27.02.2012	-

Onderzoek wordt verricht en adviezen worden verstrekt op voorwaarde dat de aanvrager afstand doet van ieder recht op aansprakelijkheidstelling.

Technisch verantwoordelijke laboratorium

Dr. ir. H. Vandendriessche

De analyseresultaten hebben uitsluitend betrekking op de geanalyseerde objecten. Het verslag mag niet worden gereproduceerd, behalve in volledige vorm, zonder de schriftelijke toestemming van de Bodemkundige Dienst van België vzw.

 CNRST Division UATRS	Bulletin d'analyse	EN 048-v02 Page 1/1
		Angle Allal Fassi / FAR, B.P. 8027, Hay Sidi, 10000 Rabat, MAROC Tél: +212 (0) 37 71 29 83 / 31 75 - Fax: +212 (0) 37 71 32 06 uatrs@cnrst.ma - www.cnrst.ma/uatrs/

Rabat, le 15/05/2012

Nom du Laboratoire : ICP.AES

Description* :

Organisme : FS Casa

Demandeur : Pr Aguelmous

reference	Cd	Cr	Cu	P	Pb	Zn	Unite
ECH1	1.14	2613.89	165.17	26365.05	311.57	854.09	mg/kg

Résultats : CD-ROM Imprimés (nombre de pages :,,) Email

N° Dossier	Nbre d'échantillon	Réf. Echantillon**
D258uatrs12	1	ICP1

Signature du chargé de laboratoire :

Signature du chargé de plateforme :

* s'assurer que toutes les annexes comportent la mention CNRST-UATRS et la date.

** références UATRS, un tableau de correspondance est annexé au présent bulletin

Références bibliographiques

- Karima Belloute (2011) : les déchets solides et leur impact sur l'environnement de la ville de Marrakech (Maroc), PFE, FST- Marrakech, 57 pages.
- MANUEL PROCESSUS ET OPERATION, RADEEMA, (Rapport interne) (2010)
- Rapport sur l'influent et sa toxicité à l'entrée de la station, et leur impact au niveau du traitement biologique, RADEEMA, (Rapport interne) (2010)
- Soued Tiglyene (2008) : Contribution à l'étude de traitement du rejet liquide du tannage au chrome, Thèse, Université CADI AYYAD Faculté des Sciences SEMLALIA Marrakech, 109 pages.
- <http://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thanisation>
- http://engees-proxy.u-strasbg.fr/501/01/EN_NAWAOUI.pdf
- <http://www.radeema.ma/>.
- Technical Description Thermal Sludge Drying and Thermal Oxidation Plant Marrakech, 2011. (Rapport interne)
- ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/lwdp2_f.pdf
- <http://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thanisation>
- http://engees-proxy.u-strasbg.fr/501/01/EN_NAWAOUI.pdf
- <http://www.radeema.ma/>
- <http://www.pnud.org.ma/agenda21/agenda/Agenda21/Marrakech/ProfilMarrakech.pdf>