



Université Cadi Ayyad
Faculté des Sciences et Techniques
Marrakech



RADEEMA

Régie autonome de distribution
d'électricité, d'eau potable et
d'assainissement liquide de la ville de
Marrakech



MEMOIRE DE STAGE DE FIN D'ETUDES

Licence Sciences et Technique en Eau et Environnement

Assainissement liquide de Marrakech

**Valorisation agricole et énergétique des boues issues de l'épuration
des eaux usées de la ville de Marrakech**

Par

M.^{lle} AIT AYANE KARIMA

M.^{lle} SOUFIYA DOUNIA

Encadrées par :

Mr. BENKADOUR

Mr. DAUDI

Soutenu le 02 Juillet 2009 devant le jury:

 **Mr : BENKADOUR**
 **M.^{lle} : ELKHAMLI**
 **Mr : BOUMAGGAR**

Juillet

2009

TABLE DES MATIERES.

REMERCIEMENTS	4
DEDICACES	5
INTRODUCTION	6

PREMIERE PARTIE : ASSAINISSEMENT ET DESCRIPTION DE LA STATION D'EPURATION

I. GENERALITES SUR L'ASSAINISSEMENT	9
I.1. Historique de l'assainissement.....	9
I.2. Rôles de l'assainissement.....	9
I.2.1. Préservation de la ressource.....	10
I.2.2. Préservation du patrimoine.....	10
I.3. Les catégories des eaux usées.....	10
I.3.1. Les eaux pluviales.....	10
I.3.2. Les eaux domestiques.....	11
I.3.3. Les eaux industrielles.....	11
II. L'ASSAINISSEMENT LIQUIDE DE LA VILLE DE MARRAKECH	
II.1. Cadre général de la ville de Marrakech et de la station d'épuration.....	12
II.1.1. Situation géographique.....	12
II.1.2. Caractéristiques physique et climatologiques de la ville	12
II.1.3. Objectif de la fondation d'une station d'épuration.....	13
II.1.4. Situation géographique de la station d'épuration.....	13
II.2. Filières de traitement.....	14
II.2.1. Traitement des eaux.....	14
II.2.2. Traitement et Caractérisation des boues résiduaires.....	15
II.2.2.1. Définition et origine des boues.....	16
II.2.2.2. Types des boues	16
II.2.2.3. Caractères physiques et chimiques	17
II.3. Etapes de traitement des boues résiduaires.....	18
II.3.1. Epaissement.....	18

II.3.1.1. Epaissement gravitaire.....	18
II.3.1.2. Epaissement dynamique.....	18
II.3.1.3. Epaissement des boues primaires et biologiques.....	19
II.3.2. Extraction et homogénéisation des boues épaissies.....	21
II.3.3. Stabilisation	21
II.3.4. Digestion.....	22
II.3.4.1. Digesteurs.....	23
II.3.4.2. Stockage du biogaz.....	24
II.3.4.3. Brassage.....	25
II.3.4.4. Chauffage des boues.....	25
II.3.4.5. Chaudière.....	25
II.3.4.6. Torchère.....	25
II.3.5. Stockage des boues résiduaires.....	26
II.3.6. Déshydratation.....	26
II.3.7. Reprise, Chaulage, et stockage des boues déshydratées et chaulées.....	26
II.3.8. Unité de cogénération du biogaz.....	27
II.3.9. Bilan global de la chaîne de digestion	28

DEUXIEME PARTIE : FILIERES DE VALORISATION DES BOUES

I. SITUATION ACTUELLE : LA MISE EN DECHARGE.....	32
II. LE SECHAGE.....	33
II.1. Séchage naturel.....	34
II.2. Séchage thermique.....	34
II.2.1. Sécheurs à tambour rotatif.....	34
II.2.2. Sécheurs à bande.....	35
II.3. Intérêts du séchage	35
III -VALORISATION ENERGETIQUE	36
III.1. Utilisation du biogaz.....	37
III.2. Modes de valorisation non matures.....	37

IV. L'INCINERATION.....	37
IV-1-L'incinération spécifique.....	38
IV.1.1. Fours d'incinération.....	39
IV.1.1.1. Fours à lits fluidisés	39
IV.1.1.2. Fours tournants	39
IV.1.2. Conclusion.....	39
IV.2. Coincinération avec les ordures.....	40
V- VALORISATION AGRONOMIQUE	40
V.1.Épandage	40
V.2.Compostage.....	42
V.3.Potentialité des terrains agricoles à Marrakech.....	43
V.3.1. Projet SMAP	43
V.3.1.1. Objectif du Projet SMAP	43
V.3.1.2. Résultats escomptes du projet SMAP	46
V.3.2. La répartition des terrains agricole selon l'ORMVAH.....	47
 TROISIEME PARTIE : ANALYSES DES ECHANTILLONS DE BOUES ET COMPARAISONS ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE ENTRE LES TROIS FILIERES 	
I. RESULTATS D'ANALYSES	48
I.1. Principe des analyses	48
I.2. Résultats des analyses agronomiques et interprétation.....	49
I.3. Résultats des analyses énergétiques et interprétation.....	53
II. ETUDE ECONOMIQUE DE LA FAISABILITE DES TROIS DESTINATIONS.....	53
II.1. Dépenses et Exploitation.....	54
II.1.1. Incinération et séchage.....	54
II.1.2. Valorisation agronomique.....	55
II.2. Conclusion générale.....	56
BIBLIOGRAPHIE.....	57
ANNEXE.....	59

REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pu être à bien sans l'aide et les encouragements qui nous ont prodigués de nombreuses personnes auxquelles nous voudrions exprimer nos sincères remerciements.

Nous remercions Dieu de nous avoir donné la volonté et le courage d'achever ce travail.

Nous exprimons tout d'abord nos gratitude à **Mr. DAOUDI Adil** chef de la division des grands projets RADEEMA d'avoir accepté de diriger ce travail, nous le remercions pour tous les conseils judicieux, pour le temps qui nous a consacré au cours de l'élaboration de ce travail et pour sa disponibilité totale ainsi que pour sa gentillesse.

Nous remercions **Mr. BENKADDOUR** Abdelfattah notre encadrant et enseignant au sein de la faculté des sciences et techniques Marrakech d'avoir accepté de diriger ce travail, nous le remercions infiniment pour sa gentillesse, sa directive, et ses conseils précieux.

Nous tenons aussi à exprimer nos gratitude à **Mr. EL KABBAJ**, ingénieur assainissement au sein de la direction régionale d'équipements de Marrakech (service Eau), pour son aide et l'intérêt qu'il porte à la recherche scientifique.

Nos vifs remerciements à **Mr. BOUSSETA** du centre de recherche Reminex, à **Mme. FAHIM** chef qualité au sein de l'office national d'eau potable Marrakech, à **Mr. MORENO** ingénieur pédologique de l'ORMVAH, à **Mme. EL HADRAOUI Samira** de la DPA, à **Mr. SIKAOUI** de l'INRA Marrakech, et **Mr. SGHIR** de l'office régional d'El' Haouz.

Par la même occasion nous tenons à remercier **Mr. ELKNIDIRI**, **Mr. DAOUDI Lehcen** et **Mr. HAFID**, professeurs à la faculté des sciences et techniques département Géologie, ainsi que **Mr. SAÂDOUNI**, **Mr. HAKKOU Rachid** et **Mr. GHOUTA**, professeurs à la FST département de Chimie.

Nous adressons ma reconnaissance à **Mme. OUAZANI** d'avoir accepté de nous accueillir parmi les étudiants chercheurs au Laboratoire FSSM.

Je profite de cette occasion pour présenter nos profonds remerciements **Mr. BOUDERBA Yassine**, et tous les ingénieurs et techniciens de la RADEEMA départements de planification.

Nos remerciements s'adressent également à nos parents pour leur patiente et leur soutien matériel et moral.

Nous aurons garde d'oublier les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire et nous saluons leur gentillesse.

DEDICACES

Nous dédions ce modeste travail :

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

A nos Frères et Sœurs

A tous les membres de nos familles

A nos merveilleux (ses) amis (es)

Et à tous les personnes qui nous aiment

Merci

INTRODUCTION

Les stations d'épuration ont pour rôle d'éliminer la pollution contenue dans les effluents domestiques avant leur rejet dans le milieu naturel. Si l'eau, en fin de traitement, est effectivement épurée, la pollution initiale se retrouve en partie stockée et concentrée dans les boues issues des diverses étapes de traitement de l'eau. Ces boues sont donc considérées comme un déchet, qu'il faut éliminer tout en respectant certaines contraintes. La gestion, la valorisation et l'élimination de ces boues constituent en général, une sérieuse problématique pour le gestionnaire du secteur de l'assainissement liquide et des stations d'épuration. Ces opérations sont complexes et coûteuses pour la collectivité.

Dans la station d'épuration des eaux usées de Marrakech, les boues subissent désormais une digestion anaérobie ce qui permet à la fois de les stabiliser et d'en récupérer du biogaz utilisé pour produire de l'électricité et de la chaleur nécessaires pour faire marcher les installations de la station d'épuration. Néanmoins, la quantité des boues produite reste considérable même après digestion et déshydratation, 80 tonnes par jour en première phase, voir 180 tonnes en deuxième, constituent une quantité énorme pour la mise en décharge, se traduit par un coût non négligeable et en même temps un potentiel de valorisation intéressant.

D'un point de vue technique, trois destinations finales sont actuellement envisageables, à savoir **la valorisation agricole** (épandage, compostage), **l'incinération**, et le séchage en vue d'une seconde **valorisation énergétique**. Il sera donc judicieux d'étudier la faisabilité de ces trois possibilités et leurs intégrations dans la filière de traitement des eaux usées dont les travaux de la deuxième tranche sont en cours de réalisation.

Par ailleurs, ces boues, fortement chargées en matières organiques, possèdent un potentiel énergétique avéré, qu'il semble intéressant d'exploiter. Une solution technique est déjà mise en œuvre sur la station et permet partiellement de répondre à cette problématique énergétique et environnementale. Il s'agit de la « digestion anaérobie » ou « méthanisation » des boues (LALOE, 2003).

En effet, ce procédé réduit le volume initial des boues, produit du biogaz (gaz principalement composé de méthane) source d'énergie propre et valorisable et stabilise les boues et les rend moins odorantes. Mais vu que les quantités des boues produites par la station restent considérables, une seconde valorisation s'avère très utile voir indispensable.

L'objectif alors serait d'examiner les différentes possibilités de valorisation des boues déshydratées de la station d'épuration de Marrakech, en particulier les trois voies

précitées et de les comparer de point de vue technique, environnemental et financier. Ce qui permettra de répondre aux questions du gestionnaire du secteur d'assainissement liquide de Marrakech :

1/ Quelle est la (les) solution(s) la (les) plus appropriée(s) pour la valorisation de mes boues d'épuration ?

2/ A partir de quel prix de mise en décharge l'une ou l'autre des valorisations devient-elle intéressante ?

Ce rapport présente en sa première partie des généralités sur l'assainissement liquide et présente le contexte du cas étudié de Marrakech (Assainissement et épuration).

Dans sa deuxième partie, le rapport illustrera les technologies de traitement de valorisation des boues résiduaires.

La troisième partie de ce rapport sera consacrée aux analyses et résultats réalisées sur des échantillons de boues provenant de la STEP de Marrakech. Afin d'étudier la faisabilité des trois voies précitées, des analyses ont été effectuées dans différents laboratoires (FST, Office Régional de la Mise en Valeur Agricole El' Haouz (ORMVAH), Centre de Recherches REMINEX).

PREMIERE PARTIE :
ASSAINISSEMENT LIQUIDE ET DESCRIPTION DE LA STATION D'EPURATION

I. Généralités sur l'assainissement

I.1. Historique de l'assainissement

Les grandes civilisations de l'Antiquité connaissaient déjà des systèmes d'évacuation très perfectionnés. On citera le modèle **Romain de la Cloaca Maxima**, qui déverse dans le Tibre les eaux usées de ROME. L'idée qui prévaut jusqu'au XIX^e siècle est d'éloigner les effluents des cités pour éviter les inondations et les épidémies. (EL ARABI B. 2008)

En 1843 à Hambourg (**Allemagne**), le premier réseau d'assainissement moderne a été créé à l'occasion de la reconstruction de la ville à la suite d'un incendie.

Quant au traitement des eaux usées lui-même. En 1940, la première station d'Achères en région parisienne, utilisant les techniques des boues activées et du lit bactérien inaugure l'ère de la station d'épuration et des traitements plus rigoureux. Il faut attendre les années 1960, pour que le programme d'installation des stations d'épuration prenne son essor. Entre temps, les eaux superficielles se sont fortement dégradées (SATIN et SELMI, 1999).

Il ne faut pas confondre le traitement des eaux qui a pour fonction de les transformer en eau potable et l'assainissement des eaux usées rejetées par le consommateur après utilisation. L'assainissement des eaux usées a pour objectif de collecter puis d'épurer les eaux usées avant de les rejeter dans le milieu naturel, afin de les débarrasser de la pollution dont elles sont chargées (SATIN et SELMI, 1999).

I.2. Rôles de l'assainissement

L'assainissement des eaux usées est devenu un impératif pour nos sociétés modernes. En effet, le développement des activités humaines s'accompagne inévitablement d'une production croissante de rejets polluants. Les ressources en eau ne sont pas inépuisables. Leur dégradation, sous l'effet des rejets d'eaux polluées, peut non seulement détériorer gravement l'environnement, mais aussi entraîner des risques de pénurie. Donc il faut bien être conscient de cet enjeu, puisque 95 % des français jugent le nettoyage des eaux usées indispensable pour protéger la nature. Le Maroc ne dispose pas de ressources en eau suffisantes pour satisfaire les besoins en quantité à cause des sécheresses récurrentes. Aussi, la détérioration de leur qualité réside le risque. Trop polluées, nos réserves d'eau pourraient ne plus être utilisables pour produire de l'eau potable, sinon à des coûts très élevés, du fait de la

sophistication et de la complexité des techniques à mettre en œuvre pour en restaurer la qualité. C'est pourquoi il faut "nettoyer" les eaux usées pour limiter le plus possible la pollution de nos réserves en eau : rivières, lacs et nappes souterraines. Le grand défi contemporain est celui de l'assainissement (<http://www.cieau.com>).

I.2.1. Préservation de la ressource

Aujourd'hui, beaucoup de gens prennent conscience que l'eau ne constitue pas une ressource inépuisable. Au Maroc, la qualité de la ressource doit faire l'objet d'une surveillance constante. Les ressources en eau sont classées en catégories de qualité, et celles qui ne répondent pas à certaines normes sont exclues de la production d'eau potable. La pollution peut perturber la production d'eau potable et en augmenter considérablement le prix de revient.

I.2.2. Préservation du patrimoine

L'assainissement a pour fonction de préserver la qualité de la vie sur les lieux mêmes où nous vivons. Grâce au traitement des eaux usées, les rivières les lacs et les nappes ne se transforment plus en égouts. Avec des traitements encore plus complets, les eaux de baignade sont protégées de la présence de virus ou de bactéries qui peuvent propager des maladies. Ensuite, parce qu'il contribue d'une façon décisive à maintenir la qualité de l'environnement et des activités liées à l'eau. Un assainissement des eaux usées efficace contribue à la qualité de notre vie dans tous ses aspects (<http://www.cieau.com>).

I.3. Les catégories des eaux usées

On distingue trois grandes catégories d'eaux usées : les eaux domestiques, les eaux industrielles, les eaux pluviales.

I.3.1. Les eaux pluviales

Elles peuvent, elles aussi, constituer la cause de pollutions importantes des cours d'eau, notamment pendant les périodes orageuses. L'eau de pluie se charge d'impuretés au contact de l'air (fumées industrielles), puis, en ruisselant, des résidus déposés sur les toits et les chaussées des villes (huiles de vidange, carburants, résidus de pneus et métaux lourds...). En outre, lorsque le système d'assainissement est dit "unitaire", les eaux pluviales sont mêlées aux eaux usées domestiques. En cas de fortes précipitations, les contraintes de préservation des installations d'épuration peuvent imposer un déversement "délestage" de ce "mélange"

très pollué dans le milieu naturel. Enfin, dans les zones urbaines, les surfaces construites rendent les sols imperméables et ajoutent le risque d'inondation à celui de la pollution.

I.3.2. Les eaux domestiques

Elles proviennent des différents usages domestiques de l'eau. Elles sont essentiellement porteuses de pollution organique. Elles se répartissent en eaux ménagères, qui ont pour origine les salles de bains et les cuisines, et sont généralement chargées de détergents, de graisses, de solvants, de débris organiques, etc. et en eaux "vannes" ; il s'agit des rejets des toilettes, chargés de diverses matières organiques azotées et de germes fécaux.

La pollution journalière produite par une personne utilisant de 150 à 200 litres d'eau est évaluée à (RADEEMA .2007) :

- de 70 à 90 grammes de matières en suspension ;
- de 60 à 70 grammes de matières organiques ;
- de 15 à 17 grammes de matières azotées ;
- 4 grammes de phosphore ;
- plusieurs milliards de germes pour 100 ml.

I.3.3. Les eaux industrielles

Elles sont très différentes des eaux usées domestiques. Leurs caractéristiques varient d'une industrie à l'autre. En plus de matières organiques, azotées ou phosphorées, elles peuvent également contenir des produits toxiques, des solvants, des métaux lourds, des micropolluants organiques, des hydrocarbures. Certaines d'entre elles doivent faire l'objet d'un prétraitement de la part des industriels avant d'être rejetées dans les réseaux de collecte. Elles sont mêlées aux eaux domestiques que lorsqu'elles ne présentent plus de danger pour les réseaux de collecte et ne perturbent pas le fonctionnement des usines de dépollution.

II. L'assainissement liquide de la ville de Marrakech

L'assainissement liquide a comme objectif de résoudre les problèmes engendrés par les rejets des eaux usées brutes dans le milieu récepteur. La station d'épuration des eaux usées était l'une des composantes clés, pour laquelle une attention particulière était accordée lors des étapes de l'élaboration des études (RADEEMA 2007).

II.1. Cadre général de la ville de Marrakech et de la STEP

II.1.1. Situation géographique

La ville de Marrakech, est située dans la plaine du Haouz centrale, entre les massifs du Haut Atlas au Sud et des Jbilet au Nord. Elle s'étend sur une superficie de 60 km² matérialisée par une plaine à faible pendage Nord-Ouest dont les seuls reliefs présents sont celles des Jbels Guéliz et Koudiat al Abid.

II.1.2. caractéristiques physique et climatologiques de la ville

-Topographie : La topographie de la zone d'étude est caractérisée par une pente douce orientée du Sud-Est au Nord-Ouest avec un dénivelé de 80 m entre la limite Est de l'aéroport (460 m NGM) et oued Tensift (380 m NGM) (GUERRAOUI, 1995).

-Température : Les températures moyennes mensuelles calculées sur la période 1990-2006, varient entre 12°C et 29°C. Les mois les plus chauds sont généralement Juillet et Août avec des moyennes de 29°C. Le mois le plus froid est Janvier avec une moyenne de 12°C. Les températures maximales mensuelles moyennes varient entre 18°C et 37°C alors que les températures minimales varient entre 6°C et 21°C (RADEEMA, 2007).

-Pluviométrie : Les précipitations sur la région de Tensift sont faibles et caractérisées par une grande variabilité spatio-temporelle. L'analyse des séries d'observation pluviométriques montre que la région du Tensift est caractérisée par l'occurrence de périodes de sécheresse plus ou moins longues, précisément on se base sur les précipitations décrites en période, pour le dimensionnement de la STEP ainsi le réseau d'assainissement (RADEEMA, 2007).

-Evaporation : L'évaporation moyenne minimale enregistrée dans la station de Marrakech est de 125 mm observée pendant les mois de Janvier (Tableau 1), alors que la moyenne maximale est atteinte durant le mois de Juillet (362 mm).

Tableau.1 : Evaporation moyenne en mm-1990-2006 (RADEEMA, 2007)

Mois	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC	Moyenne annuelle
Evaporation moyenne (mm)	125	129	174	187	245	282	362	356	294	243	172	129	224 ,80

-Vent : Les vents dominants soufflent de l'Ouest. Des vents chauds (Chergui) proviennent du sud et du sud-est. La vitesse moyenne annuelle du vent observée est de 3 m/s (RAZOKI, 2001). Le choix du site de la station a été basé sur plusieurs facteurs climatiques dont la STEP est installée à la sortie, au Nord de la ville parallèlement à la direction du vent pour que les odeurs émis par les eaux au cours du traitement n'aient aucune nuisance pour la population ou les gênent, aussi les facteurs hydrogéologiques (pour le choix du milieu récepteur), topographique (choisir la pente convenable pour faciliter l'écoulement des eaux traversant le réseau)...etc.

-Humidité : L'humidité moyenne annuelle varie entre 46% à 14h 00 et 79% à 07h 00.

II.1.3. Objectif de la fondation d'une STEP

Le but des différents traitements est de diminuer suffisamment la quantité de substances polluantes contenues dans les eaux usées pour que l'eau finalement rejetée dans le milieu naturel ne dégrade pas ce dernier. Le traitement des eaux usées obéit donc à une logique de préservation des ressources en eau et de protection de l'environnement.

II.1.4. Situation géographique de la STEP

La station d'épuration des eaux usées de la ville de Marrakech est orientée selon un axe Nord / sud, parallèle à la route de Safi, sur le lit majeur de l'Oued Tensift à proximité du pont longeant la RN7, sur une superficie de 17 ha (figure.1).

Au-delà de son rôle structurant qui accompagne la morphologie du terrain, cet axe permet de concentrer les flux et les nuisances. La station suit un système intensif à procédés d'épuration «boues activées» (RADEEMA, 2007).

Précisément le traitement de boues activées à moyenne charge.

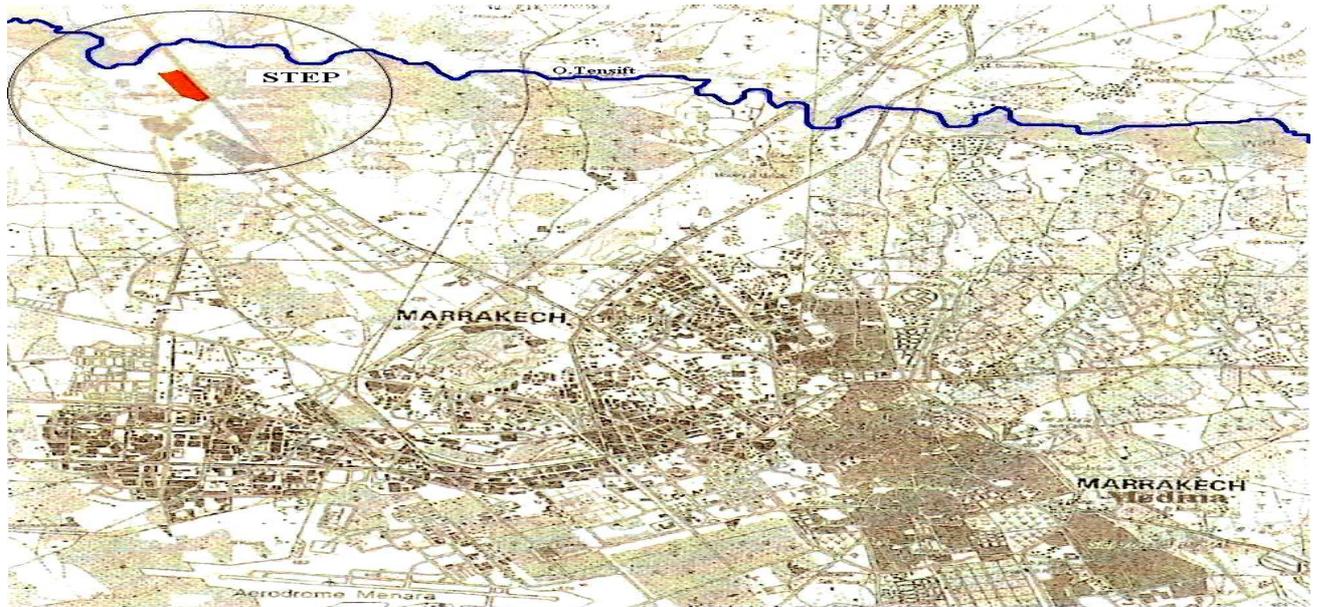


Figure 1 : Situation géographique de la STEP de la ville de Marrakech (RADEEMA, 2007).

II.2. filières de traitement

Le traitement des eaux usées de la ville de Marrakech de la nouvelle station comporte deux composantes : le traitement des eaux et le traitement des boues.

Sa mise en œuvre passe par deux phases dont la première est déjà mise en service depuis 2008 consistant en un traitement primaire des eaux et en une filière de traitement des boues par digestion anaérobie suivi de déshydratation.

En deuxième phase, le traitement des eaux usées passera au niveau tertiaire afin de pouvoir mobiliser les eaux traitées pour l'irrigation des espaces verts tandis que la filière des boues sera dédoublée afin qu'elle recevra les boues issues des traitements secondaire et tertiaire.

II.2.1. Traitement des eaux

La filière de traitement des eaux est composée en :

Première Phase :

- D'un by pass général de la station,
- De deux files de prétraitement composées
- D'une fosse à bâtard de réception des eaux usées équipée des installations nécessaires pour extraire les déchets de tailles importantes (gros cailloux, branches, etc..),

- D'un dégrillage grossier à 80 mm,
- D'un dégrillage fin à 10 mm et des équipements de transfert et de stockage des refus communs au dégrillage et au tamisage,
- D'un dessablage, dégraissage rectangulaire aéré équipé de ponts racleurs,
- D'un traitement des sables et un concentrateur de graisses,
- D'un canal de comptage équipé d'un préleveur,
- D'un by pass du traitement primaire,
- D'une décantation primaire composée de 3 ouvrages (annexe 1 et 2).

Deuxième Phase :

- D'un by-pass du traitement biologique,
- D'un traitement biologique par boue activée moyenne charge composé de 4 bassins suivi d'une clarification composée de 4 ouvrages,
- D'un by-pass du traitement tertiaire,
- D'un relèvement intermédiaire,
- D'un traitement tertiaire composé d'une coagulation et floculation avec injection de chlorure ferrique et de polymère suivi d'une filtration sur sable puis d'une désinfection par Ultra-violet,
- D'un rejet des eaux ou d'une réutilisation pour l'arrosage.

II.2.2. Traitement et Caractérisation des boues résiduelles

La filière de traitement des boues est composée (annexe 3):

- d'un épaissement des boues primaires,
- d'un épaissement dynamique du mélange de boue biologique et tertiaire, (flottation ou tambours d'égouttage) prévu en deuxième phase ;
- d'une digestion des boues comprenant 4 digesteurs mésophiles (dont 2 réalisés en première phase) une unité de désulfuration, d'un gazomètre et d'une torchère ;
- d'un stockage des boues digérées,
- d'une déshydratation des boues digérées par filtres à bandes,
- d'une unité de chaulage à utiliser en secours,
- d'un stockage des boues sur site ; ce stockage n'est pas intégré dans l'évaluation de la surface,
- d'une valorisation du biogaz, cette valorisation n'est pas intégrée dans l'évaluation de la surface.

II.2.2.1 Définition et origine des boues

Les boues sont des résidus de traitement provenant de stations d'épuration des eaux ménagères ou des eaux d'égouts communaux. Aussi résidu de curage de fosse septique. Plus généralement, tous résidu de traitement d'eau.

Le terme « boues de station d'épuration des eaux usées » est le terme générique pour les différentes matières issues des processus d'épuration des eaux dans les stations d'épuration. Ces boues proviennent du traitement d'eaux ménagères, urbaines et industrielles rejetées dans les égouts publics.

Dans les stations, divers autres déchets sont à prendre en compte : déchets flottant entraînés par les eaux, sable, etc. (OUAZANI R., 2009).

II.2.2.2. Types des boues

La nature des boues produites par une station d'épuration dépend de plusieurs facteurs : tel le type de séparation de boues utilisé, le procédé de traitement qui est fonction de la taille du système de traitement des effluents et de leur caractéristique d'origine.

-Les eaux usées industriels produisent différents types de boues caractérisées soit par :

-Des matières organiques : cas des effluents d'abattoirs ou de fermentations.

-Des matières inorganique : qui peuvent contenir des composés toxiques (ex : métaux lourds) cas des industries pharmaceutiques ou métalliques etc. ...

-Les eaux usées domestiques produisent des boues décantables :

-Boues brutes ou primaires (boues de traitement primaire)

Caractérisées par des mauvaises odeurs, peu de liquide, et fortement putrescibles avec un pourcentage en eau de 94 à 98% et 1,5 à 2,5% de matières solides.

Elles sont produites par une simple décantation des matières en suspension (MES) contenues dans les eaux usées. 70% des MES peuvent ainsi être retenues. Avec l'évolution de la conception des stations, ce type de boues est en train de diminuer.

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

Les boues des stations d'épuration sont un matériau très complexe.

Les caractéristiques physiques des boues d'épuration dépendent de leur teneur en eau, si elle dépasse 90%, elles se comportent comme un liquide. En dessous de cette teneur (<90%) d'eau, les boues se comportent comme un liquide non newtonien avec un flux plutôt plastique que visqueux.

-Etat de l'eau dans les boues : L'eau dans les boues peut être libre ou reliée par des liaisons aux particules qui composent la boue.

L'état de l'eau dans les boues se répercute sur le traitement ; plus l'eau est liée aux particules par des liaisons chimiques, plus nous avons besoin d'énergie pour l'extraire.

L'eau est généralement éliminée par coagulation, par utilisation de composés chimiques ou par des équipements spécifiques. Ces équipements peuvent altérer les floccs et regrouper les particules entre elles. Les forces qui relient les particules entre elles chassent les eaux de floccs et l'eau de capillarité (OUAZANI R., 2009).

II.2.2.3. Caractères physiques et chimiques

-Caractéristiques physiques : Les propriétés mécaniques des boues plus ou moins concentrées et, plus précisément, leur consistance.

Un certain nombre de notions sont utilisables à priori pour décrire l'état physique d'une boue lorsqu'on veut en assurer la manutention.

Il s'agit de :

- la liquidité ;
- la plasticité (aptitude à la compaction) ;
- la friabilité ;
- l'adhérence ;
- le comportement à l'agitation, etc.

Il existe des tests de caractérisation spécifique, permettant de classer une boue déterminée parmi trois états physiques conventionnels : liquide, plastique, solide avec retrait (friable).

-Caractéristiques chimiques

La nature des boues produites par une station d'épuration dépend de plusieurs facteurs dont (Tableau1):

- le type de séparation de boue utilisé ;
- du procédé de traitement qui est fonction de la taille du système de traitement des effluents ;
- de leurs caractéristiques d'origine.

Tableau 2 : Exemple de composition chimique moyenne de boues

Type de boue	Quantité (l/habit/j)	Matière sèche (kg/habit/j)	%Eau
<i>bassin primaire</i>	1,1	0,05	95,50%
<i>bassin secondaire</i>	2,4	0,036	98,50%
<i>filtre à Sable</i>	0,23	0,014	93,90%

Quelle que soit la destination finale, les boues en sortie de station subissent des traitements préalables consistant à réduire les volumes.

Le volume des boues est lié à leur teneur en eau ou, inversement, leur teneur en matières sèches, dite aussi siccité.

- une boue brute sans traitement contient 1% de MS ;
- une boue épaissie contient 5% de MS ;
- une boue déshydratée contient 25% de MS ;
- une boue sèche contient 90% de MS.
-

II.3. Etapes de traitement des boues résiduaires

II.3.1. Epaississement

L'objectif de cette étape est de réduire la quantité d'eau pour diminuer le volume des boues pour les étapes suivantes de traitement. Très souvent l'épaississement est réalisé par des moyens physiques tels la flottaison, la centrifugation ou la mise dans des bassins pour une simple sédimentation. (BOEGLIN J.Cl., 2001)

Il existe deux types d'épaississement :

- Epaississement gravitaire
- Epaississement dynamique

II.3.1.1. Epaississement gravitaire

D'une façon générale, la technique de concentration des boues la plus utilisée.

Elle consiste à faire séjourner des boues dans des bassins de forme cylindro-conique. Jusqu'à 5 m de diamètre, on peut utiliser le type statique, simple cuve cylindrique à fond conique (45 à 70° sur l'horizontale). Au-delà de cette dimension, on munit des cuves à radier à pente faible d'un système de raclage et d'agitation lente dont le rôle est double :

- Faciliter le glissement des boues vers la fosse centrale d'où elles sont extraites ;
- Permettre le dégagement de l'eau interstitielle et des gaz occlus dans les boues au moyen d'une herse verticale accrochée au dispositif tournant.

L'ensemble du dispositif mécanique de raclage est le plus souvent à entraînement central avec double bras diamétral. Ce système est constitué d'une série de racleurs montés « en jalousie » afin d'éviter le blocage de la boue au cours de son transfert vers la fosse centrale d'extraction. On a toujours intérêt à construire des épaisseurs de hauteur suffisante, afin de faciliter le tassement de la boue sous le seul poids de la masse solide. Une hauteur de 3,5 à 4 m, tenant compte du volume de stockage, est préconisée (BOEGLIN, 2001).

II.3.1.2. Epaissement dynamique

Au classique épaissement par décantation statique sont venues s'ajouter, depuis quelques années, trois techniques d'épaissement dynamiques qui, en particulier avec les boues légères (comme les boues biologiques en excès), permettent d'obtenir des meilleurs taux d'épaissement au prix, il est vrai, d'une plus forte dépense d'énergie électrique et éventuellement de réactifs flocculant. Il s'agit de la flottation, de la décantation centrifuge et, plus récemment, des grilles et tamis d'égouttage.

-Epaissement par flottation : Il présente un grand intérêt pour la concentration de suspensions boueuses à « floccs » légers, de faible décantabilité (boues d'hydroxydes métalliques, boues biologiques en excès à titre indicatif...). Le procédé généralement mis en œuvre en traitement des boues est l'aérotation, qui produit des micro bulles d'air selon la technique de pressurisation – détente : (détente du fluide préalablement mis en contact avec l'air comprimé à une pression comprise entre 3 et 6 bars).

-Épaissement par centrifugation : Peu utilisé jusqu'à présent, en raison essentiellement de problèmes de colmatage, cette technique paraît cependant assez bien adaptée à l'épaissement des boues activées sans conditionnement polymérique préalable.

Des résultats très prometteurs ont été obtenus également avec des machines du type décanteuse continue à axe horizontal lorsqu'elles sont conçues avec un bol plein cylindro-conique d'angle de conicité très réduit (de l'ordre de 4° pour certains modèles). L'obtention

de rendements d'extraction supérieurs à 90 % nécessite, le plus souvent, un conditionnement polymérique préalable des boues. L'épaississement centrifuge présente l'avantage d'obtenir, en général, d'une concentration élevée de la phase boueuse par la mise en œuvre d'appareillages dont le faible encombrement permet la conception d'une unité d'épaississement très compacte. L'inconvénient majeur vient de frais d'exploitation très importants en énergie.

-Épaississement réalisé par des systèmes drainants (grilles et tamis d'égouttage) : Il a connu un développement récent dans les stations d'épuration biologique de petite et moyenne capacité, pour obtenir un taux d'épaississement conséquent pour la valorisation agricole des boues sous forme liquide. Les équipements mis en œuvre sont de conception simple et robuste ; ils fonctionnent en continu pour réaliser un épaississement accéléré des boues préalablement floculées à l'aide de polymères de synthèse suivant le principe d'égouttage naturel et de raclage.

II.3.2.2. Epaississement des boues primaires et biologiques

- Epaississement des boues primaires : Les boues extraites en fond de décanteur primaire, ainsi que les boues issues du traitement tertiaires, sont envoyées vers l'épaississement gravitaire.

L'épaississement des boues primaires est réalisé en silo épaisseur hersé jusqu'à une concentration de 35 g/l.

La charge au radier retenue est de 85 Kg MS/m².j et la vitesse ascensionnelle de 0.28m³/m².h.

- Epaississement des boues biologiques : L'épaississement des boues secondaires est réalisé par 2 flottateurs à pressurisation indirecte.

Les boues préalablement conditionnées avec du polymère sont admis dans le flottateur via une cheminée centrale assurant le mélange avec de l'eau pressurisée.

Les boues flottées s'agglomèrent à la surface du flottateur jusqu'à former une couche épaisse.

Celles-ci sont récupérées via une coupe tournante se déplaçant sur la périphérie de la cuve.

Les particules lourdes, non accrochées par les micros bulle décantent en fond d'ouvrage. Le flottateur est équipé d'une racle de fond, permettant de ramener ces boues décantées vers un puisard central.

Il sera équipé de pompes de pressurisation, de compresseurs et d'une installation de préparation et de dosage de polymère.

II.3.2. Extraction et homogénéisation des boues épaissies

Afin de garantir le bon fonctionnement d'une unité de digestion, il est nécessaire d'alimenter les digesteurs à charge et débit réguliers.

Un stockage tampon sera aménagé en amont de la digestion. Cet ouvrage sera équipé d'une agitation puissante afin d'admettre en digestion des boues de qualité homogène.

Le volume utile de stockage tampon est de 210m³, réparti en deux compartiments afin de faciliter les opérations de maintenance et d'intervention sur l'une des deux bâches. La durée du stockage en pointe sera de 0.3 jour.

L'extraction des boues d'épaississement gravitaire (boue primaire) sera composée de 2 pompes volumétriques à rotor excentré, en plus d'une pompe secours installée de 24 m³/h.

L'extraction des boues de la flottation (boue biologique) sera composée de 2 pompes volumétriques à rotor excentré, en plus d'une pompe secours installée de 22 m³/h.

Le déstockage du bassin tampon et la reprise des boues vers la digestion sera composée de 2 pompes volumétriques à rotor excentré, en plus d'une pompe secours installée de 35m³/h.

II.3.3. Stabilisation

Une fois épaissies, les boues peuvent subir deux options de traitement :

- Dessèchement plus accentué pour obtenir 30 à 40 % de matières sèches.
- Stabilisation avant l'étape de déshydratation.

Les boues sont stabilisées afin de permettre :

- D'éviter la dégradation anaérobie pendant leur stockage ultérieur (putréfaction) qui peut produire des odeurs offensives (NH₃, H₂S) etc. ...).
- Une destruction totale des germes pathogènes
- Une destruction partielle des matières solides ;
- Une augmentation des teneurs d'azote soluble (NH₄).

Il existe différentes catégories de procédés de stabilisation des boues (procédés biologiques, chimiques, ou thermiques).

L'objectif principal de la stabilisation est l'élimination des matières organiques et volatiles pour empêcher toute fermentation au moment du stockage des boues. Une boue est considérée comme complètement stabilisée si elle est complètement humifiée. Les substances

humiques sont non putrescibles, se dégradant peu et ne présentant pas de risques d'émanation de mauvaises odeurs.

En fait, la définition des boues stabilisées est encore controversée ; il n'y a pas de définition universelle adoptée et il n'y a pas encore de testes (chimique ou biologique) de détermination du seuil de stabilité des boues.

-Stabilisation chimique par la chaux : La chaux est ajoutée pour augmenter le pH des boues jusqu'à 12 ou plus ; ce qui limite le développement de microorganismes. Par conséquent, les boues ne peuvent être dégradées tant que le pH est maintenu à ces valeurs, les microorganismes sont complètement tués au bout de 3 heures d'application. Les dosages de chaux utilisés peuvent être de 100 à 500g de Ca (Oh) 2/Kg de matières sèches pendant au moins 14 jours, variant selon qu'il s'agisse de boues primaires ou de boues activées.

-Stabilisation thermique : C'est un processus continu où les boues sont chauffées à 260 °C dans un vessel sous une pression de 2760 KN/m², pour une courte période (30 min). Dans la plupart des cas ce procédé sert à la fois à la stabilisation et au conditionnement des boues. Sous une forte température et pression, les liaisons entre l'eau se rompent et les matières solides coagulent. En plus les matières protéiques sont détruites ce qui élimine les cellules vivantes, les matières organiques et l'azote ammoniacal.

- Stabilisation biologique : Les procédés biologiques de stabilisation sont les systèmes les plus pratiqués ; résultant de l'utilisation des fractions organiques et volatiles des boues ; telle manière à ne pas avoir d'anaérobiose au moment du stockage ; les boues résultantes ont un volume plus réduit moins d'odeurs et plus grandes teneurs de matières particulaires. Le procédé le plus commun est la digestion anaérobie (avec chauffage ou non).

La matière organique des boues primaires est converti biologiquement sous les conditions d'anaérobiose, ont des produits finaux comme le méthane (CH₄), le dioxyde de carbone (CO₂).

Les boues sont introduites dans le réacteur anaérobie fonctionnent d'une manière continue ou intermittente ; ainsi les boues sont stabilisées. (BOEGLIN, 2001)

II.3.4. Digestion

La méthanisation ou digestion anaérobie est un procédé naturel de transformation de la matière organique en hydrocarbure par des bactéries en l'absence d'oxygène. Conduite

dans des enceintes confinées – appelées digesteurs – à l'intérieur desquelles les réactions de fermentation sont optimisées et contrôlées, elle produit du biogaz composé majoritairement de méthane, tout en réduisant de moitié le 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.

La chaîne de digestion se divise en plusieurs postes :

- l'épaississement des boues avant digestion ;
- le (ou les) digesteurs ;
- le stockage du biogaz ;
- la déshydratation des boues après digestion.

Le premier maillon du traitement des boues après les phases de décantation, la méthanisation facilite le traitement des boues quelle que soit leur destination finale : valorisation agronomique, incinération, enfouissement en installation de stockage, et quels que soient les traitements intermédiaires appliqués : déshydratation, chaulage, séchage thermique, compostage. En effet, la méthanisation comporte les avantages suivants :

- réduit de 40 % en moyenne les quantités de boues à traiter ;
- élimine fortement les nuisances olfactives ;
- produit un digestat stabilisé, débarrassé en grande partie des germes pathogènes (bactéries mais aussi virus et parasites) et présentant un pouvoir fertilisant ;
- réduit les teneurs en composés organiques volatils.

En sortie des décanteurs et des clarificateurs, les boues sont introduites dans les digesteurs. 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 (ou 55 °C) et brassés pour maintenir des conditions favorables au développement de micro-organismes. Plusieurs populations bactériennes vont se développer et transformer des 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.

II.3.4.1. Digesteurs

Le digesteur, encore appelé fermenteur ou bioréacteur anaérobie, est généralement constitué d'une cuve fermée, étanche à l'air et de préférence isolée thermiquement de l'extérieur dans laquelle les microorganismes se côtoient pour dégrader chimiquement et biologiquement les effluents organiques et produire du biogaz. Le choix du digesteur varie en

fonction du type de déchets à traiter et de l'application visée. On peut également classer les digesteurs selon le mode d'alimentation : batch ou continu.

On distingue plusieurs familles de procédés, avec des sous-familles et de très nombreuses variantes. Cependant la quasi-totalité des digesteurs d'effluents et boues industrielles sont des réacteurs à alimentation continue, que l'on classe par familles :

Les digesteurs à cultures libres

Les réacteurs infiniment mélangés

Les réacteurs contacts

Les réacteurs "piston"

Les digesteurs à cultures fixées

Les systèmes à culture fixe ou lit fixé

Les systèmes à lit fluidisé

Les systèmes à lit de boues anaérobies à flux ascendant dits «

UASB » (Up flow Anaerobic Sludge Banket)

Pour la station d'épuration de Marrakech, c'est ce dernier (UASB) qui a été choisi le procédé de digestion retenu est une digestion anaérobie mésophile à moyenne charge.

Une charge volontairement sécuritaire inférieure à 2 Kg MVS / m³.j a été appliquée.

La digestion mésophile sera réalisée dans 3 digesteurs de 5000m³ afin d'assurer un temps de séjour minimal de 21 jours permettant un abattement de 49% des matières volatiles entrantes.

L'évacuation des boues digérées gravitairement vers un stockage aval. (MAUDOUÏ, 1999).

II.3.4.2. Stockage du biogaz

La dégradation de la matière organique va générer une production de biogaz. La production de biogaz est équivalente à 900 l/Kg MVS abattue.

Le biogaz produit emplit le dôme du digesteur. Une pression « de fonctionnement » de l'ordre de 30 mbar. Le dôme fait partie intégrante du circuit de biogaz comprenant également :

- La chaudière permettant de chauffer l'eau nécessaire à l'échangeur de chaleur
- Un gazomètre permettant de stocker partiellement la production journalière de biogaz
- Une torchère permettant le cas échéant, de brûler l'excédant de biogaz produit.

Une partie de biogaz alimentera des moteurs de cogénération.

La capacité de stockage est de 3 450 m³ avec la mise en place d'un gazomètre de type souple à double membrane.

II.3.4.3. Brassage

Pour garantir le bon fonctionnement de la digestion, une homogénéisation importante au sein de l'ouvrage est nécessaire. Un brassage au biogaz de la masse de boue a été retenu.

Etant donné la concentration et le type de boues à brasser, le taux de brassage à retenir est de 1 Nm³ /h.m². le débit à fournir est donc de 570 Nm³/h par digesteur.

L'injection de biogaz de brassage se fait en pied d'ouvrage via un ensemble de cannes et assurée par 3 compresseur biogaz à palette (1/file) + 1 secours installée.

II.3.4.4. Chauffage des boues

Le mélange homogène des boues épaissies est introduit dans des échangeurs en continu depuis la bêche amont, afin d'être à 37°C.

Le chauffage des boues digérées est donc par passage dans des échangeurs tubulaires eau/boues fonctionnant à contre courant. Le liquide calorifique employé est de l'eau chaude. Il est retenu un échangeur par digesteur de 580th/h + 1 en secours commun.

L'eau chaude est produite d'une part par recyclage de la chaleur générée par la cogénération du biogaz ou par la chaleur produite par une chaudière si la cogénération est en arrêt.

II.3.4.5. Chaudière

La chaudière permet de subvenir aux besoins calorifiques de la digestion des boues si l'unité de cogénération du biogaz est arrêté.

Cette chaudière est de type bicom bustible gaz naturel/biogaz de sorte à pallier à tout manque de biogaz (démarrage de la digestion par exemple). Il est retenu une chaudière d'une puissance de 400th/h.

II.3.4.6. Torchère

La torchère est dimensionnée pour pouvoir brûler l'intégralité du biogaz produit. Sa capacité sera équivalente à 359 Nm³/h et sa température de combustion de 900°C.

II.3.5. Stockage des boues résiduelles

Les boues digérées sont stockées dans une bache aval agitée qui présente l'intérêt de constituer un tampon vis-à-vis l'unité de déshydratation des boues qui ne fonctionne que les jours ouvrés contrairement à la digestion fonctionnant en continu.

Par ailleurs, afin d'admettre en déshydratation des boues de qualité homogène, le stockage aval a également pour fonction de mélanger les boues avant leur déshydratation par l'intermédiaire d'une agitation puissante.

Le volume utile de stockage tampon est de 1 475m³.

II.3.6. Déshydratation

Les boues extraites du stockage aval sont envoyées vers la déshydratation.

La déshydratation des boues est réalisée par 6 filtres à bandes fonctionnant en parallèle de 425 Kg MS/h (214 quantité de MS appliquée/mètre de largeur de bande)

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

La floculation des boues est réalisée par adjonction de polymères en produit sec. Un dispositif de préparation et d'injection de polymère en ligne par pompes doseuses est prévu (centrale automatique avec dilution intégrée du produit comprenant une cuve de préparation et une cuve de maturation agitée).

Les boues déshydratées auront une siccité minimale de 20% MS.

La centrale automatique de préparation du polymère d'une capacité de 6 000 l est commune aux 6 files. 6 pompes volumétriques + 4 secours installés assureront le dosage du polymère pour chaque file.

Le lavage des filtres à bande est effectué avec de l'eau industrielle. Les centras et les eaux de lavage aboutissent au poste toutes eaux.

II.3.7. Reprise, Chaulage, et stockage des boues déshydratées et chaulées

Le chaulage a pour effet d'améliorer la rhéologie des boues déshydratées. Les malaxeuses seront alimentés par de la chaux vive. En sortie des malaxeuses les boues sont reprises par pompage pour alimenter le stockage.

Les boues chaulées auront une siccité de 30%.

Il est prévu deux files de chaulage en parallèle composés de deux malaxeuses chaux - boues avec une capacité unitaire (boue chaulée) de 4 220 Kg MS/h.

Le stockage des boues chaulées sera aménagé sur une plate forme bétonnée extérieure de 460m² divisée en deux alvéoles et bordée de muret de 1.70 m de hauteur de manière à faciliter le stockage de la boue par un chargeur. La durée minimale de stockage est de 7 jours.

II.3.8. Unité de cogénération du biogaz

L'ensemble de cogénération est de type moteurs thermiques/alternateurs + dispositifs de récupération d'énergie thermique sur :

- les circuits de refroidissement des moteurs (huile et eau)
- les gaz d'échappement (si nécessaire).

L'installation comporte la mise en œuvre de deux groupes de cogénération.

Le groupe de cogénération se compose de moteurs à combustion fonctionnant au biogaz, générant de la chaleur et de l'énergie électrique.

L'énergie électrique sera utilisée pour les besoins de la station, soit revendue au producteur de l'électricité.

La chaleur récupérée au moyen des circuits d'eau de refroidissement des moteurs est renvoyée vers les circuits de chauffage des boues des digesteurs.

Le fonctionnement normal, l'intégralité du biogaz produit est « brûlé » sur l'unité de cogénération.

-Le retraitement du biogaz : Le biogaz est puisé dans le gazomètre (stockage tampon) et traité de manière à le mettre en conformité avec les besoins des moteurs à combustion de la cogénération :

- Extraction de la vapeur d'eau sur le principe de la condensation au moyen d'un échangeur
- Elimination de l'H₂S sur un filtre à charbon actif.
- Refroidissement jusqu'à température ambiante

Un ensemble de surpression du biogaz, commun aux 2 groupes permet de la comprimer à une pression de 350 mbar conforme aux besoins des moteurs.

Le biogaz est analysé en continu par mesure d'O₂, de CH₄, de CO₂ puis alimente les moteurs de la cogénération.

-Moteur à combustion : Chaque groupe est constitué d'un moteur à combustion interne de type multicylindres quatre temps.

L'énergie thermique est récupérée de deux manières :

- Au niveau des circuits d'eau de refroidissement des moteurs.
- Au niveau des gaz d'échappement.

-Production d'électricité : Chaque groupe comporte son propre alternateur.

Cet alternateur de type synchrone est constitué d'une génératrice à pôles intérieurs et d'une bobine à pôles externes pilotées par un excitateur à aimant permanent.

- Equipements de sécurité : L'ensemble de l'installation est équipé d'une détection gaz et incendie comprenant des explosimètres, des détecteurs de fumées, des détecteurs thermiques et des déclencheurs manuels répartis dans le local.

La détection provoque une alarme sonore et visuelle avec coupure générale de l'arrivée du gaz et ouverture du circuit de couplage HTA.

- Rejets des gaz de combustion : Les gaz d'échappement sont évacués à l'extérieur par l'intermédiaire d'un silencieux et d'une cheminée unique pour les deux groupes et les niveaux de rejet seront contrôlés et conformes avec la norme Allemande sur la combustion du biogaz : TA-LUFT (normes de référence pour la réglementation européenne).

II.3.9. Bilan global de la chaîne de digestion

-La chaîne de digestion : La digestion sera réalisée dans 4 digesteurs afin d'assurer un temps de séjour minimal de 19 jours permettant un abattement moyen de 50 % des matières volatiles entrantes.

Dans le cadre de la première tranche, deux digesteurs existent déjà. Pour satisfaire les besoins de traitement des boues générées par la filière biologique, il est nécessaire de prévoir 2 nouveaux ouvrages identiques qui seront construits à proximité des premiers sur des emplacements réservés.

Tableau 3 : Paramètres des boues primaires et biologiques

Paramètres	Conditions nominales	Valeurs
Rappel quantité de boues à traiter *(7 j/7)	63 500	kg MS/jour
Rappel masse de MV à traiter (7 j/7)	46 470	kg MV/jour
Charge volumique correspondante	2	kg MV/m ³ .jour
Temps de séjour	19	Jour
Température interne du système	35	°C
Rendement d'abattement sur MES	35	%
Charge de MS après digestion	41 275	kg/jour
Concentration	34	g/l
Volume correspondant	1 213	m ³ /jour
Volume de biogaz produit	21 834	m ³ /jour
Taux de la production stockée	18	%
Volume retenu	4 000	m ³

* Quantité prenant en compte les boues primaires + les boues biologiques

-Déshydratation des boues digérées : Les boues digérées stockées seront envoyées, pour être déshydratées, vers des filtres à bandes (Tableau 3 et 4).

Tableau 4 : Charge à traiter et Paramètres des boues déshydratées

Paramètres	Conditions nominales estivales	Unités
Temps de fonctionnement journalier	16	h/j
Temps de fonctionnement hebdomadaire	6	j/7
Volume de boues journalier	1415	M ³ /j
Débit horaire à traiter	88	M ³ /h
Quantité de MS par jour	48 110	kg MS/j
Quantité de MS par heure	3 010	kg MS/h
Taux de conditionnement au polymère	5	kg/t MS
Paramètres	Conditions nominales estivales	Unités
Siccité des boues déshydratées	20	%
Siccité des boues chaulées	35	%
Quantité de chaux	300	kg/t MS
Quantité de MS par jour	48 110	kg MS/j
Quantité de MS par heure	3 010	kg MS/h
Quantité de chaux par jour	14,4	t/j
Quantité de chaux par heure	900	kg/h
Type de chaux	Vive	/
Quantité totale de boues chaulées	254	t/j

-Bilan Gaz

Tableau 5 : bilan Gaz

MO détruite	kg/jour	23000
Ratio	Nm ³ /kg	0.95
Biogaz produit	Nm ³ /jour	21850

Avec : (Nm³ = m³ à 25° et 1 Bar)

DEUXIEME PARTIE :
FILIERES DE VALORISATION DES BOUES

Les boues résiduelles rejetées par la station d'épuration de la ville peuvent contenir des concentrations en métaux lourds, qui peuvent présenter ou non un effet nocif dans l'avenir c'est à dire la contamination du sol sera en fonction du temps à cause du phénomène de l'accumulation de la matière organique restante des eaux épurées et des métaux lourds, qui vont contaminer par suite (plus de 15 ans) le sol par infiltration et qui peuvent même atteindre les eaux de la nappe. Donc il est recommandé de faire une étude analytique des boues résiduelles et son impact sur le sol et de trouver un moyen le plus vite possible pour s'en débarrasser et par conséquent protéger les réserves naturelles du phénomène de toxicité (nappe, sols...etc.).

Pour pouvoir résoudre convenablement et rationnellement le problème de boues, il est absolument indispensable de savoir :

- Caractériser le « déchet » produit ;
- Définir en général les différentes filières de destinations des boues résiduelles.

I- Situation actuelle : la mise en décharge

Les boues issues du traitement des eaux usées sont considérées comme des déchets, la RADDEMA les mets en décharge, ce qui signifie que leur valorisation ou élimination ne présentait pas une préoccupation en premier lieu chez la régie ,mais dans l'avenir la situation risque de changer d'une part, la commune va autorisé l'espace dans la décharge à 100 DHS/Tonne, sachant que la station produit 80 tonnes par jour en première phase voir 180 tonnes en deuxième ce qui constitue une quantité énorme que pour une mise en décharge.

Et d'autre part, de point de vue environnemental la mise en décharge des boues n'est pas une solution efficace pour se débarrasser de la pollution, on ne fait que la concentrer, la déplacer, et l'expédier dans un milieu différent de celui où elle a apparut.

La mise en décharge des boues implique obligatoirement une étude d'impact préalable permettant une évaluation des risques présentés pour l'environnement.

En particulier, pour éliminer les risques de contamination des eaux superficielles et souterraines et les risques sanitaires liés aux micro-organismes (parasite, virus...), il est indispensable d'avoir une bonne connaissance :

- des facteurs liés au site de décharge envisagé (configuration géologique du site, caractéristiques pédologiques et géologiques du sol et du sous-sol, etc.) ;
- des facteurs caractérisant le déchet sur le plan de sa nature et de sa composition, de sa stabilité chimique et biologique et, enfin, de son aptitude à la manutention et au stockage.

Cette solution d'élimination des boues s'est heurtée très rapidement :

- à la saturation des sites de décharge à proximité des grandes agglomérations rendant nécessaires des transports de plus en plus longs et coûteux ;
- au refus par le public d'ouverture de nouvelles décharges à proximité des zones urbanisées, voire en milieu rural et, par ailleurs, au refus de bon nombre d'exploitants d'accepter en décharge des déchets insuffisamment déshydratés, les outils de manutention étant inadaptés.

Pour Marrakech, les déchets « boues » se rajoutent aux lixiviations de la décharge publique de la ville, qui est de point de vue géologique caractérisée par un socle perméable (schiste et granite altérés) vont constituer une source potentielle de pollution des eaux de la nappe phréatique et celles de l'oued Tensift situé près de la décharge, de surcroît, dégager des gaz nocifs à impact négatif sur l'atmosphère (augmentation de l'effet de serre).

Alors que faire des boues ? les incinérer, les incorporer dans des ciments, les jeter dans la mer ou les enfouir ? les sécher ? les contrôler puis les répandre sur les sols, ou les transformer en biogaz? (Club Crin, 2000)

De ce fait, on a commencé à penser à comment rendre ces déchets les plus rentables possibles ou même essayer au début de réduire la masse de mise en décharge et de réduire en même temps la pollution produite, en attendant de trouver la façon la plus valorisante en fonction des caractéristiques de ces boues. C'est la qualité des boues qui déterminera le choix final d'élimination.

Actuellement, trois modes d'élimination et de valorisation des boues sont existantes et utilisées dans des les pays les plus développés (ALOE, 2003) :

- La valorisation énergétique.
- L'incinération
- La valorisation agronomique

Mais avant de détailler ces filières de valorisation il est intéressant de décrire une étape importante : c'est le séchage thermique car sans elle, on ne peut pas parler d'incinération ou de valorisation énergétique.

II -Le séchage

Le séchage élimine en grande partie ou en totalité l'eau par évaporation, soit par :

- Voie naturelle (lits de séchage)
- Voie thermique.

II.1. Séchage naturelle

La technique des lits de séchage se pratique à l'air libre sur des boues liquides et combine évaporation naturelle et drainage de l'eau libre à travers une couche filtrante de sable et de graviers. Ce système extensif donne des boues solides à 35 - 40 % de siccité mais reste fort dépendant des conditions météorologiques (MAUDOUÏ, 1999).

II.2. Séchage thermique

Le séchage à pour but d'éliminer par vaporisation le liquide qui imprègne un solide, il est largement utilisé dans l'industrie chimique où il vient souvent en complément d'opérations comme la sédimentation, la filtration ou l'essorage (techniques d'ingénieurs articles relatifs au séchage).

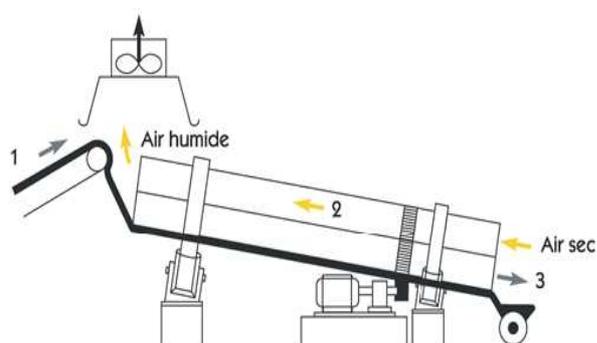
On a deux types de sècheurs utilisés couramment dans l'assainissement des boues :

- Sécheur à Tambour rotatif
- Sécheurs à bandes (CHARREAU et CAVAILLE, 1998).

II.2.1. Sècheurs à TAMBOUR ROTATIF

Ce séchoir est constitué d'un tambour (cylindre), généralement de grande longueur, tournant lentement autour d'un axe légèrement incliné par rapport à l'horizontale. Le produit humide est introduit en partie supérieure par un tapis ou une vis d'Archimède. Le produit avance par gravité, les grains roulant les uns sur les autres (Figure 2)

1. Entrée du produit humide
2. Léchage air chaud
3. Sortie du produit sec



Type de produit

Produit fibreux

Produit granulaire

Produit pâteux Extrudable, granulable

Figure 2 : Séchoir à tambour rotatif

Y'a d'autres types de séchoirs tambour :

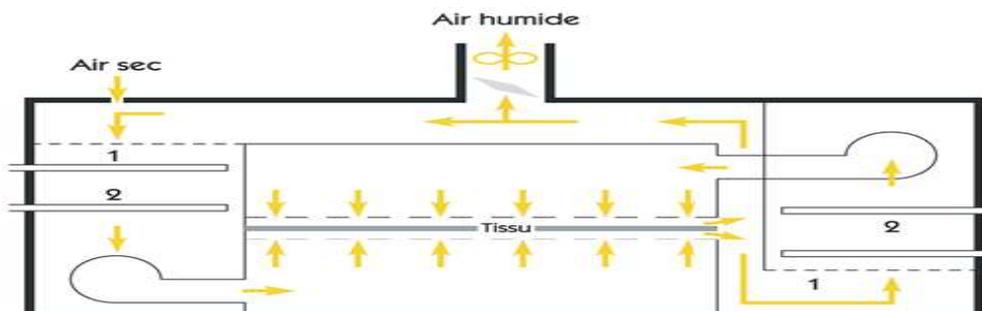
- Séchoir tambour convectif (à léchage et brassage)
- Séchoir tambour conductif
-

II.2.2. Sécheurs à BANDE

Ils épaississent en continu, le processus comprend deux étapes principales : la filtration gravitaire et pressage

L'efficacité du filtre à bandes provient de l'action des deux bandes qui pressent les Boues à travers un circuit de rouleaux où la pression est augmentée de façon progressive (MAUDOUI, 1999).

1. Filtration de l'air
2. Chauffage de l'air



Type de produit : Produit en bande (Figure 3).

Figure 3 : Sécheurs à bande

II.3. Intérêts du séchage

- Diminuer le volume et la masse des boues et permettre la stabilisation et l'hygiénisation.
- Mieux répondre aux aspects de la réglementation :
- Hiérarchie de l'élimination des déchets
- Améliorer les possibilités de recyclage (co-incinération en centrale d'énergie, cimenterie, valorisation comme amendement agricole)
- Diminuer les coûts de transport (eau) et les impacts Environnementaux

- Transformer l'image négative des boues pâteuses par des granulés de boues séchées et afficher le concept fort de valorisation de la biomasse renouvelable (MAUDOUI M. 1999).

III -Valorisation énergétique

La valorisation énergétique consiste à récupérer de l'énergie des boues après leur incinération ou après la fermentation nommée aussi méthanisation des fractions organiques. Ainsi, l'incinération produit la chaleur des fumées qui peut être récupérée sous la forme de vapeur ou sous la forme d'électricité, et la méthanisation va produire du biogaz en même temps que le compost.

De ce fait, la solution de méthanisation présente plus des atouts économiques environnementaux.

III.1. Utilisation du biogaz

Le biogaz généré dans cette étape est généralement utilisé en :

- **Chaudière** : pour produire de l'énergie calorifique, car le pouvoir calorifique des boues est intéressant. Il constitue ainsi une énergie renouvelable de qualité et peut être récupéré et valorisé de plusieurs façons.

L'utilisation du biogaz offre le meilleur rendement si l'extraction est continue et constante. Cette condition est nécessaire car la production de biogaz au niveau des stations d'épuration est continue et le stockage du biogaz n'est pas économiquement avantageux. Il est préférable que le point d'utilisation du biogaz soit relativement proche de la station où il est produit.

- **Cogénération** : L'utilisation la plus courante du biogaz est la production d'électricité. On utilise pour cela un moteur à combustion interne ou bien une turbine à gaz. Les moteurs à gaz peuvent être installés et déplacés rapidement et ont une haute flexibilité d'utilisation. Les turbines à gaz sont intéressantes pour la valorisation de la chaleur, elles permettent d'obtenir en plus de l'électricité de la chaleur utilisable pour la production de vapeur. Il est avantageux de ne pas utiliser que l'électricité mais aussi la chaleur que l'on peut récupérer au niveau du moteur ou de la turbine gaz.

- **La chaleur** ainsi produite, est en premier lieu utilisée pour maintenir le digesteur à sa température de consigne.

Des modes de valorisation de cette chaleur peuvent alors être recherchés :

- Séchage thermique des boues digérées.
- Conditionnement thermique des boues digérées, ce qui assure une forte siccité des boues après déshydratation.
- Utilisation externe de la chaleur : production d'eau chaude pour un utilisateur potentiel.
- Production de froid à partir de la chaleur (technologie encore peu développée).

L'électricité produite peut être :

- Consommée directement par la station.
- Ou revendue à centre de distribution d'électricité (CDE).
- Dans la STEP de Marrakech, l'électricité qui va être produite par méthanisation va être utilisée directement pour les besoins de la station.
- Si dans l'avenir, la station produit une quantité d'énergie qui dépasse les besoins des machines de la station, celle-ci peut être revendue aux CDE à des coûts intéressants.

Il est possible d'utiliser le biogaz pour d'autres applications :

- Combustible pour l'incinération des boues sur site, séchage thermique des boues.
- Production d'air comprimé par un groupe moto compresseur. Cet air est alors utilisé pour l'aération des bassins de la station (CBE, 2007).

III.2. Modes de valorisation non matures

Il existe également deux autres modes de valorisation du biogaz qui ne sont pas encore très matures :

- Utilisation du biogaz comme bio carburant pour véhicules.
- Injection du biogaz épuré dans un réseau de distribution de gaz naturel.

Ces modes de valorisation sont pour le moment utilisés à une échelle « pilote ».

La production d'énergie peut s'exprimer en fonction de la quantité de matières sèches entrante en digestion. Cette production énergétique sera différente selon le type de boues (mixtes, biologiques...).

IV. L'incinération

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

Les boues peuvent être incinérées sous diverses formes :

- **Incinération spécifique** : les boues à 20 – 30 % de siccité sont brûlées seules ou en mélange avec des graisses. A cette siccité, les boues ne sont généralement pas auto combustible. Il ne s'agit donc pas d'une valorisation énergétique. L'incinération spécifique est réservée à des stations de grande capacité (> 100 000 EH).

- **Coincinération avec les ordures**: La Coincinération peut s'effectuer avec des boues séchées (60 à 90 % de siccité) ou avec des boues pâteuses (20 – 25 % de siccité).

D'autres filière thermiques commencent à apparaître mais n'en sont encore qu'au stade de recherche et d'essais (cas des stations de traitement des eaux usées en France): L'incinération en cimenterie, l'oxydation par voie humique. L'incinération est souvent utilisée pour les stations des grandes agglomérations urbaines.

IV.1. L'incinération spécifique

Offre deux avantages essentiels:

- la réduction maximale du volume et de la masse des boues, par suite de la transformation des matières organiques par combustion en H₂O, CO₂, SO₂ ;
- la mise à disposition d'un produit stérile, réduit aux cendres constituées uniquement de matières minérales, représentant cependant environ 10 % de la masse initiale d'une boue de siccité 25 % à 60 % de matières organiques.

Il convient de noter que l'incinération n'est pratiquée généralement que sur des boues ayant déjà subi un premier stade de déshydratation poussé (par filtration ou centrifugation), car l'élimination d'une tonne d'eau est beaucoup moins chère par des procédés mécaniques que par évaporation.

Suivant la teneur en eau de la boue à brûler et la teneur en matières volatiles des matières sèches qui la constituent, les boues peuvent être auto combustible ou nécessiter, pour leur incinération, une chaleur d'appoint.

L'autonomie thermique de l'installation d'incinération dépend également de son rendement thermique proprement dit. Celui-ci est fonction du type de four, de l'importance de la récupération thermique sur les gaz chauds et de la désodorisation plus ou moins poussée des fumées.

IV.1.1. Fours d'incinération

Sur le plan technologique, les principaux fours utilisés pour l'incinération des boues urbaines sont : les fours à soles, à lits fluidisés et, à un degré moindre, les fours sécheurs rotatifs.

IV.1.1.1. Fours à soles étagées

Ce type de four, particulièrement bien adapté à l'incinération des boues urbaines, fournit des gaz de combustion peu chargés en cendres volantes. D'exploitation aisée et économique, son coût d'investissement est, par contre, relativement élevé ce qui ne le rend compétitif que pour l'incinération d'un tonnage élevé de boues, correspondant à des populations supérieures à 300 000 habitants.

IV.1.1.2. Fours à lits fluidisés

Le principe de fonctionnement de ces fours consiste à introduire les boues à incinérer dans un lit de matériaux auxiliaires (généralement du sable de quelques millimètres), porté à une température de 700 à 800 °C

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

Les fours à lits fluidisés, d'un coût d'investissement nettement inférieur aux fours à soles, sont particulièrement bien adaptés pour des installations moyennes (de 100 000 à 300 000 habitants).

IV.1.1.3. Fours tournants

Très répandus dans l'industrie, ils sont surtout utilisés lorsqu'on désire combiner, dans le même appareil (de forme cylindrique légèrement inclinée sur l'horizontale), le séchage et l'incinération des boues urbaines. Le four peut fonctionner soit en sécheur, soit en incinérateur. Le rendement thermique de ces unités, fonctionnant le plus souvent à contre-courant, est excellent (BOEGLIN, 2001).

IV.1.2. Conclusion

L'incinération, considérée à priori comme la solution radicale pour l'élimination des boues, se heurte au double problème des coûts d'investissement et d'exploitation, au renforcement des normes de pollution atmosphérique et certainement à terme au problème du devenir des résidus solides ultimes.

La protection de l'environnement exigera en particulier le respect de certaines normes pour les fumées rejetées à l'atmosphère.

IV.2. Coincincération avec les ordures

L'idée de profiter de fours d'incinération d'ordures, pour y traiter les boues de station d'épuration, peut paraître séduisante, si l'usine d'incinération d'ordures est à une distance raisonnable de la station d'épuration (STEP), ainsi que le transport des boues d'un site à l'autre n'augmente pas de façon exagérée les coûts d'exploitation de l'opération. Il faut, en outre, qu'il y ait un espace suffisant pour stocker les boues et mettre en place l'installation d'injection des boues dans le four.

La Coincincération permet de profiter du traitement des fumées en place et de rentabiliser ainsi l'usine d'incinération d'ordures.

Sur le plan technique, les boues peuvent être introduites dans un four d'ordures sous forme brute (pâteuse) après une déshydratation mécanique sur la STEP, ou sous forme de boues préséchées. Pour la Coincincération avec des boues séchées, il est nécessaire d'ajuster leur siccité à des teneurs > 65 % de matières sèches ; ainsi elles représentent un combustible voisin des ordures et on peut alors les injecter dans la trémie du four.

Le problème des boues brutes de consistance pâteuse est leur introduction et leur répartition dans le four (BOEGLIN, 2001).

V- Valorisation agronomique

La valorisation en agriculture est la réutilisation agricole par épandage des boues liquides, après compostage ou après séchage thermique sous forme de granulés (ALOE, 2003).

V-1- Épandage :

Les boues peuvent être épandues sous forme liquide (après épaissement préliminaire), soit sous forme plus ou moins déshydratée à l'état pâteux ou solide. Ce sont les boues liquides qui permettent la meilleure valorisation agronomique, dans la mesure où l'on peut les épandre facilement avec des matériels bien connus du type citerne à vidange ou à lisier.

De plus, elles permettent d'apporter au sol simultanément de la matière organique, de l'azote assez rapidement assimilable, du phosphore et des oligoéléments. Toutefois,

l'épandage liquide requiert des équipements de stockage importants et appropriés, ainsi que des terrains proches du lieu de production pour réduire les frais de transport.

Par opposition, les boues pâteuses (issues de filtres à bande presseuse ou de centrifugeuses) posent quelques problèmes pratiques tant pour le stockage que pour l'épandage proprement dit, mais elles permettent de réduire les coûts de transport. Les boues à l'état solide (lit de séchage, filtre-pressé) permettent un stockage en tas et sont épandables avec des épandeurs à fumier habituels. Les boues doivent être épandues selon la bonne pratique agricole, car les quantités de boues à apporter dépendent essentiellement des besoins du sol et des cultures.

Les risques d'épandage : L'épandage des boues d'épuration en agriculture est soumis à de stricts contrôles sanitaires et environnementaux, la limitation de l'épandage agricole peut provenir :

- des risques d'odeurs se dégageant de boues insuffisamment stabilisées ;
- des risques bactériologiques, qui ne doivent cependant pas être surestimés, car l'action microbienne du sol est importante.
- de la contamination des boues par des métaux lourds (Zn, Cd, Cu, Pb, Ni, etc.). Ce risque n'est à craindre que pour les boues des zones fortement urbanisées (ruissellement) et industrialisées.
- Sans négliger complètement les possibles obstacles d'ordre psychologique, le plus souvent, le manque de débouchés des boues organiques s'explique par des raisons d'hygiène publique et de distribution en terrain agricole et par le manque d'intérêt des cultivateurs pour un produit moins facile à utiliser et de moindre valeur par rapport aux engrais chimiques à forte teneur en azote et phosphore.

Pour pouvoir susciter l'intérêt des utilisateurs, il est indispensable de mettre ces boues sous une forme plus appropriée qui facilite leur mise en place.

Les boues sont généralement épandues sous quatre formes principales :

- Boues simplement déshydratées
- Boues déshydratées et chaulées
- Boues déshydratées et séchées
- Boues déshydratées et compostées.

Les grands axes de la réglementation concernant l'épandage des boues : Les boues sont considérées comme des déchets, le producteur de boues doit être responsable de la filière épandage et de son suivi, il a en charge :

- Une étude préalable systématique
- Un programme prévisionnel annuel d'épandage et un bilan annuel ;
- Une auto – surveillance de l'épandage, de la qualité des boues et des sols (un suivi qualitatif et sanitaire est indispensable);
- La constitution d'un dossier d'incidence, au titre de la loi sur l'eau ;
- La tenue d'un registre d'épandage (traçabilité).

Dans le cas de la station d'épuration, le suivi agronomique des boues sera confié à la RADEEMA, ce suivi doit comprendre :

- un avis préalable sur le programme annuel d'épandage ainsi que sur les modalités de suivi ;
- la surveillance de la bonne exécution du plan d'épandage ;
- la collecte de références sur la base d'analyse du sol et des récoltes.

Tableau 6. Teneurs limites en éléments traces métalliques (ETM) des boues
(DUDKOWSKI, 2000)

Elément traces métalliques (ETM)	Valeur limites (mg/Kg de MS)
Cd	20
Cr	1000
Cu	1000
Hg	10
Ni	200
Pb	800
Zn	3000

V-2-Compostage :

Ils constituent des solutions techniques très intéressantes à la condition indispensable évidemment d'avoir un marché payant couvrant les frais d'exploitation et d'amortissement de l'équipement complémentaire qui peut s'avérer coûteux.

Le compostage peut être appliqué sur des boues urbaines déshydratées, mais se pratique de préférence conjointement avec d'autres déchets organiques, soit des matériaux

secs carbonés (ordures ménagères, paille, sciures, écorces et déchets forestiers), soit des matériaux humides et azotés (matières de vidange, vinasses, lisiers, etc.).

Le compostage revient essentiellement à une décomposition aérobie thermophile des matières organiques grâce à l'activité de micro-organismes très divers.

Le mélange soumis au compostage doit avoir une humidité de 50 à 60 %, et doit être exempt de substances toxiques. La digestion thermophile engendre une élévation de température à 45-70 °C, qui détruit les germes pathogènes éventuellement présents dans les boues ; le compostage apporte donc un effet de stérilisation ou d'hygiénisation. Pour assurer une digestion continue, il faut recycler une fraction de la matière compostée.

La durée de compostage varie (entre 2-3 jours à 3 semaines) selon la nature des matières alimentées, l'intensité et la technologie du traitement.

Il faut prévoir une période de post digestion ou de maturation. Le pH doit être maintenu autour de 7 et les conditions aérobies sont à assurer par une aération appropriée.

Deux techniques de compostage sont utilisables :

- le compostage lent en tas sur air, avec retournement périodique des tas.
- le compostage accéléré en enceinte close, avec contrôle de la température, de l'humidité et de la composition de l'atmosphère ambiante (BOEGLIN, 2001).

V. 3. Potentialité des terrains agricoles à Marrakech

V.3.1. Projet SMAP

V.3.1.1. Objectif du Projet SMAP

Le projet pilote de lutte contre la désertification dans les régions arides avec l'implantation des communes agro-pastorales (qui concernent à la fois l'agriculture et l'élevage) en Afrique du Nord. S'inscrit dans le cadre du programme d'actions prioritaires à court et moyen terme pour l'environnement (SMAP).il est financé par la commission européenne au profit des population de la commune rurale d'*Oulad Dlim* et *M'Nabha* et mis en œuvre au Maroc par la direction provinciale de l'agriculture de Marrakech (DPA, 2006).

Il s'inscrit également dans le cadre de la stratégie du Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural dans le domaine de lutte contre la désertification et par conséquent concrétise la mise en œuvre du programme d'action national de lutte contre la désertification (PAN).

La population de la commune rurale *M'Nabha* limitrophe de la commune d'*Ouled Dlim* (voir la carte de la zone du projet), cette population qui, réalisant le grand intérêt que

revêt le projet SMAP et la pertinence des objectifs visés, n'a pas hésité à exprimer sa détermination à être un partenaire sur le même pied d'égalité que ses voisins. Cette détermination s'est traduite, au départ, par la mise à la disposition du projet de 300 ha de terrains de parcours collectifs, puis la prise en charge, par la suite, de plusieurs opérations relatives aux travaux d'amélioration pastorale à savoir l'application de la deuxième et la troisième irrigation et le gardiennage.

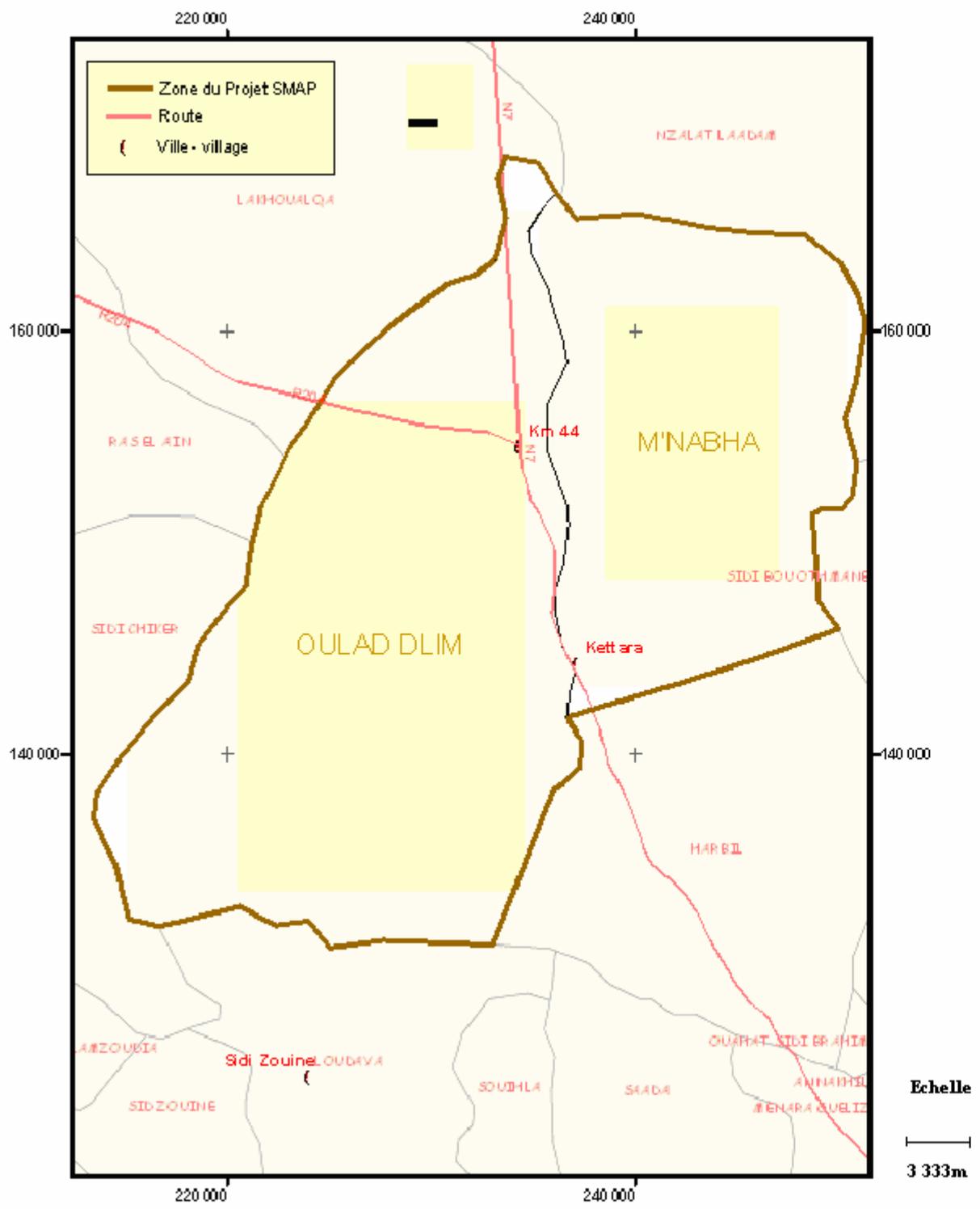


Figure 4 : Zone d'action du projet SMAP (DPA., 2006)

V.3.1.2. Résultats escomptes du projet SMAP :

Les résultats escomptés à l'achèvement du projet consistent en :

- La mise au point de méthodes et techniques de réhabilitation en vue d'augmenter la productivité des parcours dégradés en utilisant des plantes pérennes résistantes à la sécheresse et création d'une station locale de télédétection et SIG pour étudier les possibilités de généralisation de l'expérience sur une grande échelle.
- L'exécution d'actions directes de lutte contre les effets de la sécheresse dans les zones cibles visant à combattre l'érosion éolienne et hydrique et à augmenter la productivité des parcours.
- Le développement des capacités techniques des participants locaux et des planificateurs en matière d'exécution et de gestion des plantations d'arbustes fourragers.

-

V.3.2. La répartition des terrains agricole selon l'ORMVAH

La zone d'action de l'office du Haouz s'étend sur une superficie totale de 663.000Ha, limitée à L'Est par l'Oued El Abid, à l'ouest par le bassin du N'Fis, au sud par le piémont du haut atlas et au Nord par les oueds Tensift et Oum Rbiaa (Annexe 4).

Cette zone couvre :

- La WILLAYA DE MARRAKECH ou la zone de l'office s'étend sur une superficie de 227.000Ha et englobe :
 - La préfecture de Marrakech : 8communes rurales
 - La province d'AL HAOUZ : 11 communes rurales (Annexe 5).
- La province d'EL KELAA des Sraghna sur une superficie de 385.000 Ha (42 Communes rurales).
- La province d'Azilal sur une superficie de 1000Ha (commune Anzou).

Conclusion : On a des terrains et superficies de la culture où on peut épandre les boues et les utilisées comme fertilisant, la DPA distribue des Qx de semences d'orge et des Qx d'engrais de fond au profit des agriculteurs ayant mis leurs terrains à la disposition du projet SMAP.

La faisabilité de la valorisation agricole de ces boues, est possible vue le potentiel d'espace agricole disponible mais ses derniers doivent être adoptés aux normes d'épandage afin d'améliorer les sols et spécialement ceux de la région El' Haouz et aux plantations spécifiques à leurs concentrations en éléments chimiques.

TROISIEME PARTIE :
BOUES DE STATION:
ANALYSES ET COMPARAISON ENVIRONNEMENTAL ETECONOMIQUE DES TROIS FILIERES

Les quantités de boues de station d'épuration d'eaux usées vont croître d'ici 2030 conformément aux programmes de la région en matière d'eaux usées domestiques et industrielles. Il est donc nécessaire d'étudier les caractéristiques des boues de la station d'épuration des eaux usées de la ville de Marrakech, et estimer les coûts d'investissements et la rentabilité de chaque filière afin de choisir la destination finale la plus appropriée pour la régie.

Dans cette optique, les boues prélevées au niveau de la station au mois de mai 2009 ont fait l'objet des analyses agronomiques et énergétiques.

I. ANALYSES EFFECTUEES

I.1. Principe des analyses

Les échantillons prélevés ont fait l'objet des analyses suivantes

- Teneur en eau

C'est la quantité d'eau exprimée en pourcentage contenue dans un composé solide ou liquide. (cf. Mode opératoire annexe6)

- Matière sèche (MS)

C'est la quantité de matière résultante de la déshydratation. La concentration en MS permet de connaître la quantité de boue à traiter, quelque soit son niveau de concentration dans la filière de traitement. La détermination de la teneur en MS s'effectue à une température de 105°C dans une étuve ou par Infrarouge (cf. Mode opératoire annexe6).

- la siccité

La boue est essentiellement constituée d'eau et de matières sèches (MS). Le pourcentage d'eau représente l'humidité alors que le pourcentage de matière sèche est la siccité. Cette dernière est calculée ainsi :

$$\text{Siccité} = \text{MS} * 100 / \text{production de boues.}$$

La matière sèche et la production des boues sont exprimées en tonne (t).

Matière volatile sèche (MVS)

La MVS est déterminée après incinération de l'échantillon à une température de 550°C (cf. annexe 6) .Elle constitue la quantité de matière organique (MO) des boues.

Ce paramètre livre une indication sur le degré de stabilisation de la boue et son aptitude à divers traitements (déshydratation, incinération...). Plus le taux de MVS est faible, plus la boue est facile à épaissir ou à déshydrater, mais plus son exothermicité en incinération est faible. Il reste alors dans le creuset les sels minéraux sous forme de cendres.

- Azote total

Ce paramètre permet d'estimer les performances d'une étape ultérieure de traitement par voie thermique (incinération) ou biologique (digestion anaérobie avec production de biogaz, surtout valable pour les boues résiduaires urbaines).le dosage de l'azote total ou azote Kjeldhal est fait par la méthode de EVELDHAL (*cf.* annexe 6).

- Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI)

Le P.C.I a une importance primordiale en incinération. Il existe de nombreuses corrélations ou modes de son calcul. Mesuré généralement par un calorimètre.

- Analyses géochimiques et minéralogiques

Ces analyses portent essentiellement sur. les analyses ont été réalisées au sein du laboratoire de l'ORMVAH par différentes méthodes analytiques (Méthode OLSEN, Calcimétrie de BERNARD, Spectrométrie à flamme ...).

- Analyses chimiques en éléments traces - métalliques

Quelque soit la destination finale des boues, la connaissance des teneurs en éléments-traces métalliques est primordiale, surtout en cas de valorisation. Divers métaux – éléments traces (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn...) ont été analysés par absorption atomique au Centre de Recherche Reminex (Tableau 9).

I.2. Résultats et interprétation

Les tableaux suivants résument les résultats obtenus des analyses effectuées sur des échantillons de boues prélevés le 29 Mai 2009.

Tableau 7 : Résultats d'analyse de la valeur agronomique

Paramètre	Résultats
pH	7.8
Humidité	34.65 %
Matière sèche	65 ,35g/100g
Matière volatile sèche	79.77%
Matière organique	36,08%
Texture	sableuse
Siccité	65.35%
Capacité d'échange cationique	0
Conductivité	13mmho/cm (1/5)
Sels	41, 60g/kg

D'après les données du tableau on constate que ces boues sont relativement alcalines, très riche en matière organique (environ 80% du poids sec). Elles présentent une capacité d'échange cationique négative qui est un inconvénient quant à leur utilisation en agriculture. Le taux d'humidité des boues n'étant que d'environ un tiers de la totalité du poids total ne constituerait pas un problème surtout qu'on est dans un climat semi-aride caractérisée par de longues périodes d'ensoleillement.

Tableau 8 : Résultat d'analyses géochimiques et minéralogiques des boues de la STEP

CaCO ₃	5,8%
SiO ₂	23,08%
Al ₂ O ₃	5,84%
Fe ₂ O ₃	3,66%
CaO	14,97%
MgO	2,99%
K ₂ O Totale	1,18%
K ₂ O Echangeable	818,63 ppm
MnO	0,07%
TiO ₂	0,55%
P ₂ O ₅ Totale	0,01%
P ₂ O ₅ Assimilable	53,13 ppm
Azote (NTK)	0,42 ppm

A partir des données du tableau 8 on remarque que les boues résiduares sont très riches en Phosphore assimilable et total, Azote, et en Potassium. Ces boues sont convenables à des fins de fertilisation des sols en particulier ceux pauvre en éléments précités. En outre, le faible pourcentage en Carbonates (5%) limitera le colmatage et favorise l'infiltration des eaux destinées à l'irrigation. Cependant, l'utilisation de ces boues en tant que fertilisants doit être effectuée selon la nature et la demande des sols. Un contrôle de l'épandage est vivement souhaité.

Tableau 9 : Résultats des analyses des éléments traces - métalliques

Eléments en Traces- Métalliques	Résultats sur Matière séchée à 105 °C (ppm)	Normes et valeurs limites (ppm)
As	773	5 000
B	105	1 000
Ba	979	5 000
Be	2.2	-
Bi	<20	100
Cd	<2	20
Co	23	100
Cr	387	1 000
Cu	161	1 000
Ge	<10	500
Li	29	100
Mo	36	-
Nb	2	500
Ni	<17	200
Pb	479	800
Sb	45	100
Se	<40	-
Sn	61	100
Sr	289	5 000
W	<23	100
Y	12	-
Zn	792	3 000

Le tableau 9 résumant les données sur les éléments traces montre clairement que les teneurs en ces derniers ne dépassent jamais les valeurs limites considérées comme seuil de tolérance des sols. De ce fait, aucun risque de contamination n'est à craindre et que ces boues présentent une qualité meilleure.

Remarque : faute de temps, les analyses microbiologiques (germes pathogènes, virus, etc) n'ont pas été effectuées sur les boues prélevées. Il est donc vivement recommandé de les faire dans les prochaines études et investigation.

I.3. Résultats des analyses énergétiques

Valorisation énergétique et incinération

- Taux de cendres : 11%

Calcul PCI

- PCI_{Boues Humides} à S = 25% est de 526.315 Kcal /Kg ;

- PCI_{Boues sèches} à S = 90% est de 1894.73 Kcal /Kg ;

On considère que le PCI des boues à 90% est de : 2000 Kcal /Kg (pendant le calcul).

La valeur du pouvoir calorifique inférieur obtenue après analyses est moyennement intéressante, mais elle reste tout de même inférieure à celle du Charbon qui est de l'ordre de 5000 Kcal/Kg.

II. Etude économique de la faisabilité des trois destinations

Après les différentes analyses ainsi que les études environnementales réalisées, une approche économique paraît indispensable. Dans ce but, le tableau 9 a été réalisé pour être à la disposition des décideurs et des gestionnaires. Ce tableau résume les paramètres nécessaires pour les calculs des coûts d'exploitation.

Tableau 10 : Données des coûts d'exploitation relatives à la STEP de Marrakech

Production des Boues	180t/j
Siccité Boue	25%
Nombre de jours de fonctionnement	300j/an
Capacité de transport	12t
Distance décharge	7Km
Transport (Charges)	5Dh/Km
Nombre de voyages	15V/j
Coût de transport	1050Dh/j
Matière sèche	45t/j
Boue séchée à 90%	50t/jour

II.1. Dépenses et Exploitations

II.1.1. Incinération

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

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

II.1.2. Séchage

Investissement	50 000 000,00 DH
Amortissement	20ans
Exploitation	200 DH /t Boue humide incinérée
Charge annuelle	13 300 000,00 DH/an <i>(Y compris amortissement à DH-Constant)</i>
Siccité boues séchées	90%
Boues séchées	15 000t/an
Hypothèse	Valorisation totale du produit
Prix de vente théorique	887Dh/t

Le revenu annuel de la station est donc de l'ordre de 13 305000,00 Dhs (887 * 15 000), valeur comparable à la charge annuelle de la station (13 300 000,00 Dhs). Ces calculs montrent que l'installation thermique du séchage n'est pas rentable.

II.1.3. Valorisation agronomique

Le tableau suivant montre clairement la différence entre la mise en décharge gratuite et celle à 100Dhs/t à différentes quantités de boues extraites.

Tableau 5 : Comparatif entre la mise en décharge gratuite, et celle à 100Dhs/t

Prix de mise en décharge (Dhs/t)	Mise en décharge (Dhs/an)	Valorisation agricole à 25% des boues	Valorisation agricole à 50% des boues	Valorisation agricole à 75% des boues	Valorisation agricole à 80% des boues	Valorisation agricole à 90% des boues	Valorisation agricole à 95% des boues
0	315 000,00	236 250,00	157 500,00	78 750,00	63 000,00	31 500,00	15 750,00
100	5 715 000,00	4 286 250,00	2 857 500,00	1 428 750,00	1 143 000,00	571 500,00	285 750,00

En cas de mise en décharge des boues à 100Dhs/tonne, la valorisation agricole doit atteindre 95% pour qu'elle soit équivalente à la mise en décharge gratuite.

II.2. Conclusion générale

La valorisation par incinération ou par séchage ne sont pas justifié qu'a partir d'une mise en décharge à prix >200Dh/tonne

Pour des prix de mise en décharge à prix dépassant les 50Dh/t (contexte européen), l'incinération et le séchage deviennent comparable à la valorisation en agriculture.

D'une manière générale la valorisation agricole est la meilleure voie de valorisation des boues sur le plan économique, tant qu'il y a possibilité de valoriser plus que 50%

Selon les résultats obtenus après les analyses des boues, la filière de l'épandage agricole est satisfaisante pour les agriculteurs, pour les collectivités et pour la protection de l'environnement.

Il convient de la pérenniser par une amélioration continue de la qualité du produit et des pratiques d'épandage en respectant la quantité épandue selon la composition du sol /boue, et par une restauration de son image auprès du monde agricole.

Cette étude montre aussi que la mise en décharge des boues est le système le moins écologique pour l'environnement à cause des dégagements gazeux toxiques et à effets de serre et souvent en raison des jus qui peuvent percolés dans la nappe phréatique.

L'incinération est un procédé d'élimination dont le coût est élevé (installation thermique de grande dimensions dont l'investissement est très coûteux).son bilan écologique n'est pas intéressant car il est essentiellement affectés par les transport routiers.

Par ailleurs, les incinérateurs sont souvent responsables de pollution atmosphérique.

BIBLIOGRAPHIE

- ALOE J., (2003) -Stage d'ingénieurs Méthanisation des boues de station d'épuration- Potentiel Réunionnais, 54 p..
- EL ARABI B., (2008) - Etude d'impact d'une station d'épuration à système intensif sur l'environnement et potentialités de réutilisation des eaux épurées, Exemple de la station des eaux usées (boues activées) de la ville de Marrakech. Mémoire de Master, Université Cadi Ayyad, FSSM, 73 p..
- RADEEMA, (2007) - Réalisation des études de schéma directeur d'assainissement liquide de la ville de Marrakech. Mission -A- : Investigations préliminaires, 400 p..
- SATIN M. et BECHIR S., (1999) -Guide technique de l'assainissement « Le Moniteur » 2^{ème} édition, 354 p..
- GUERRAOUI D. (1995) - Essai de dépollution d'un sol pollué par les eaux usées domestiques : Cas de la zone d'épandage des eaux usées de Marrakech. Thèse de 3ème Cycle, Fac. Sc. Semlalia, Univ. Cadi Ayyad, Marrakech, FSSM, 87 p..
- OUAZANI R., (2009) – Les boues des stations d'épuration. Cours Master I, Inge. de Manage. et Assaini., Université Cadi Ayad, FSSM, 26 p..
- BOEGLIN J.Cl., (2001) – Traitements et destinations finales des boues résiduelles ingénieur chimiste. Thèse d'Inge., IPI, Colmar, 26 p..
- RAZOKI B., (2001) - Mise en place d'un Système de Gestion de Bases de Données (SGBD) pour la gestion des eaux souterraines de la plaine du Haouz. Thèse de Doctorat, Fac. Sc. Semlalia, Université Cadi Ayad, FSSM, Marrakech, 45 p..
- MAUDOU M., (1999) - Séchage de boues : quelles solutions ?, 74 p..

- CHARREAU A. et CAVAILLE R., (1998) - Séchage appareillage et choix d'un procédé, 16 p..
- Club Crin (2000) - Que faire des boues ? une approche socio-économique du club environnement et société, 66 p..
- Anonyme, (2007) – Etude de biogaz de décharge, CBE (Centro da Biomassa para a Energia), Ed, Colomiers, 12 p..
- DPA (Direction Provinciale d'Agriculture) (2006) – Programme d'action prioritaire à court et à moyen terme pour l'environnement (SMAP), Rapport d'activité Septembre (2005)-Août (2006) et Plan de travail Septembre 2006-Avril 2007, 48 p..
- DUDKOWSKI A., (2000) – l'épandage agricole des boues de stations d'épuration des eaux usées urbaines INRA-ME&S, 145p..

Sites web consultés:

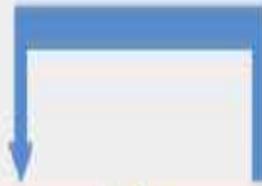
- <http://www.cieau.com>
- <http://www.wikipédia.com>
- <http://pravarini.free.fr/BouesEP.htm#Caractéristiques>

Annexe

Ligne de traitement des eaux

100'000 m³/j

Recirculation des boues



Prétraitement
physique

Décanation
Primaire

Activation
bactérienne

Décanation
Secondaire

Filtration
Rapide

Désinfection

Dégrillage
Dessablage
Deshuilage

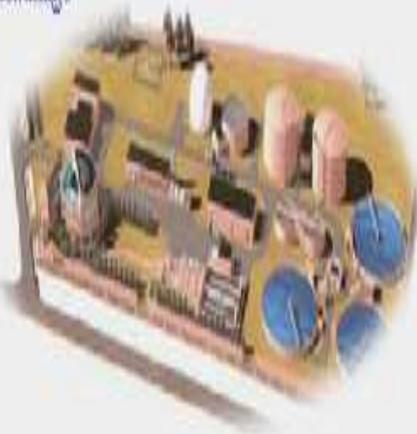
3 Décanateurs gravitaires
Circulaires

4 Bassins d'aération flux
piston

4 Décanateurs
circulaires

Filtres rapides

Canal UV



Annexe 1 : Schéma descriptif De la ligne du traitement des eaux de la station d'épuration de la ville de Marrakech

**STATION D'EPURATION DE LA VILLE DE MARRAKECH
Première tranche**

SCHEMA DU TRAITEMENT DES EAUX

- Déchets
- Sables
- Graisses
- Retour en tête

1 - DEVERSOIR DE BY-PASS

Longueur du déversoir : 2.5 m

2 - FOSSE A BATARD

Volume : 4.5 m³

3 - PRE-DEGRILLAGE

Ecartement des barreaux : 100 mm
Largeur du canal : 3 m

4 - DEGRILLAGE

4 unités dont 1 manuelle
Ecartement des barreaux : 80 mm
Largeur du canal : 1.5 m
1 vis d'évacuation des déchets

5 - TAMISAGE

4 unités dont 1 manuelle
Ecartement des barreaux : 10 mm
1 vis d'évacuation des déchets

6 - DESSABLAGE-DESHUILAGE

2 unités doubles
1 pont par unité double
Surface totale : 400 m²
Volume total : 1 200 m³
Diffuseurs d'aération graisses bulles : 344 unités au total
Nombre de surpresseurs : 3 unités de 1 200 Nm³/h unitaires

7 - TRAITEMENT DES SABLES

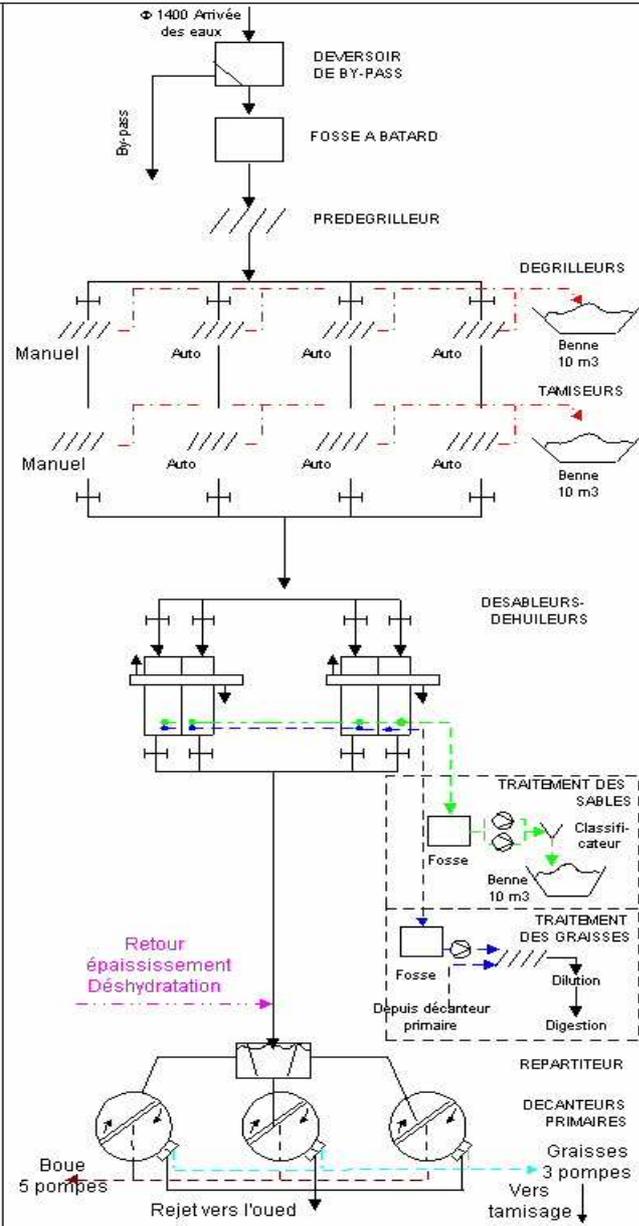
Pompes embarquées : 4 unités de 20 m³/h
1 fosse de stockage
2 pompes de 80 m³/h
1 classificateur de 80 m³/h

8 - TRAITEMENT DES GRAISSES

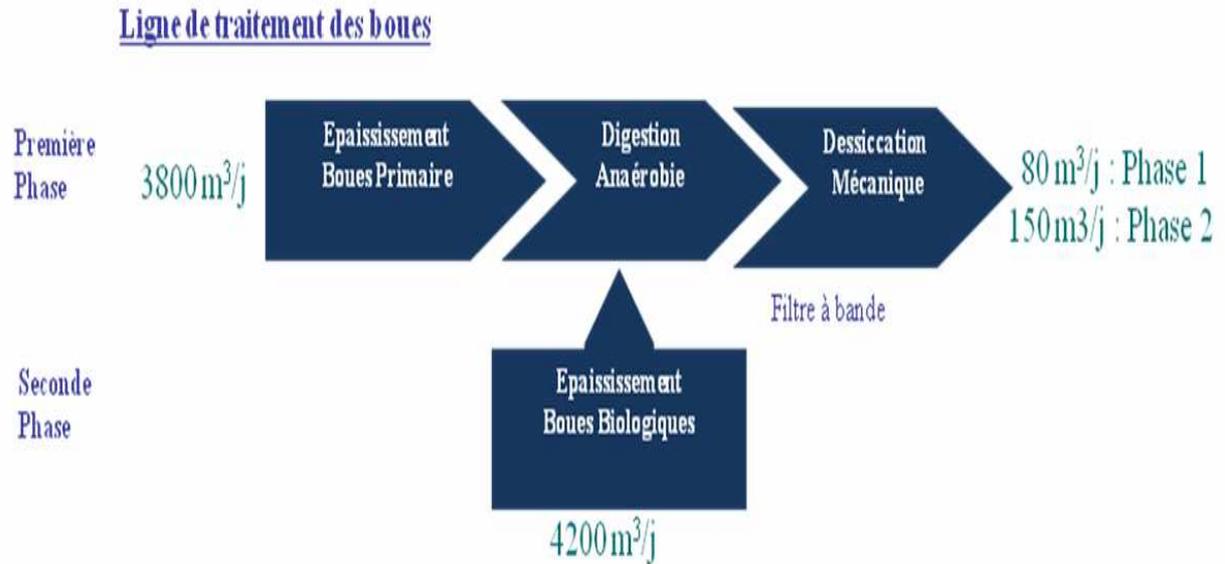
1 pompe de 2 m³/h
1 tamisage
1 concentrateur

9 - DECANTATION PRIMAIRE

Ouvrage de répartition
3 décanteurs de 39 m de diamètre
Surface totale : 3 585 m²
Volume total : 3 971 m³
3 ponts racleur type P2R
5 pompes à boues



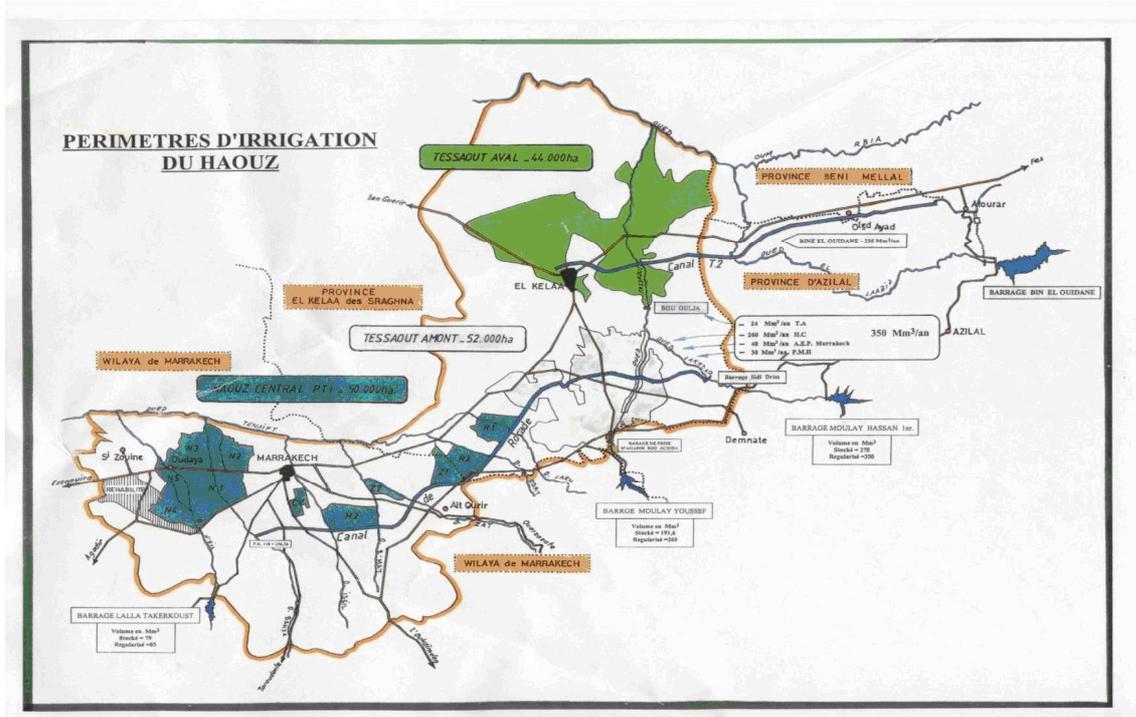
Annexe 2 : Schéma de traitement des eaux de la première tranche.



Annexe 3 : Schéma descriptif de la ligne du traitement des boues de la station d'épuration de la ville de Marrakech

<p>Les ressources en terres considérables</p> <p><u>Superficie agricole utile</u> : 473 000ha</p> <p>Irriguée : 273 000Ha</p> <p>Grande hydraulique : 144600ha</p> <p>Petite et moyenne hydraulique : 128 400ha</p> <p>Bourg : 200 000ha</p> <p><u>Divers</u> : 190 000ha</p> <p>Foret : 23 200ha</p> <p>Parcours : 103 700ha</p> <p>Inculte : 63 100 ha</p> <p>Superficie totale : 663 000ha</p>

Annexe 4 : Répartition des terrains agricole dans la région El'Haouz selon l'ORMVAH



Annexe 5 : Caractéristique de l'agriculture dans la région el Haouz

Annexe 6 : Mode opératoire
Laboratoire de géo ressources FSTG
Laboratoire de pédologie ORMVAH
REMINEX

- Échantillon : boue de La station d'épuration de Marrakech
- Jour et heure de prélèvement : 29 /05/2009 à 10h
- Arrivée au labo : 12H25

Calcul MS ET MVS

- Teneur en eau : c'est la quantité d'eau exprimée en pourcentage contenue dans un composé solide ou liquide
- Matière sèche: il s'agit du produit résultant de la déshydratation (élimination de l'eau) d'un composé solide ou liquide en l'exprime en g/100g pour un produit solide.

Détermination de MS

Méthode :

- On a pris 6 échantillons de boues
- Peser les creusets : **masse m_1**

- Déposer le produit à analyser et peser le creuset plein : **masse m_2**



Fig. 1 : Boues avant séchage

- Placer le creuset au four à 105°C pendant 4 heures.



Fig. 2: étuve de 105°C

- Laisser refroidir dans un dessiccateur (préserve le produit déshydraté de l'humidité).
- Peser après déshydratation le creuset : **masse m_2** ,



Fig..3 : Dessiccateur

Tableau 1 : les résultats de séchage des boues à l'étuve de 105°C

Nombre d'échantillons	Pèse tare	boue+pèse tare avant séchage	boue+pèse tare après séchage	masse de la boue avant séchage	masse de la boue après séchage	la teneur d'eau dégagée
1	29,72	79,72	64,87	50	35	15
2	30,29	80,29	61,44	50	31,15	18,85
3	27,37	77,37	63,22	50	35,85	14,15
4	53,2	103,2	81,34	50	28,14	21,86
5	40,97	90,97	73,33	50	32,36	17,64
6	32	82	65,56	50	33,56	16,44
<i>Total</i>				300	196,06	103,94

(La masse en gramme)

Calcul de la siccité

Déterminer par la relation suivante :

$$\text{Production de boues (t)} = \text{MS (t)} * 100 / \text{Siccité (\%)}$$

$$\text{Siccité} = \text{MS (t)} * 100 / \text{production de boues}$$

Avec :

Siccité (S) : mesure de la matière sèche dans les boues.

$$S = (M2 * 100) / M1$$

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

M2 : masse du même échantillon après séchage à 105°C jusqu'à obtenir une masse constante.

Résultats : **Siccité=65,35%**

Détermination de MVS

Principe

- La matière sèche obtenue après déshydratation d'un produit est composée de substances minérales (calcium, magnésium, chlorures...), mais aussi de substances organiques (glucides, lipides, protides, acides nucléiques). Il s'agit de molécules complexes constituées majoritairement des éléments C, H, O et N.
- Un chauffage puissant au four à 550°C permet la destruction et l'élimination totale des matières organiques qui se trouvent totalement dégradées en matières minérales qui s'échappent du creuset sous forme gazeuse, c'est la **minéralisation** :



Il reste alors dans le creuset les sels minéraux sous forme de cendres.

-Placer le creuset contenant la matière sèche au four à 550°C pendant 4 heures.



Fig. 4: four de 550°C



Fig. 5 : Creusets après minéralisation

-Refroidir au dessiccateur.

-Peser le creuset contenant les cendres.

Tableau 2 : les résultats après minéralisation des boues (four de 550°C)

Nombre d'échantillons	Pèse tare	boue+pèse tare avant séchage	boue+pèse tare après séchage	masse de la boue avant séchage (Ms)	masse de la boue après séchage (MM)	MVS
1	15,6	30,6	19,32	15	4,32	11,28
2	15,64	30,64	19,25	15	4,25	11,39
3	15,55	30,55	18,98	15	3,98	11,57
4	15,59	30,59	18,16	15	3,16	12,43
5	16,36	31,36	19,27	15	4,27	12,09
6	16,27	31,27	18,23	15	3,23	13,04
<i>Total</i>				90	23,21	66,79

$$\text{MVS} = \text{MS} - \text{MM}$$

Avec MVS : matière volatile sèche

MM : matière minérale

MS : matière sèche

Calcul du %de Ca CO 3

- Dosage de l'échantillon par le Calcimètre de Bernard

Le calcimètre est un appareil destiné à la détermination de la teneur d'un échantillon en carbonate de calcium. L'analyse est basée sur la mesure du volume de gaz carbonique dégagé. Par la décomposition d'une quantité connue d'échantillon avec l'acide chlorhydrique concentré. Aux conditions de l'expérience le gaz carbonique peut être assimilé à un gaz parfait.

Le volume du gaz dégagé est mesuré dans une burette graduée, au moyen d'un niveau liquide mobile constitué par de l'eau acidifiée et teintée (figure VI).

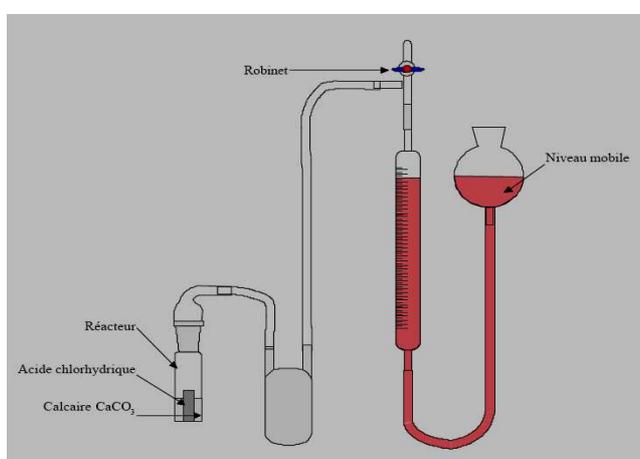


Fig. 6 : Calcimètre de Bernard

La mise en contact d'une boue avec de l'acide chlorhydrique, permet un dégagement de CO₂. Donc, on mesure la quantité de carbonates contenus dans l'échantillon par la relation suivante :

$$\% \text{ CaCO}_3 = K V / m = (V_f - V_i / m) * 0,432$$

$$K = 0,432 \text{ et } V = V_f - V_i$$

m : masse de l'échantillon



Fig.7 : Etapes de mesure de CaCO3

On n'a pris deux types d'échantillons

1- échantillon de 105°C

2- Echantillon de 550°C

Tableau 3 : Résultats de mesure de CaCO₃ sur les deux échantillons

<i>Nom d'échantillon</i>	<i>Masse (g)</i>	<i>Vi</i>	<i>Vf</i>	<i>%caco3</i>
à 105°C	0,25	32	35	5,18
	0,5	32,5	40	6,48
à 550°C	0,25	32,5	41	14,75
	0,5	32,5	50	15,12

Intérêt

- La teneur en calcaire total apporte des informations sur le pH.
- L'alimentation de la plante (réserves de calcium)
- La structure possible

Interprétation

Si le % est Inférieure ou égale à 5% : sol peu calcaire

Si le % est Supérieure à 30% : sol très calcaire

Granulométrie

Tamissage : On pèse 17g de l'échantillon calciné (que de la matière minérale), et on a fixé l'amplitude de l'appareil sur 7,5 pendant 15min.

Tableau 4 : les résultats de tamisage de boues de 550°C

diamètre des tamis	poids total	poids papier	poids final
<0,05	2,5	1,47	1,11
0,05	3,325	1,532	1,79
0,063	2,31	1,686	0,624
0,1	3,103	1,436	1,667
0,125	3,3	1,46	1,84
0,16	2,611	1,778	0,833
0,2	5,59	1,777	3,813
0,4	3,081	1,661	1,42
0,5	5,276	1,587	3,689

Granulométrie manuelle de l'échantillon

-il y'a Que des sables grossier et fins (on peut pas déterminer s'il y'a du limons parce la mauvaise odeur des boue domine et les argiles n'existent pas puisque en mélangeant les boues avec de l'eau l'échantillon ne colle pas).

Texture

-Sableuse

Mesure de PH

Méthode

-Peser sur la balance à plateau 10g de la boue séchée à 105°C, qu'on met dans un bêcher de 50 ml à forme haute.

-Ajouter 25ml d'eau distillé.

-Laisser en contact 4 heures en agitant de temps en temps avec une baguette de verre.

-Au moment de prendre la mesure, agiter énergiquement pendant quelques minutes à l'aide de l'agitateur magnétique.

-Après étalonnage de ph-mètre, introduire avec précaution l'électrode de verre dans la suspension, avec l'agitateur en marche.

-Lire le pH lorsque l'aiguille du pH mètre s'est stabilisée, dans la plupart des boues cette stabilisation est réalisée dès la première minute.

-Rincer soigneusement l'électrode après la mesure, bien l'essuyer à l'aide du papier Joseph.

Matériel utilisé

-Baguette de verre pour agiter

-Agitateur magnétique et 2 barreaux aimantés

-pH mètre



Fig. 8 : pH mètre

-Solution d'étalonnage Ph=7 et Ph=9



Fig. 9 : Solution étalon PH7 et PH 9

-Résultats d'analyse de pH

Laboratoire chimie FSTG	Laboratoire de pédologie ORMVAH
7,8	

Conductivité

-La conductivité spécifique ou conductivité est l'inverse de la résistance d'une colonne d'eau compris entre deux électrode de 1 et 2 de surface, et distant l'une de l'autre de 1Cm²de surface, et distant l'une de l'autre de 1Cm.cette conductivité s'exprime en siemens ou mieux en micro siemens.

-Elle permet d'obtenir rapidement une estimation de la teneur en sels dissous ; elle ne s'applique qu'aux terres salées et aux terres à taux de fertilisation très élevé.

Matériel

-Conductimètre



Fig. 10 : conductiviomètre

- Becher 50ml forme haute
- Thermomètre précis 1/10 de °C (tenir compte de la température de la solution pour le calcul)
- Agitateur



Fig. 11 : Agitateur mécanique

Méthode

- 0,1g de boue séché à 105°C
- 10ml d'eau distillé
- Agiter pendant 20min
- Calibration conductiviomètre



Fig. 12 : Solution de calibration de conductiviomètre

La solution de calibration est une solution normale de KCl préparée à partir de 74,59g de KCl dans un litre d'eau distillé (valeur en microsiemens/cm ou micromhos/cm)

Tableau 5 : tableau de calibration de l'appareil de conductivité

<i>Température (°C)</i>	<i>1N</i>	<i>0,1N</i>	<i>0,01N</i>
0	65,41	7,15	0,776
5	74,54	8,22	0,896
10	83,19	9,33	1,02
15	92,52	10,48	1,147
16	94,41	10,72	1,173
17	96,31	10,95	1,119
18	98,22	11,19	1,225
19	100,14	11,43	1,251
20	102,07	11,67	1,278
21	104	11,91	1,305
22	105,94	12,15	1,332
23	107,89	12,39	1,359
24	109,84	12,64	1,386
25	111,8	12,88	1,413
26	113,77	13,13	1,44
27	115,74	13,37	1,467
28	-	13,62	1,494
29	-	13,87	1,521
30	-	14,12	1,548

K=13mmho/cm

Sel (g/kg) = 41, 60

Calcul de la matière organique

Méthode :

- 0,1g de boue séché à 105°C ;
- 10ml de bichromates de potassium ;
- 20ml de H₂SO₄ ;
- le tout est mis dans la haute pendant 30 min, on le laisse décanter après avoir arrêté la réaction on ajoutant de l'eau distillé (15min) puis dosage : (dans un erlenmyer on met 25ml de la solution préparée +cuillère de la FAO+ quelques gouttes de phénophtaléine dans la burette on met le Cl) V_{Cl}=1,9ml.

Résultats :

Formule : $\%MO (g) = (P \text{ sec} - P f) * 100 / P \text{ sec}$	Laboratoire de pédologie ORMVAH
31,64%	36,08%

Avec :

P sec : poids de l'échantillon à 105°C = 15g.

Pf : poids final de l'échantillon à 550 °C = 15 - 3,27 = 11,28g.

Dosage du potassium par spectrophotométrie de flamme

La spectrophotométrie de flamme est l'un des procédés rapides pour doser les éléments alcalins tels Na⁺ et K⁺. elle est basée sur le principe qu'un sel métallique passé dans une flamme s'ionise et émet une lumière d'une longueur d'onde caractéristique.

La solution à analyser est aspirée et, à l'aide d'un dispositif spécial transformé en aérosol (petites gouttelettes d'un diamètre de 20µ à 30 µ) qui est introduit dans flamme de propane enrichie d'air sous pression.

Les molécules et atome neutres vaporisées sont excités par l'énergie thermique de la flamme : on a ainsi une augmentation de l'énergie interne des molécules. Du niveau énergétique excité, les molécules et atomes retournent à leur état f forme fondamental en émettant une énergie thermique absorbée sous forme de radiation électromagnétique.

L'émission des atomes alcalins et alcalino-terreux excités dans une flamme donne lieu en général à une raie caractéristique d'intensité prédominante. La raie principale de chaque atome est celle qui est utilisée pour la spectrophotométrie de flamme



Fig. 13 : spectromètre à flamme

Avec un filtre, on élimine les raies de fréquences diverses et l'intensité de la radiation monochromatique caractéristique de la raie principale est mesuré par un système « détecteur photo- électrique – galvanomètre.

Pour pouvoir obtenir la concentration de l'échantillon à partir du déplacement du spot, il faut étalonner avec des solutions connues et tracer la courbe d'étalonnage.

Méthode



Fig. 14 : solution étalon

Courbe d'étalonnage (sur ordinateur dans l'office).

Dilutions

Voir mesure des cations échangeables et de la capacité d'échange.

Calcul

La lecture de la courbe donne directement les concentrations en meq/litre.

Eaux : mg Na^+ par litre = $\text{meq Na}^+/\text{litre} \times 23$

mg K^+ par litre = $\text{meq K}^+/\text{litre} \times 39$

Extrait de pâte saturée : on multiplie les meq/litre par le rapport de dilution RD.

Références :

Notion du photomètre Elvi.

Dosage potasse

Méthode :

-5g de matière sèche 105°C

-Acétate d'alumine 50ml

-Agiter 2h

-filtrer avec du papier filtre mis sur un entonnoir déposer sur une fiole jaugée



Fig. 15: filtration de la solution potasse

-L'appareil utilisé est un photomètre à flamme

- Tableau 6 : Etalonnage de l'appareil avec : 5 ,10 ,15 ,20 (K+)

5ppm	24
10ppm	45
15ppm	65
20ppm	84
25ppm	100

La valeur obtenue par le spectromètre à flamme est 209ppm on fait une dilution de 1/10 (10ml de la solution de potasse et remplir le reste de la jauge par de l'eau distillé jusqu'au trait)

Dilution de (1 /10) → 32ppm

K2O échang. = 818 ,63ppm

Dosage de l'azote total

Méthode EVELDAHL

Principe : la méthode retenue utilise Kjeldhal, sans prétraitement pour inclure les nitrates et les nitrites ; de cette façon, on considère d'une façon schématique d'une bonne approximation de l'azote total est donné par la somme :

Azote organique +azote ammoniacal ;

La matière organique est minéralisée (on dit encore attaquée)par H₂SO₄ ,à chaud .alors que le carbone et l'hydrogène se dégagent à l'état de CO₂ et H₂O ,L'azote est transformé en ammoniacque et fixé sous forme d'ion NH₄⁺ par H₂SO₄.

L'ammonium est ensuite déplacé par la soude, et l'ammoniacque forte est distillé et fixé dans l'acide borique à l'état de borate, lui-même dosé par HCl titré.

Intérêt :

Donne des informations sur les réserves en azote.

Avec le carbone organique, on fait le rapport C/N qui renseigne sur la dynamique de la matière organique et la nature de l'humus.

Appareillage :

Balance d'analyse précise à 0,001g

Rampe d'attaque et distillation Gerhardt

Natras de 800ml

Erelnmeyer de 250ml
Burette de 10 ML au 1 /20
Pipette de 25ml
Eprouvette de 20 et 50ml
Billes de verre Φ 0,5mm

Dosage du phosphore assimilable

Le phosphore est un élément fertilisant important. Son analyse a pour but de déterminer la fraction de P facilement assimilable par les plantes. Plusieurs méthodes ont été proposées.

-Méthode Barbier-Morgan

-Méthode Truog

-Méthode Olsen

-Méthode Duchauffour

On retiendra momentanément la méthode Olsen en tenant compte plus particulièrement des sols neutres et calcaires.

Extraction :

1-Matériel :

Erelnmeyer de 100 ,250ml
Entonnoir +filtre Wahatman n°40
Agitateur va et vient
Pipette de 100ml

2-Réactifs :

NaHCO₃ 0,5N à Ph8 ,5(ajuster avec NaOH 1N) soit 42,01g par litre

Charbon actif

3-Mode opératoire :

-Peser environ 5g (poids p) dans un erlenmyer de 250ml avec 100 ml de NaHCO₃, ajouter 1cuilliére de charbon actif, boucher et agiter mécaniquement 30minutes. Filtrer en maintenant en suspension le charbon (la solution doit être limpide sinon augmenter la quantité de charbon actif).

-Colorimétrie :

En présence de molybdate, il y'a compléxation de P.C complexe est réduit par l'acide ascorbique en développant une couleur bleue.

-Matériels :

-Fiole jaugées 1000,100 et 50ml

-Burette 50ml

-Pipette 1,2, 5,10 ml

-Spectrophotomètre+cuve 10mm

Réactifs :

-Solution mère de P à 100ppm :0,4393g de KH_2PO_4 (séché à 105°C) dans 1000ml H_2O .Ajouter 1 à2 gouttes de toluène et conserver au frigo.

-solution fille de P à 1ppm : diluer 10ml de solution mère dans 1000ml H_2O .

-Molybdate d'ammonium :20 ml de molybdate dans 300ml H_2O ,ajouter doucement 450ml d' H_2SO_4 (10N) puis 100ml d'une solution d'antimoine potassium tartrate à 0,5% compléter à 1000ml avec H_2O et conserver à l'abri de la lumière.

-Acide ascorbique : au moment de l'emploi dissoudre 1,5g d'acide ascorbique dans 100ml de molybdate d' NH_4 préparé ci-dessus.

Gamme étalon :

Dans des fioles jaugées de 50ml, distribuer :

Tableau 7 : Gamme d'étalonnage

K₂HPO₄	ppm	H₂O (ml)	acide ascorbique	solution	total
0ml	0	9	1	1	10
0,5	0,005	8,5	1	1	10
1	0,1	8	1	1	10
1,5	0,15	7,5	1	1	10
2	0,2	7	1	1	10
3	0,3	6	1	1	10
4	0,4	5	1	1	10

Echantillons :

Dans des fioles jaugées de 50ml, introduire des aliquotes (1à5ml) des filtrats obtenus après extraction.

(Faire un témoin avec un même volume de Na HCO_3), il servira à ajuster le 0 optique pour les échantillons).ajouter 5ml d'acide ascorbique et 30 ml d' H_2O).

-agiter de temps en temps jusqu'à dégagement complet de CO₂. compléter à 50ml avec H₂O et mesurer la D .O.30 min après l'adition de l'acide ascorbique.

Longueur d'onde utilisée : 882nm

Résultats :

Après calcul de la droite d'étalonnage, calculer et exprimer les résultats en ppm de P.

$$P_2O_5 \% = (n * 11,25) / PV$$

n : la concentration de P en mg/l dans la solution photo métrée

P : prise d'essai en grammes.

V : prise d'essai en ml de la solution initial étendue à 50ml

Remarque :

A/le filtrat d'extraction doit être conservé dans des fioles ;

B/la température d'extraction influence la quantité de P en solution. Il faut donc travailler à température constante pour standardiser les résultats.

Capacité d'échange cationique

Principe

La capacité d'échange cationique d'une argile représente la quantité de cations que l'on peut fixer à sa surface. Elle s'exprime en milliéquivalents pour 100g de matière sèche.

La fixation de cations est due à l'existence de charges superficielles négatives .dans les phyllosilicates, elles ont pour origine :

- Les substitutions iso morphiques dans la structure ,sans respect de la valence, Al³⁺ remplace Si⁴⁺ en position tétraédrique, ou bien Mg²⁺ et Fe²⁺ qui remplacent Al³⁺ en position octaédrique. Cette CEC d'origine structurale est constante et ne dépend pas du pH.
- Les phénomènes de bordure : sur les faces latérales ou après broyage, les valences situées dans les plans hk0 ne sont plus saturés en solution elles réagissent avec les molécules d'eau pour donner des sites amphotères.
- Cette CEC, portée par les faces latérales dépend du pH : Le Pk des groupes superficiels = SiOH est inférieur à 5 (CASES et al, 1986) aussi, les sites tétraédriques sont totalement dissociés à pH 7 .par contre, les sites =AlOH ne sont pas dissociés avant pH 6 .la densité des sites hydroxydes dépend des faces de clivage.
- Pour les différents types d'argile, les ordres de grandeur de la CEC(en méq/100g)sont les suivants(BARDON,1983) :kaolinite 3 à15 ,Illite :10à40,chlorite :30 à 60, Sméctite :80à120.

Méthode expérimentale :

La mesure de la CEC a été opérée par déplacement des cations échangeables par l'ion cobalthiexamine ($\text{Co}(\text{NH}_3)_6^{3+}$) qui donne des solutions de couleur orangée. Le pH des solutions est de 5,5 environ. Différentes méthodes de mesure de la CEC existent. Cette méthode a été choisie du fait de sa simplicité et de sa rapidité et aussi parce qu'elle est peu influencée par la présence des matières organiques, suite au faible pH de la réaction d'échange (FALLAVIER et al, 1985). La méthode a été initialement décrite par REMY et ORSINI (1976). On utilise une solution 0,05M en ion cobalthiexamine (4,458 g/l de réactif ($\text{Co}(\text{NH}_3)_6\text{Cl}_3$)). La quantité d'argile introduite (2g dans 30 ml de solution pour notre étude) est telle que la charge apportée par l'argile soit comprise entre un dixième et un tiers de la charge apportée par la solution. L'argile et la solution sont agitées ensemble pendant 2 heures puis centrifugées (la réalisation d'une isotherme complète a permis de vérifier que l'équilibre était atteint). L'ion cobalthiexamine dans le surnageant est dosé au laboratoire par colorimètre (bande d'absorption du cobalt à 473nm) à l'aide d'un spectrophotomètre Shimadzu UV2010, en se référant à une droite d'étalonnage établie à partir de solutions étalons. Ce qui permet de calculer la CEC.

$$(\text{Co}(\text{NH}_3)_6)\text{Cl}_3: M = 267,48\text{g}$$

$$C = 5 \cdot 10^{-2} M = n/V \cdot 10^{-3} = m/M \cdot V \cdot 10^{-3}$$

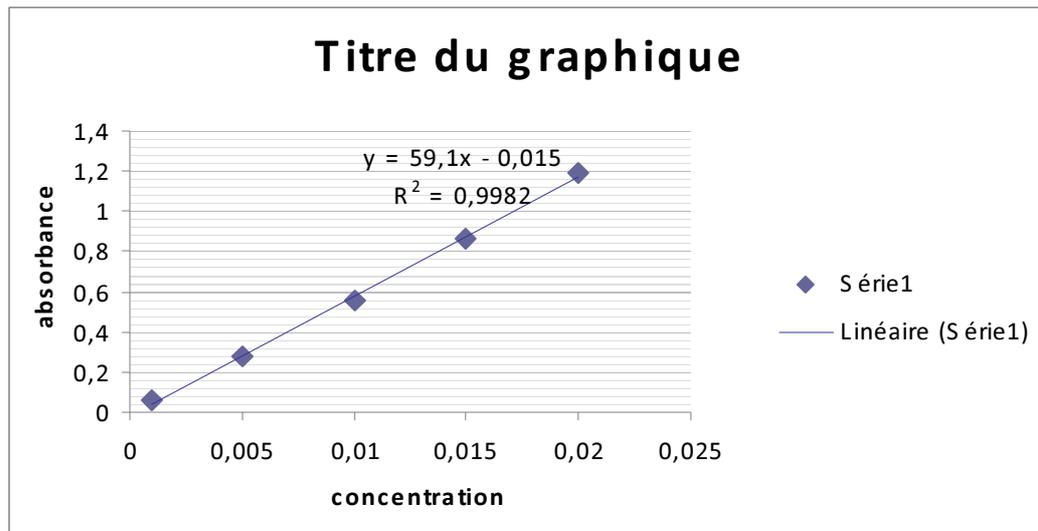
$$M = C \cdot M \cdot V \cdot 10^{-3}$$

$$M = 5 \cdot 10^{-2} \cdot 267,48 \cdot 30 \cdot 10^{-3}$$

$$= 40122 \cdot 10^{-5} = 0,4\text{g} = 400\text{mg}$$

- masse échantillon=0,5g
- cobalthiexamine =100mg
- 7,5ml d'eau distillé
- Centrifugation
- Puis on récupère le surnageant et on le met dans un spectrophotomètre à flamme.

Courbe d'étalonnage :



DO = 0,280 (dilution 1 /10)

Selon l'équation suivante on déduit $Cr \rightarrow Y = 59,1 X - 0,015$

$Cr = X = 0,0049$

$C0 = 10^{-5}$

$CEC = 10^{-5} - 0,0049$

$CEC = -0,0048 = 0$ Donc il n'y'a pas d'échange entre les grains de sable constituant essentiellement la texture des boues.

Annexe 7 : Etude économique des investissements et différents prix de mise en décharge

Les Coûts de chaque filière de valorisation :

Prix de mise en décharge	Mise en décharge	Valorisation agricole 25% Boues	Valorisation agricole 50% Boues	Valorisation agricole 75% Boues	Valorisation agricole 80% Boues	Valorisation agricole 90% Boues	Valorisation agricole 95% Boues
DH/T	DH/an	DH/an	DH/an	DH/an	DH/an	DH/an	DH/an
0	315 000,00	236 250,00	157 500,00	78 750,00	63 000,00	31 500,00	15 750,00
50	3 015 000,00	2 261 250,00	1 507 500,00	753 750,00	603 000,00	301 500,00	150 750,00
100	5 715 000,00	4 286 250,00	2 857 500,00	1 428 750,00	1 143 000,00	571 500,00	285 750,00
150	8 415 000,00	6 311 250,00	4 207 500,00	2 103 750,00	1 683 000,00	841 500,00	420 750,00
200	11 115 000,00	8 336 250,00	5 557 500,00	2 778 750,00	2 223 000,00	1 111 500,00	555 750,00
250	13 815 000,00	10 361 250,00	6 907 500,00	3 453 750,00	2 763 000,00	1 381 500,00	690 750,00
300	16 515 000,00	12 386 250,00	8 257 500,00	4 128 750,00	3 303 000,00	1 651 500,00	825 750,00
350	19 215 000,00	14 411 250,00	9 607 500,00	4 803 750,00	3 843 000,00	1 921 500,00	960 750,00
400	21 915 000,00	16 436 250,00	10 957 500,00	5 478 750,00	4 383 000,00	2 191 500,00	1 095 750,00
450	24 615 000,00	18 461 250,00	12 307 500,00	6 153 750,00	4 923 000,00	2 461 500,00	1 230 750,00
500	27 315 000,00	20 486 250,00	13 657 500,00	6 828 750,00	5 463 000,00	2 731 500,00	1 365 750,00

Valorisation Agricole équivalente en %boues	
Incineration & vente à 150 DH/t	Séchage & Combustible à 200 DH/t
10 700 000,00	10 300 000,00
<i>Aucune</i>	<i>Aucune</i>
4%	7%
23%	25%
35%	38%
44%	46%
51%	53%
57%	58%
61%	62%

Prix de mise en décharge	Mise en décharge	Incineration/Matériaux de construction	Séchage/Combustible
		Prix Vente Equilibre	Prix Vente Equilibre
DH/T	DH/an	DH/an	DH/an
0	<i>315 000,00</i>	<i>1 880,83</i>	<i>865,67</i>
50	<i>3 015 000,00</i>	<i>1 430,83</i>	<i>685,67</i>
100	<i>5 715 000,00</i>	<i>980,83</i>	<i>505,67</i>
150	<i>8 415 000,00</i>	<i>530,83</i>	<i>325,67</i>
200	<i>11 115 000,00</i>	<i>80,83</i>	<i>145,67</i>
250	<i>13 815 000,00</i>	<i>-369,17</i>	<i>-34,33</i>
300	<i>16 515 000,00</i>	<i>-819,17</i>	<i>-214,33</i>
350	<i>19 215 000,00</i>	<i>-1 269,17</i>	<i>-394,33</i>
400	<i>21 915 000,00</i>	<i>-1 719,17</i>	<i>-574,33</i>
450	<i>24 615 000,00</i>	<i>-2 169,17</i>	<i>-754,33</i>
500	<i>27 315 000,00</i>	<i>-2 619,17</i>	<i>-934,33</i>

Remarques :

- En cas de mise en décharge des boues à 200Dhs/tonne, la valorisation doit atteindre 97 ,25 pou qu'elle soit équivalente à la mise en décharge à 100DH.
- A un prix de 300 Dhs/t l'incinération des boues et la commercialisation à 150dh /t des cendre est équivalente au cas où nous valorisons en agriculture 36% des boues.
- Aussi, à ce prix de mise en décharge, le séchage en vue de commercialisation des boues comme combustible à 200Dhs/t est bien équivalent à une valorisation en agriculture de 38% des boues.
- A une prise de 175 Dhs/t pour la mise en décharge des boues, les boues séchées sont compétitives comme combustible prise 234Dh/tonne) et le résultat (produit – charge), serait le même que la mise en décharge sans aucune valorisation.