



Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences et Techniques Département des Sciences de la
Terre, Laboratoire Géoresources, Unité de recherche
Associée CNRST (URAC 42).

LICENCE-ES SCIENCES ET TECHNIQUE
Option : Eau & Environnement

Mémoire de Fin d'Etudes

**Valorisation des boues de la station d'épuration
de la ville de Marrakech**

Réalisé par :

AZOUZZI Marouane

AIT YOUNS Omar

Encadré par :

RHOJJATI A.

BISSI Y.

Soutenu le 27/06/2012 devant le jury composé de :

Pr. RHOJJATI A.

Pr. KHAMLI N.

Pr. RIZKI A.

BISSI Y.

Année Universitaire : 2011 – 2012

SOMMAIRE

Liste des abréviations	6
Remerciements	7
Dédicaces	8
Introduction	9

PREMIERE PARTIE

Généralité sur les eaux usées et sur la station d'épuration de La ville de Marrakech

I Eau Usée	11
I.1. Définition.....	11
I.2. Potentiel des eaux usées au Maroc.....	11
I.3. Les catégories des eaux usées.....	12
I.3.1. Les eaux domestiques.....	12
I.3.2. Les eaux de pluies.....	12
I.3.3. Les eaux industrielles.....	12
II Généralité sur la station d'épuration de la ville de Marrakech	
II.1. La ville de Marrakech	13
II.1.1 Situation démographique de la ville de Marrakech.....	13
II.1.2 Climat.....	13
II.1.3 Température.....	13
II.1.4 Pluviométrie.....	14
II.2. Station d'épuration de la ville de Marrakech	14
II. 2.1 Objectif de la station d'épuration.....	14
II.2.2 Localisation de la station d'épuration.....	15
II.2.3 Choix du site.....	16
II.3.3 Capacité de la station d'épuration.....	17
II.3 Procédé d'un traitement	18
II.3.1. Filière eau.....	19
II.3.1.1. Prétraitement.....	19
II.3.1.1.1 Dégrillage.....	19
II.3.1.1.2 Dessablage – Dégraissage.....	19
II.3.1.2. Traitement primaire.....	20
II.3.1.2.1 Décantation primaire.....	21
II.3.1.3. Traitement secondaire et tertiaire.....	21
II.3.1.3.1 Traitement secondaire.....	22
II.3.1.3.1.1 Bassin d'aération.....	22
II.3.1.3.1.2 Ouvrage de dégazage.....	22

II.3.1.3.1.3 Clarification.....	22
II.3.1.3.2 Traitement tertiaires.....	23
II.3.2. Filière de gaz.....	24
II.3.2.1 Digesteur anaérobie.....	25
II.3.2.2 Désulfurisation.....	25
II.3.2.3 Cogénération.....	25
II.3.2.4. Gazomètre.....	25
II.3.2.5. Torchère.....	25
II.3.2.6. Chaudière.....	26
II.3.3. Filière boue.....	26
II.3.3.1. Origine des boues.....	26
II.3.3.2 Les caractéristiques physico-chimiques des boues.....	26
II.3.3.2.1 Caractéristiques chimiques.....	26
II.3.3.2.2 Caractéristiques physiques.....	27
II.3.3.3 Composition des boues résiduaires.....	27
II.3.3.3.1 Des éléments fertilisants.....	27
II.3.3.3.2 Des éléments indésirables.....	27
II.3.3.4 Les différents types de boues.....	28
II.3.3.4.1 Boues de traitement primaire.....	28
II.3.3.4.2 Boues de traitement tertiaires.....	29
II.3.3.4.3 Boues de traitement biologique.....	29
II.3.3.5 Traitement de la boue.....	29
II.3.3.6 Ligne de traitement des boues.....	30
II.3.3.6.1 Epaississement.....	30
II.3.3.6.2 Digestion.....	32
II.3.3.6.3 Stockages des boues digérées.....	35
II.3.3.6.4 Déshydratation.....	35

DEUXIEME PARTIE

Valorisation des boues de la station d'épuration de la ville De Marrakech

Introduction.....	38
I. Le Séchage.....	39
I.1 Séchage Solaire.....	39
I.1.1 Le principe de séchage des boues par effet de serre.....	39
I.1.2 Les différents types de serres.....	40
I.1.2.1 Les serres ouvertes.....	40
I.1.2.2 Les serres fermées.....	41
I.2 Séchage Thermique.....	41
I.2.1 Les différents types de sècheurs.....	41
I.2.1.1 Sècheurs directs.....	42
I.2.1.2 Sècheurs indirects.....	42
I.2.2 Considérations énergétiques.....	43

I.2.3 Avantages et inconvénients des sécheurs.....	43
I.3 Intérêt De Sechage.....	44
I.4 CONCLUSION.....	44
II. Valorisation Agronomique.....	44
II.1 Epannage.....	44
II.1.1 Conditions générales d'épandage.....	45
II.1.2 Modalités pratiques d'épandage.....	46
II.2 Compostage.....	48
II.2.1 Les différentes étapes de production d'un compost.....	48
II.2.2 Paramètres du compostage	49
II.2.3 Avantages du compost de boues.....	51
III. Valorisation Energétique.....	51
III.1. Méthanisation.....	52
III.2 Valorisation Energétique De Biogaz.....	53
III.2.1 Production de chaleur	54
III.2.2 Production d'électricité	54
III.3 Pyrolyse.....	54
III.3.1 Valorisation des produits.....	55
III.3.2 Gaz de synthèse.....	55
III.3.3 Huile.....	55
III.3.4 Résidu carboné.....	56
IV. L'INCINERATION.....	56
IV.1 Installation d'incinération.....	56
IV.1.1 Convoyage des boues.....	57
IV.1.2 Pré-séchage des boues.....	57
IV.1.3 Fours d'incinération.....	58
IV.1.4 La récupération d'énergie.....	60
IV.1.5 Traitement des fumées.....	60
IV.2 Pouvoir calorifique.....	61
IV.2.1 Unités du pouvoir calorifique.....	62
IV.2.2 Mesure de la pouvoir calorifique des boues de la STEP.....	62
IV.2.3 Détermination du pouvoir calorifique.....	62
IV.3 Valorisation des résidus d'incinération.....	63
IV.3.1 Valorisation en Techniques routière et travaux publics	63
IV.3.2 Valorisation en matériaux de construction.....	63
V. CONCLUSION.....	64

TROISIEME PARTIE

Les aspects socioéconomiques, environnementaux et Techniques

I. Aspect environnementaux.....	66
I.1 Valorisation énergétiques.....	66
I.2 L'incinération.....	66
I.3 Valorisation agronomique.....	67
II. Aspect techniques et économiques.....	67
II.1 Valorisation énergétique.....	67
II.2 Valorisation agronomique.....	68
II.3 Etude de faisabilité économique d'installation d'incinération.....	68
Conclusion Générale.....	70
Bibliographie.....	71
Liste des figures.....	72
Liste des Tableaux.....	72
Annexe1.....	73
Annexe2.....	74

Liste des abréviations

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

STEP : Station D'épuration Des Eaux Usées

MES : La Matière En Suspension

DBO5 : La Demande Biologique En Oxygène

DCO : La Demande Chimique En Oxygène

NTK : L'azote

PT : Le Phosphore

UV : Ultra Violet

MVS : Matières Volatiles Sèches

HPA : Hydrocarbures Polycycliques Aromatiques

PCB : Polychlorobiphényles

MO : Matière Organique

FAB : Les Filtres A Bande

C/N : Un Rapport Carbone Sur Azote

CEC : Capacité D'échange Cationique

AGV : Des Acides Gras Volatils

CHON : Carbone Hydrogène Oxygène Azote

PCI : Le Pouvoir Calorifique Inférieur

ORMVAH : L'Office Régional De Mise En Valeur Agricole Du Haouz

Remerciements

*On tient d'abord à remercier notre encadrant Monsieur **A. RHOUJATTI** qui a dirigé ce Travail. et on le remercie vivement pour son soutien et disponibilité qu'il nous accordé pour faire avancé se travail.*

*On adresse également nos profonds remerciements a nos maitre de stage Monsieur **Y.BISSI** de nous 'avoir aidé à s'intégrer au sein de la station d'épuration et pour l'accueil chaleureux qu'ils nous ont réservé.*

*On adresse nos remerciements à Monsieur **A. DROUACH** pour ses encouragements et son soutien moral et ses explications ainsi que pour son aide et ses conseils.*

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

Dédicaces

A NOS CHERS PARENTS

Vous avez fait de nous ce que nous sommes aujourd'hui, nous vous devons tout, l'excellente éducation, le bien être matériel, moral et spirituel.

Vous êtes pour nous l'exemple d'abnégation, de dévouement et de probité.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que nous ne vous en acquitterons jamais assez .puisse dieu, le très haut, vous accorde santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais nous ne vous décevons.

Vos prières ont été pour nous d'un grand soutien tout au long de nos études avec nos souhaits de santé, de bonheur et de longévité. Vous êtes le symbole et le joyau de la famille.

A NOS AMIS DE TOUJOURS

En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.

A toutes les personnes qui ont participé à l'élaboration de ce travail

Introduction

Les accroissements démographiques, économiques et urbains sont à l'origine de différentes sources de pollution. Parmi ces sources de pollution, la production des eaux usées souvent rejetées dans le milieu récepteur (mer, rivières, sols) sans traitement préalable génère de nombreuses maladies et épidémies (OMS, 1989; Prost, 1991).

Au Maroc, les volumes d'eaux usées rejetés ont été estimés à 470 Mm³/an en 1994 et atteindraient 900 Mm³ par an à l'horizon 2020 (Ministère de l'Agriculture et de la mise en Valeur Agricole, Maroc, 1998). L'accroissement de la demande en eau pour la consommation humaine, industrielle, agricole et les sécheresses répétées à l'échelle nationale ont poussé les décideurs à considérer les eaux usées comme une ressource hydrique appréciable qu'il faut absolument récupérer après leur épuration.

Au niveau de la ville de Marrakech le traitement des eaux usées consiste à décanter les éléments polluants particuliers et à extraire les éléments dissous qui sont transformés en matière déposées suite à un traitement approprié. Ainsi, à la sortie de la station, il en résulte d'une part une eau épurée rejetée dans le milieu naturel, et d'autre part, il reste des sous-produits désignés sous le terme de boues résiduelles. Ces boues produites par la station d'épuration constituent une quantité énorme pour la mise en décharge puisqu'elles sont considérées comme un déchet à part entière.

Dans les pays développés y'a deux voies de valorisation des boues de la station d'épuration :

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

L'objectif de notre travail consiste à étudier les deux voies de valorisation des boues existantes, en tenant compte du coût d'installation, de l'origine des boues, de la valeur ajoutée du produit qui en résulte et de l'impact sur l'environnement que pourrait avoir la filière retenue à cet égard.

La démarche de notre travail consiste à déterminer le pouvoir calorifique des boues, et ces caractéristiques physico-chimiques. et faire des analyses des traces métalliques dans un laboratoire pour savoir si on peut la valorisé au domaine agricole.

La première partie de ce travail concerne des généralités sur les eaux usées et sur la station d'épuration de la ville de Marrakech. Ensuite, la deuxième partie est dévolue à la présentation des différentes filières de valorisation des boues résiduelles. La troisième partie consiste à déterminer les aspects environnementaux techniques et économiques de chaque technique d'élimination des boues.



PREMIERE PARTIE

**Généralité sur les eaux usées et leur
traitement au niveau de la station
d'épuration de La ville de Marrakech**

I. EAU USEE

I.1 Définition

L'eau usée est une eau dont les caractéristiques physiques, chimiques ou biologiques sont dégradées suite à son utilisation dans différents domaines (domestique, agricole, industriel, etc.). Pour cette raison, ces eaux usées devront être traitées avant d'être restituée au milieu naturel et éviter ainsi de causer d'autre pollution notamment des sols et de l'atmosphère.

Les eaux usées proviennent de plusieurs sources. L'eau de pluie, ainsi que les différents polluants qui s'écoulent dans les égouts, aboutissent dans les centres de traitement. Les eaux usées peuvent aussi provenir de sources agricoles et industrielles. Généralement, les eaux usées issues des unités industrielles sont plus difficile à traiter que les eaux usées domestiques. Par ailleurs, ces dernières peuvent être difficiles à traiter en raison de l'augmentation du nombre de produits pharmaceutiques et de soins personnels qui s'y trouvent.

I.2 Potentiel des eaux usées au Maroc

Le volume annuel des eaux usées a presque triplé au cours des trois dernières décennies. Il a passé de 48 à 500 millions de m³ de 1960 à 1999 et il est prévu atteindre près de 900 millions de m³ en l'an 2020 (CSEC, 1994). L'évolution temporelle des rejets urbains est présentée dans la figure suivante (Fig. 1)

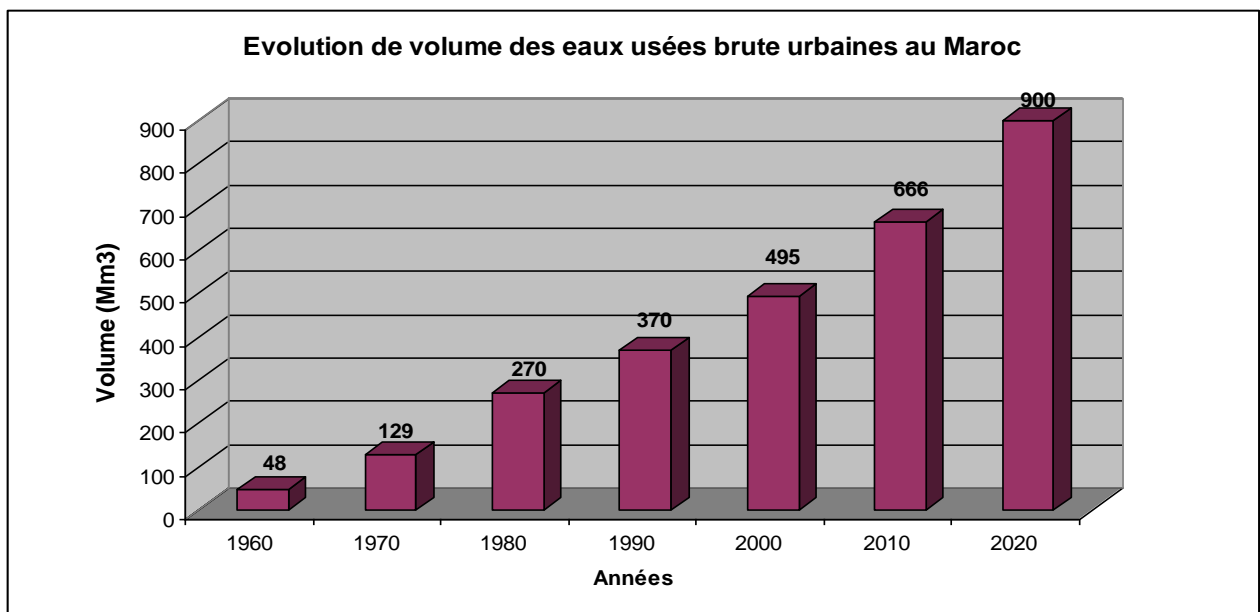


Fig. 1 : Evolution des eaux usées urbaines au Maroc.

Les principaux facteurs qui concourent à cette augmentation sont :

- L'accroissement de la population urbaine, qui augmente à un taux variant de 4,4 à 5% ;
- L'augmentation du taux de branchement au réseau d'eau potable dans les zones urbaines, qui est passée de 53 % en 1972 à 79 % en 1993 et à 85 % en l'an 2000
- L'augmentation du taux de branchement au réseau d'assainissement a pu atteindre 75 % dans les grandes villes en 1999 ; et l'augmentation de la consommation individuelle en eau potable dans les grandes villes, qui a crû de 85 à 116 litres par habitant et par jour entre 1972 et 1992.

I.3 Les catégories des eaux usées

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

I.3.1 Les eaux domestiques

Elles sont constituées des eaux grises et des eaux vannes. Les eaux grises sont les eaux des baignoires, douches, lavabos, éviers, machines à laver. Les eaux-vannes ou eaux ménagères font références aux sous-produits de la digestion tels que 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.3.2 Les eaux de pluies

Elles peuvent, elles aussi, constituer la cause de pollutions importantes des cours d'eau, notamment pendant les périodes orageuses. Au moment de la condensation de l'eau dans l'atmosphère, elle se charge de polluant de différentes natures issus de sources diverses. Après leur précipitation, les eaux de pluies ruissèlent et se chargent d'avantage d'une variété de résidus déposés sur les toits et les chaussées des villes (huiles, gasoils, résidus de pneus, métaux lourds, etc.). En outre, lorsque le système d'assainissement est dit "unitaire", les eaux pluviales sont mêlées aux eaux usées domestiques. Enfin, dans les zones urbaines, les

surfaces construites fait augmenter la superficie de substrat imperméable d'où le risque d'inondation à celui de la pollution.

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 Généralité sur la station d'épuration de la ville de Marrakech

II.1 La ville de Marrakech

II.1.1 Situation démographique de la ville de Marrakech

Marrakech compte parmi les plus grandes villes du Maroc, elle compte plus de 1.000.000 d'habitants. Répartis sur une superficie de 230 km², c'est la quatrième plus grande ville après Casablanca, Rabat et Fès.

La Medina est reconnu comme patrimoine mondiale et sans doute la raison pour laquelle Marrakech est surnommé la perle du sud, le tourisme a beaucoup contribué au développement urbanistique et démographique que connaît la ville depuis quelque années.

Marrakech grandit, et forcément les besoins en eau la suivent, il fallait donc trouver des solutions durables permettant de faire face au besoin du développement urbain.

Chaque jour plus de 100000 m³ d'eaux usés sont rejetés par la ville de Marrakech, un volume correspondant à une population de 1.300.000 habitants.

II.1.2 Climat

Le climat de la région est globalement aride à semi aride. Il est soumis aux influences d'une part de l'Océan Atlantique et d'autre part sahariennes. Il se distingue par un écart de Température très important. En effet, les températures estivales sont très élevées et celles hivernales sont très basses avec une pluviométrie faible et irrégulière.

II.1.3 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.

II.1.4 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.

II.2 Station d'épuration de la ville de Marrakech

II.2.1 Objectif de la station d'épuration

II.2.1.1 Mobilisation d'une ressource en eau alternative

Les eaux issues du traitement tertiaire répondront aux normes marocaines pour l'irrigation de plusieurs cultures et pour l'arrosage des espaces verts. La réutilisation des eaux usées traitées aura donc pour objectif :

- soulagement des ressources en eau potable,
- bon développement des cultures vue les teneurs en élément fertilisants des eaux usées épurées,
- protection des nappes souterraines du danger de contamination par les constituants d'une eau usée non traitée.

II.2.1.2 Protection de l'environnement

L'épuration des eaux usées sur plusieurs niveaux avant de les rejeter en milieu naturel, notamment Oued Tensift engendre la préservation de la qualité de la vie sur les lieux mêmes où nous vivons, aussi elle assure une protection de toutes les composantes de l'environnement à savoir : l'eau, la biomasse, le sol et l'air.

II.2.1.3 Participation au développement touristique

Marrakech est connu par ses grands jardins et ses luxueux golfs, mais ces derniers sont les plus grands consommateurs des eaux. Alors la réutilisation des eaux usées épuré permet à la fois de soulager les ressources naturelles, améliorer les conditions sanitaires et offrir ainsi une atmosphère de plus en plus accueillante au touriste.

II.2.1.4 Amélioration des conditions sanitaires

L'eau constitue un facteur principal de transmission de maladies. Dans la station d'épuration, les eaux usées subissent des traitements afin de rendre négligeable leur composition en matières indésirables et toxiques, nocives à la santé humaine, qui se transmettent soit par contact direct avec les eaux (eaux de baignade), soit indirectement par l'irrigation des cultures par des eaux usées non traitées.

II.2.2 Localisation de la station d'épuration

La station d'épuration de Marrakech se situe à 13 km de Marrakech au niveau de la route national n°7. Le site de la station d'épuration est situé au nord-ouest de la ville de Marrakech, sur la rive gauche d'oued Tensift (Fig. 2). Ce centre de traitement des eaux est délimité par la rive gauche de l'oued Tensift au Nord, la digue formée par la route de Safi à la traversée de l'oued Tensift à l'Est et la route des ferrailleurs et le douar Azib layadi au Sud.

Le site présente une superficie totale d'environ 18 ha. Le choix du site est motivé par, d'une part, sa côte la plus basse qui permet la collecte et le transport gravitaire des eaux usées, et d'autre part, par sa situation très proche de la décharge contrôlée et aménagée pour l'évacuation des sous produits du traitement, à savoir, les boues déshydratées, le sable et les refus de grilles.

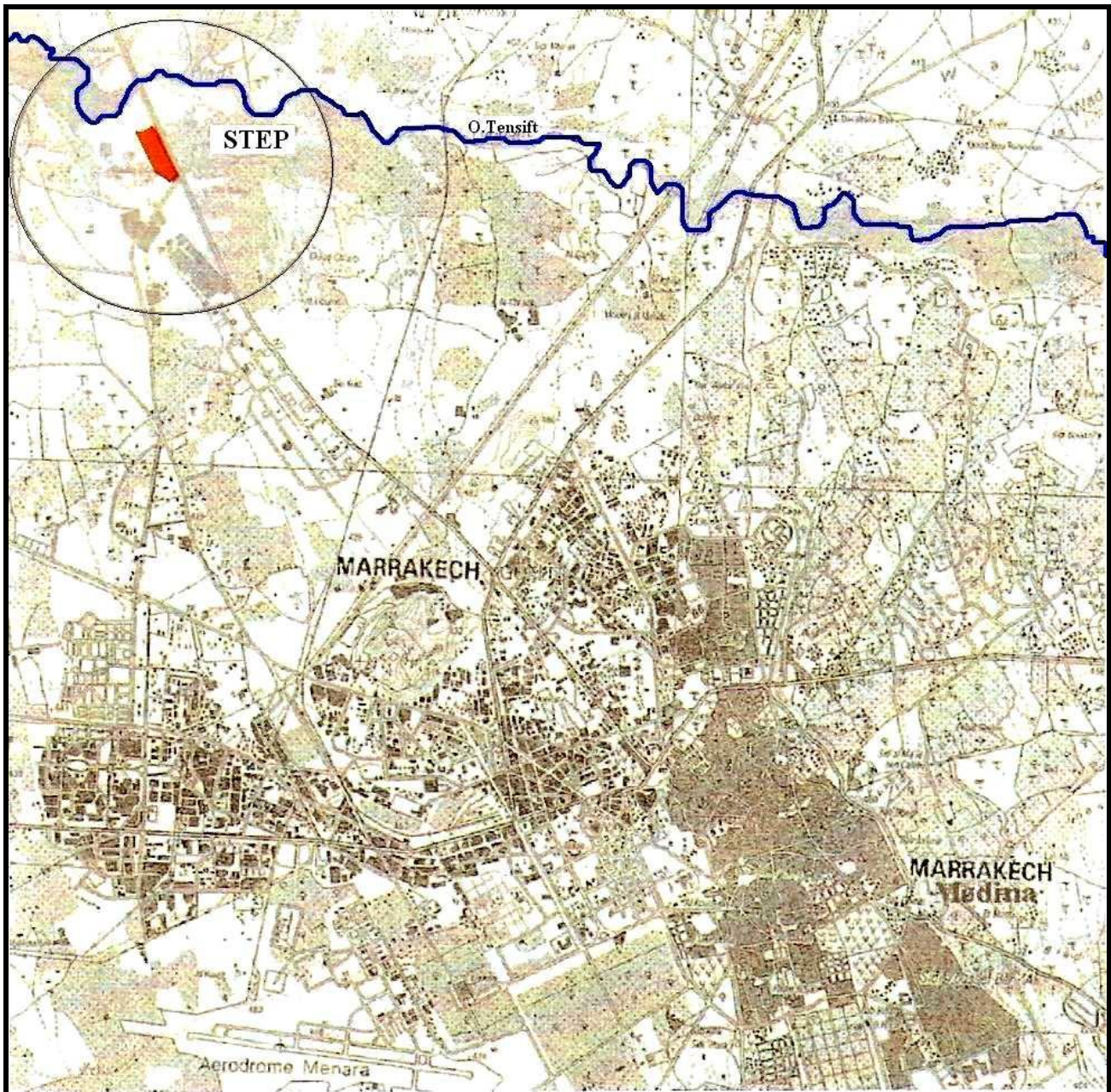


Fig. 2 : Situation géographique de la STEP de la ville de Marrakech.

II.2.3 Choix du site

Le choix du site de la station s'est basé sur plusieurs facteurs :

- **Facteurs climatiques :** la station est installée à la sortie au Nord de la ville parallèlement à la direction du vent pour que les odeurs émises par les eaux au cours du traitement n'aient aucune nuisance pour la population.
- **Facteurs topographiques :** la STEP est implantée sur un site dont la côte la plus basse permet la collecte et le transport gravitaire des eaux usées, et par sa situation

très proche de la décharge publique prévue pour l'évacuation des déchets du prétraitement et des boues déshydratées.

II.2.4 Capacité de la station d'épuration

II.2.4.1 Débit à traiter

Le tableau ci-dessous résulte la quantité des eaux usées arrivant à la station (Tab.1).

<i>Débit Nominal (Temps sec)</i>	<i>90.720 m3/jour</i>
<i>Débit moyen estival</i>	<i>118.000 m3/jour</i>
<i>Débit de pointe horaire</i>	<i>184.896 m3/jour</i>
<i>Débit accepté en temps de pluie</i>	<i>9828 m3/h</i>

Tab. 1: débit à traiter au niveau de la station.

II.2.4.2 Pollution à traiter

La station d'épuration de la ville de Marrakech permet de traiter la pollution de 1.300.000 Equivalents Habitants, avec au quotidien :

- ✓ MES : La matière en suspension (584mg/l) soit 53 T/jour
- ✓ DBO5 : La demande biologique en oxygène (640mg/l) soit 58 T/jour
- ✓ DCO : La demande chimique en oxygène (1600mg/l) soit 145 T/jour
- ✓ NTK : L'Azote (120mg/l) soit 14 T/jour.
- ✓ PT : Le phosphore (22mg/l) soit 2,6 T/jour.

- **Les matières en suspension (MES)**

La pollution d'une eau peut être associée à la présence d'objets flottants, de matières grossières et de particules en suspension. En fonction de la taille de ces particules, on distingue généralement :

- Les matières grossières (décantables ou flottantes)
- Les matières en suspension (de nature organique ou minérale) qui sont des matières insolubles et fines.

- **La demande biochimique en oxygène (DBO)**

La DBO correspond à l'oxygène qui a été utilisé par les bactéries pour détruire ou dégrader les matières organiques biodégradables présentes dans l'eau. Cette mesure traduit donc indirectement la fraction biodégradable dans l'eau et représente assez fidèlement le processus de dégradation Naturelle.

Les transformations des matières organiques s'effectuent en deux stades :

- Le premier stade est relatif aux composés carbonés, débute immédiatement et s'achève au bout de 20 jours environ,
- Le deuxième stade, est relatif aux composés azotés, ne commence qu'au bout d'une dizaine de jours et s'étend sur une période très longue.

- **La demande chimique en oxygène(DCO)**

La DCO correspond à la quantité d'oxygène (en mg) qui a été consommée par voie chimique pour oxyder l'ensemble des matières oxydables présentes dans un échantillon d'eau de 1 litre. Elle est moins représentative que la DBO_5 qui a lieu dans le milieu naturel mais elle est rapide, et contrairement à cette dernière, possède une bonne reproductibilité. La DCO est particulièrement indiquée pour mesurer la pollution d'un effluent industriel.

II.3 Procédé de traitement

Le traitement des eaux usées de la ville de Marrakech comporte trois composantes : le traitement des eaux, le traitement des boues et le traitement de gaz (Fig. 3)

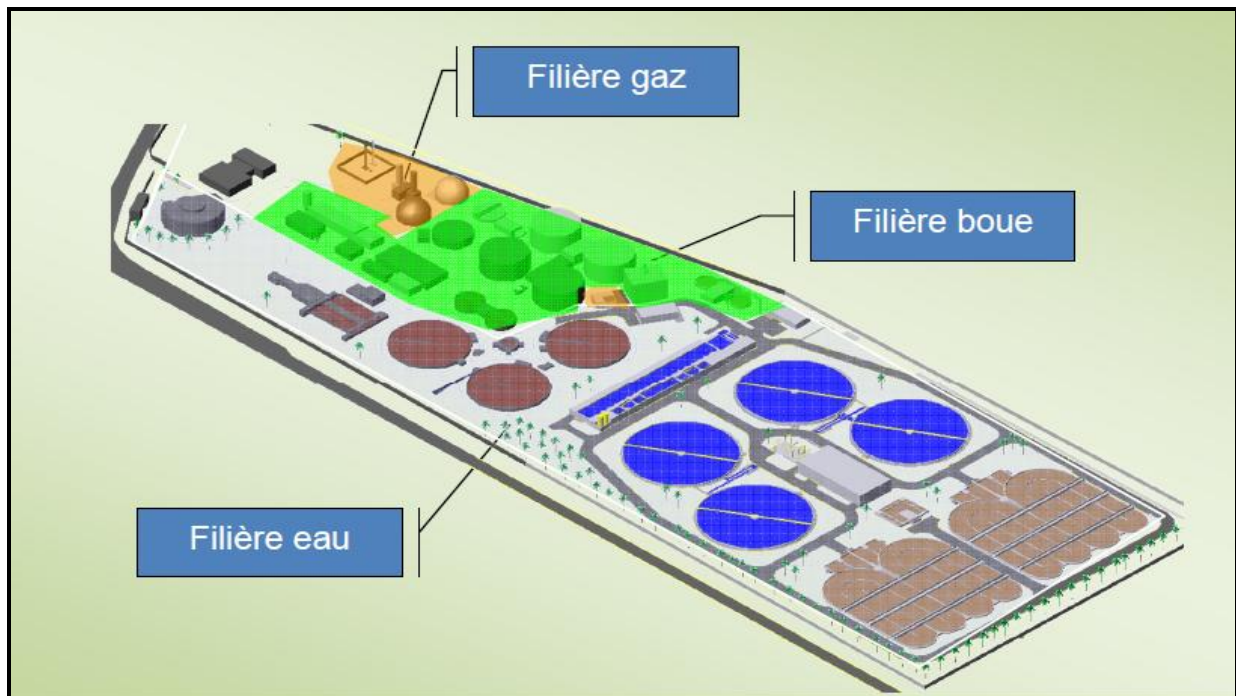


Fig. 3: Modèle de STEP avec les trois filières

Le traitement des eaux usées se fait selon quatre étapes essentielles : un prétraitement, un traitement primaire, un traitement secondaire et un traitement tertiaire. L'objectif de ce

traitement est de minimiser la concentration de certaines substances : DBO5, DCO, NTK, MES, $N-NH_4^+$ et NO_3^- .

II.3.1 Filière eau

La filière d'eau se fait selon un procédé où quatre étapes sont nécessaires comme le montre le tableau ci dessous (Fig. 4)

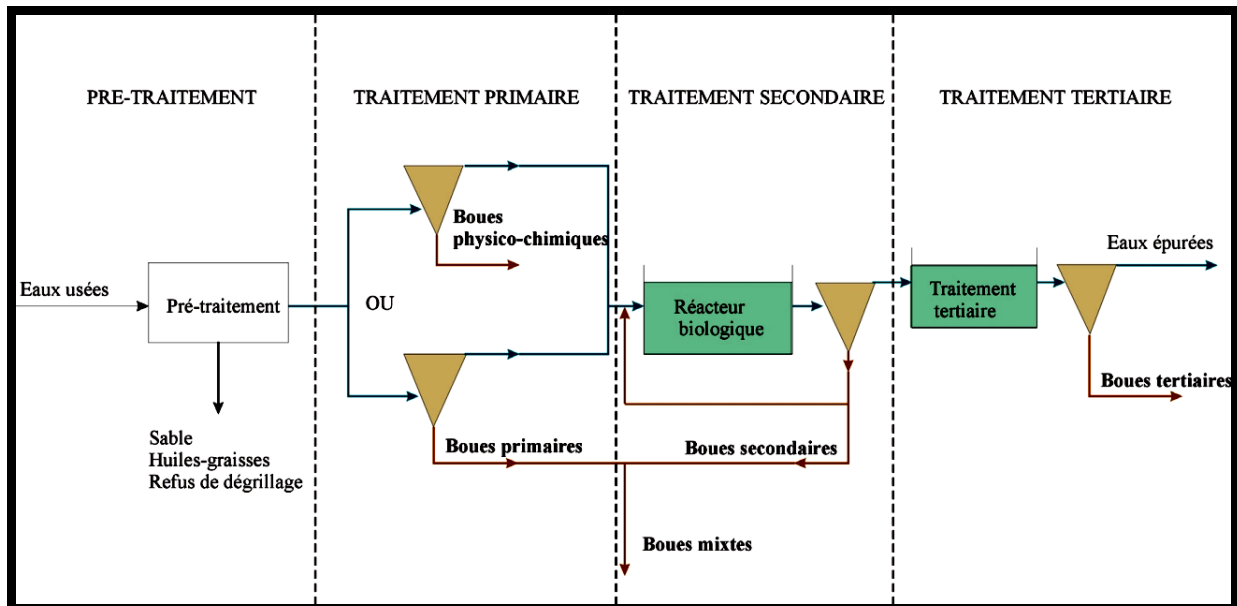


Fig. 4 : Schéma d'une station d'épuration

II.3.1.1 Prétraitement (Fig. 5)

II.3.1.1.1 Dégrillage

Les eaux usées arrivant à la station d'épuration passent d'abord à travers des grilles grossières qui retiennent les déchets de grande et de petites dimensions (plastiques, tissus) (photo2, annexe2)

II.3.1.1.2 Dessablage – Dégraissage

Il a pour but d'extraire les sables et les particules minérales, pour éviter les dépôts dans les canaux et les conduites, et protège les pompes et d'autre appareils contre l'abrasion.

Les dessaleur-dégraisseur sont de type « rectangulaire aéré » (photo1, annexe2), il se compose de deux canaux, chacun à section pentagonale identique. D'une profondeur de 3,50m et 4m de largeur, et avec des parois inclinées à 58° par rapport à l'horizontale dans leur partie inférieure de telle sorte qu'il ne reste au fond qu'un chenal de 0,60m de large dans lequel les

particules décantées se rassemblent et seront évacuées périodiquement par un émulseur à air.

Les Caractéristiques de dessableur-dégraisseur sont comme suivant :

- Longueur : 25 m
- Largeur : 8 m
- Volume : 600 m³
- Surface unitaire : 200 m²
- Surface totale : 400 m²
- Volume total : 1200 m³

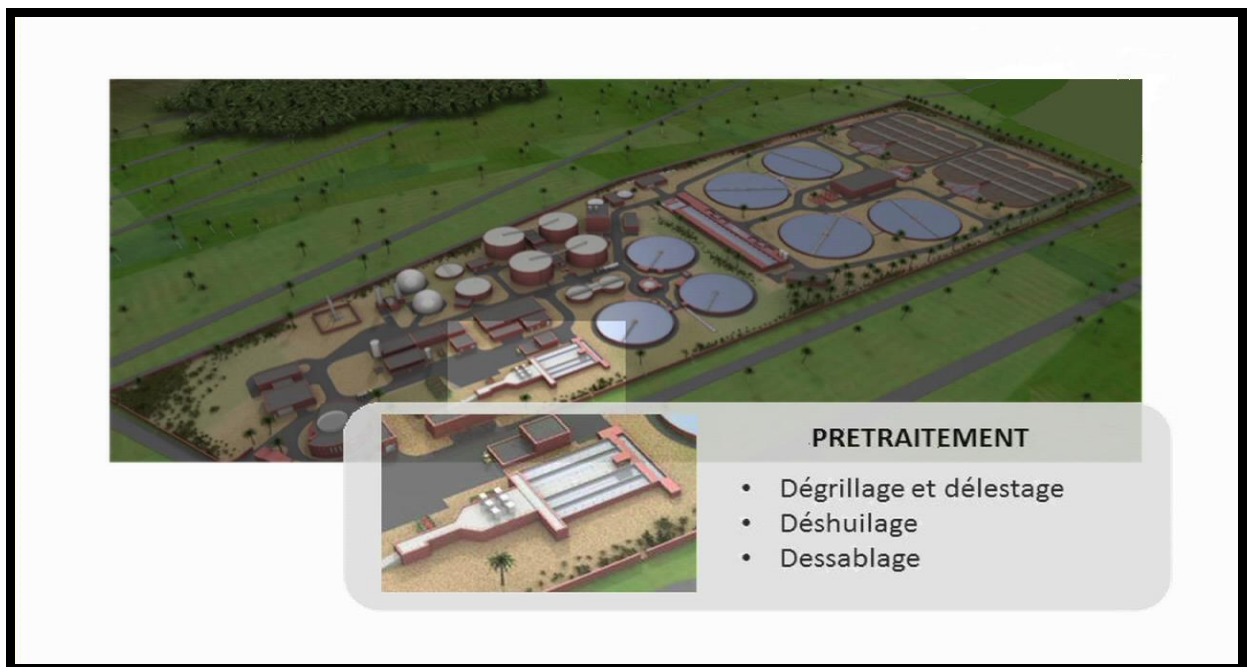


Fig. 5 : Etape de prétraitement

II.3.1.2 Traitement primaire (Décantation primaire)

Son objectif est d'éliminer les particules dont la densité est supérieure à celle de l'eau par graviter. La vitesse de décantation est en fonction de la vitesse de chute des particules, qui elle-même est en fonction de divers autres paramètres parmi lesquels : grosseur et densité des particules (Fig. 6) (photo3, annexe2).

Après deux heures de décantation, l'eau décantée est rejetée dans le milieu récepteur, la graisse flottante raclée est envoyée vers le traitement des graisses. La matière décantée sous forme de boue à une concentration de 5 g/l est envoyé vers les épaisseurs. Les Caractéristiques de décanteur sont :

- Volume unitaire : 3 500 m³
- Surface unitaire : 1 200 m²

- Diamètre : 39 m

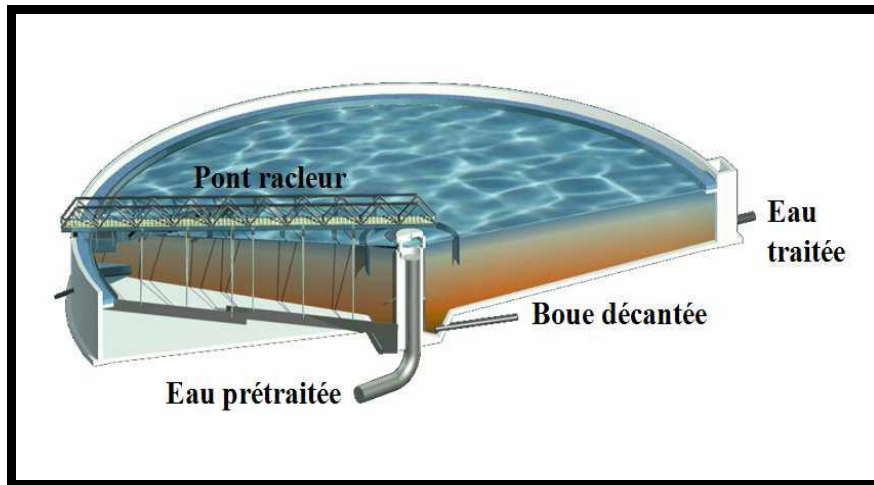


Fig. 6 : Coupe longitudinale d'un décanteur

II.3.1.3. Traitement secondaire (Fig. 7)

Ce traitement se fait en générale par voie biologique afin de réduire la quantité de matières organiques. Le procédé le plus commun est celui des boues activées. L'ajout de micro-organismes permet d'éliminer les polluants notamment l'azote. Pour rendre ce procédé plus rapide, il faut créer des conditions de vie favorable pour les bactéries. Cela a pour but de réduire la "DBO" et la "DCO".

Les procédés d'élimination de l'azote sont la nitrification et la dénitrification.

La nitrification : est l'oxydation de l'ammoniaque (NH_4) en nitrates (NO_3). Cette transformation se produit dans le bassin d'aération dans des conditions aérobiques (présence d' O_2).

La dénitrification : est le processus par lequel les nitrates (NO_3) sont convertis en azote gazeux (N_2) et en oxygène (O_2) dans des conditions anoxiques.

Les organismes responsables de la libération du carbone peuvent utiliser les nitrates (NO_3) et les nitrites (NO_2) comme source d'oxygène. Une masse active d'organisme qui consomme et concentre de la matière organique est appelée boues activées.

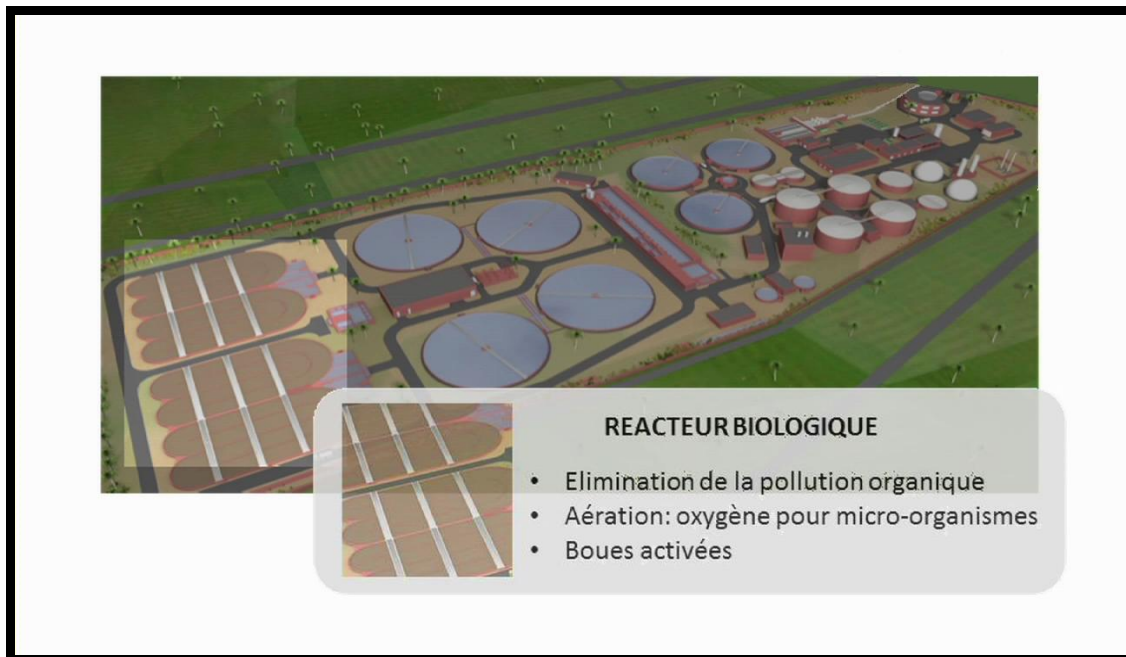


Fig. 7 : étape du traitement secondaire

II.3.1.3.1 Bassin d'aération

L'ouvrage est un chenal concentrique autour de la zone de contact. Compte tenu des conditions locales, la nitrification a lieu pendant de 8 à 5 jours avec un effluent à 20°C et à 30°C respectivement. Si la température de l'effluent est inférieure à 20°C par exemple en hiver, la nitrification ne sera que partielle. Le bassin d'aération dont le nombre est 4, se caractérise par un volume unitaire de 16 250 m³ et un volume air surpressé de 70 000 Nm³/h (photo4, annexe2).

II.3.1.3.2 Ouvrage de dégazage

La phase du dégazage a pour but de débarrasser la liqueur mixte des bulles d'air, et pour prévenir l'éventuelle flottation d'une partie des boues dans les clarificateurs.

II.3.1.3.3 Clarification

Le mélange « eau-boue » issu du bassin d'aération est mis au repos dans le clarificateur (photo5, annexe2).

Les boues, plus lourdes que l'eau, se déposent au fond du bassin par décantation et sont aspirées par un pont tournant, pour être envoyées vers un réservoir spécifique.

Les éventuels surnageant sont raclés en surface, par le même pont tournant, et renvoyés en tête de station. Une partie des boues retourne vers le bassin d'aération, afin de maintenir en quantité suffisante la masse bactérienne active.

L'eau traitée au niveau du clarificateur évacue vers l'Oued Tensift ou vers les ouvrages où elles seront traitées pour usage agricole (Fig. 8)



Fig. 8 : décantation secondaire

Les 4 clarificateurs se caractérisent par un volume total de 10 000 m³, une surface unitaire de 2 500 m² et un diamètre de 57 m.

II. 3.1.4 Traitement tertiaires

Le traitement tertiaire vise à éliminer les dernières MES et le phosphore. Plus le traitement tertiaire une désinfection des eaux est impérative pour l'élimination des germes pathogènes présents dans l'eau (Fig. 9).

Les eaux épurées en sortie du traitement biologique ne peuvent être utilisées directement pour l'irrigation des golfs, il est donc impératif de compléter le traitement secondaire ou biologique par un traitement tertiaire.

L'objectif du traitement tertiaire est donc d'obtenir un effluent avec un taux de MES < 5 mg/l (si possible < 1mg/l),

Les étapes de traitement tertiaire sont les suivantes:

Filtration sur sable

- Coagulation : Chlorure Ferrique
- Flocculation : Polymère anionique
- Filtration rapide : 20 filtres à sable

- Surface Unitaire : 27,5 m²

Désinfection UV et au chlore

- Désinfection UV : 2
- 256 Lampes – 250W/lampe
- Dose : 40mJ/cm²
- 2 Canaux - 2 bancs / Canal

Chloration d'appoint

- 2 rampes d'injection
- 16 tanks Cl gazeux (800l/tank)
- Dose : 5 mg/l

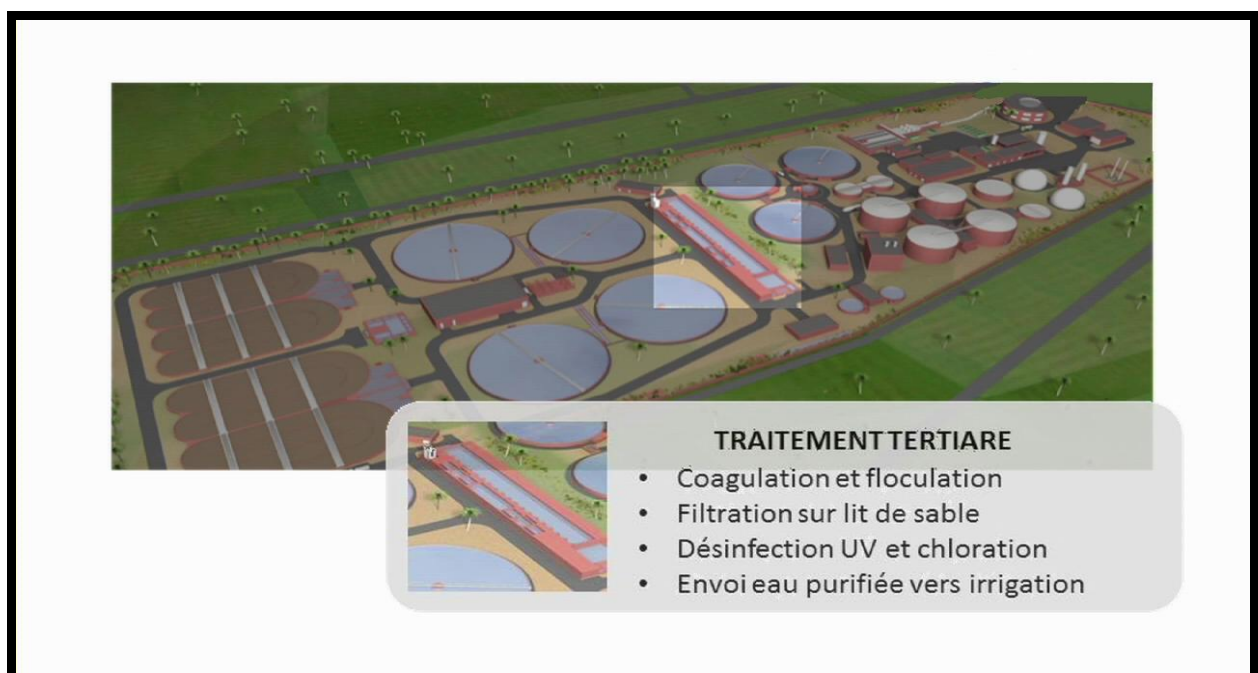


Fig. 9 : traitement tertiaire

II. 3.2 Filière de gaz

La boue est digérée par les bactéries dans le digesteur, on obtient ainsi le méthane. Ce dernier est stocké dans le gazomètre. Grâce à quatre moteurs à gaz appelé cogénérateur, ce méthane permet la production de l'électricité. (Fig. 10).

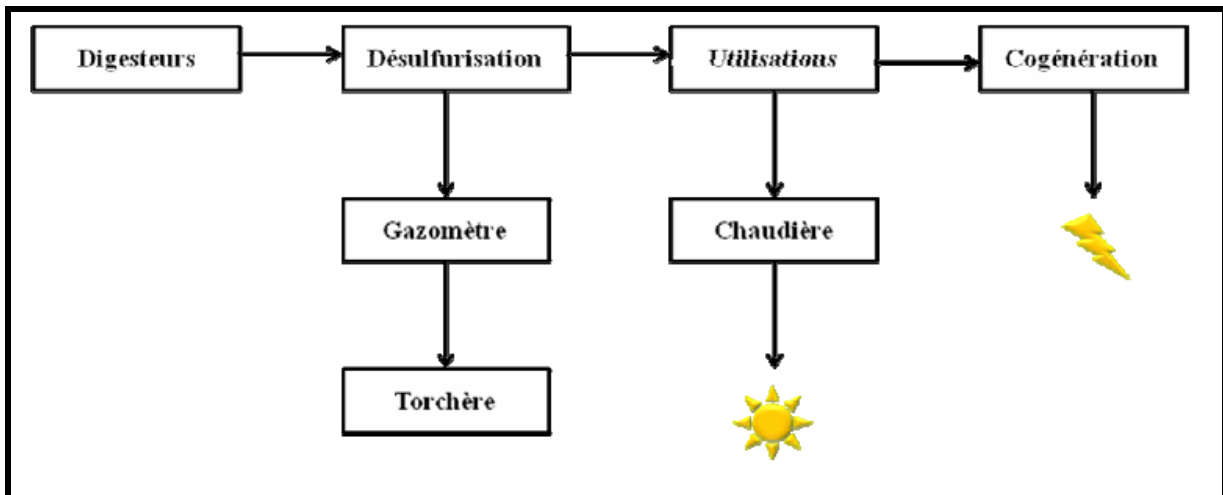


Fig. 10 : Chaîne de la ligne biogaz

II. 3.2.1 Digesteur anaérobie

Le biogaz (CH_4 , CO_2 , H_2S) formé dans le digesteur par les bactéries est envoyé vers la Désulfuration pour le désulfurer.

II.3.2.2 Désulfuration

Son objectif est L'élimination du H_2S du biogaz.

II.3.2.3 Cogénération

Après désulfuration, le biogaz épuré envoyé vers la cogénération pour le transformer en énergie électriques et énergie thermique (chaleur) (Tab.1, annexe1)

II.3.2.4 Gazomètre

Le gazomètre est un ouvrage de stockage de biogaz épuré dans le cas où il y un excès de production de biogaz et un déficit de consommation de ce biogaz par la cogénération. Ce gazomètre membranaire est caractérisé par une hauteur de 13 m.et un volume de 2000 m^3 (photo8, annexe2).

II. 3.2.5 Torchère

Lorsqu'on a un excès de biogaz épuré dans le gazomètre, il est brulé au niveau de cette torchère dont la capacité est de $600 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

II. 3.2.6 Chaudière

La chaudière permet de subvenir aux besoins calorifiques de la digestion des boues si l'unité de cogénération du biogaz est en arrêt. Cette chaudière est de type bicom bustible à gaz naturel/biogaz de sorte à pallier à tout manque de biogaz (démarrage de la digestion par exemple).

II.3.3 Filière boue

II.3.3.1 Origine des boues

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

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

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

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

II.3.3.2 Les caractéristiques physico-chimiques des boues

II.3.3.2.1 Caractéristiques chimiques

Une boue est aussi représentée par plusieurs données numériques qui permettent de la caractériser

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

Les boues liquides : siccité de 0 à 10 %

Les boues pâteuses : siccité de 10 à 25%

Les boues solides : siccité de 25 à 80%

Les boues sèches : siccité supérieure à 80%

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

Plus le taux de MVS est faible, plus la boue est facile à épaissir ou à déshydrater, mais plus son exo-thermicité en incinération est faible. Il reste alors dans le creuset les sels minéraux sous forme de cendres.

II.3.3.2 Caractéristiques physiques

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 d'eau (<90%), les boues se comportent comme un liquide non newtonien avec un flux plutôt plastique que visqueux.

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

II.3.3.3 Composition des boues résiduaire

La composition exacte des boues varie en fonction de l'origine des eaux usées, de la période de l'année et du type de traitement et de conditionnement pratiqué dans la station d'épuration.

Les boues résiduaire représentent avant tout une matière première composée de différents éléments (Matière organique, éléments fertilisants, éléments traces métalliques, éléments traces organiques et agents pathogènes).

II.3.3.3.1 Eléments fertilisants

Selon la dose appliquée, les boues peuvent couvrir, en partie ou en totalité, les besoins des cultures en azote, en phosphore, en magnésium, calcium et en soufre. Elles peuvent aussi corriger des carences à l'exception de celle en potassium. Les éléments en traces tels que le cuivre, le zinc, le chrome et le nickel présents dans les boues sont aussi indispensables au développement des végétaux et des animaux.

II.3.3.3.2 Eléments indésirables

Les éléments indésirables contenus dans les boues peuvent avoir différentes natures et compositions. Parmi ces éléments on y trouve :

- **Des éléments traces minéraux** constitués en majorité par des métaux. Certains de ces éléments occupent une place essentielle à faibles concentrations dans l'organisme (Oligo-éléments), mais deviennent généralement toxiques au-delà d'un certain seuil.
- **Des micro-organismes pathogènes** tels que les virus, les bactéries, les protozoaires, les parasites, et les champignons. Ils sont notamment présents dans les matières fécales rejetées dans les Réseaux d'eaux usées et donc inévitablement présents dans les boues brutes.
- **Des micropolluants organiques** à savoir les substances les plus fréquemment considérées sont HPA (Hydrocarbures Polycycliques Aromatiques) et les PCB (Polychlorobiphényles) car ils sont particulièrement persistants. Dans cette Catégorie on y trouve d'autres composés tels que les pesticides, les résidus de médicaments, les phtalates, les nitrates, etc.

II.3.3.4 Les différents types de boues

Les boues de la station sont des boues résiduaires, qui résultent de traitement des eaux usées.

(Fig. 11)

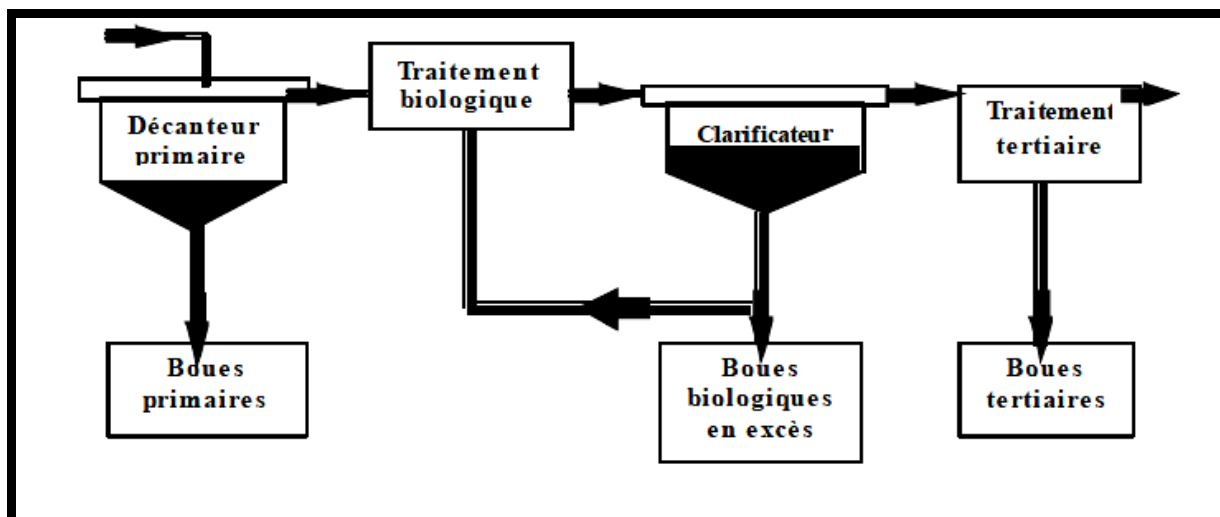


Fig. 11 : Schéma des différents types de boues dans un procédé de traitement par boues activées.

II.3.3.4.1 Boues de traitement primaire

Les boues extraites au fond de décanteur primaire, ainsi que les boues issues du traitement tertiaires, sont envoyées vers l'épaississement gravitaire. Elles sont produites donc par une simple décantation des matières en suspensions (MES) contenues dans les eaux usées. 70%

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

II.3.3.4.2 Boues de traitement tertiaires

Différentes du type précédent, les matières organiques particulières ou colloïdales contenues dans les eaux usées sont agglomérées par addition d'un réactif coagulant. 90% des MES peuvent ainsi être captées. Séparées par décantation, les boues obtenues renferment une partie importante de sels minéraux issus des eaux brutes et de l'agent coagulant.

II.3.3.4.3 Boues de traitement biologique

Ces boues sont essentiellement formées par les résidus de bactéries « cultivées » dans les ouvrages d'épuration. Ces bactéries se nourrissent de matières organiques contenues dans les eaux usées (digestion).

L'épaississement des boues biologiques 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.

II.3.3.5 Traitement de la boue

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

On distingue trois grands types de traitement :

- **Traitements de stabilisation** dont l'objectif est de réduire le pouvoir fermentescible des boues pour atténuer ou supprimer les mauvaises odeurs. La stabilisation se fait de trois manières différentes : Stabilisation biologique, chimique par la chaux et thermique.

Remarque : la stabilisation biologique est la technique utilisée à la station d'épuration de la ville de Marrakech.

- **Traitements de réduction de la teneur en eau des boues** visent à diminuer la quantité de boues à stocker et à épandre, ou améliorer leurs caractéristiques.
- **Traitements d'hygiénisation** visent à éradiquer la charge en micro-organismes pathogènes. Ils ne sont mis en œuvre que dans des contextes particuliers.

II.3.3.6 Ligne de traitement des boues

La filière de traitement des boues est composée :

- 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
- d'un stockage des boues digérées
- d'une déshydratation des boues digérées par filtres à bandes,
- d'un stockage des boues sur site ; ce stockage n'est pas intégré dans l'évaluation de la surface (Fig. 12).

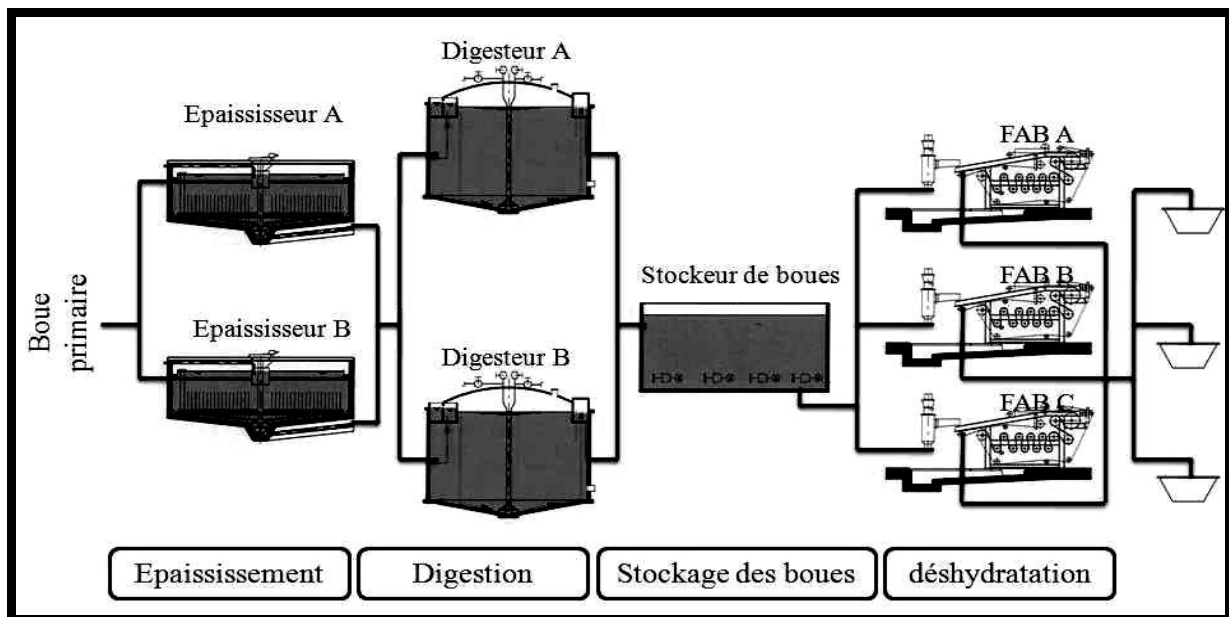


Fig. 12: Chaîne de traitement des boues

II.3.3.6.1 Épauissement

L'objectif de cette étape est de réduire la quantité d'eau pour diminuer le volume des boues.

Très souvent l'épauissement est réalisé par des moyens physiques tels la flottaison, la centrifugation ou la mise dans des bassins pour une simple sédimentation.

Il existe deux types d'épaississement :

- Epaississement gravitaire
- Epaississement dynamique

II.3.3.6.1.1 Epaississement gravitaire

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

II.3.3.6.1.2 Epaississement dynamique

Au classique épaississement par décantation statique s'ajoutent, depuis quelques années, trois techniques d'épaississement dynamiques qui, en particulier avec les boues légères (comme les boues biologiques en excès), permettent d'obtenir des meilleurs taux d'épaississement mais avec 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.

- Epaississement par flottation
- Epaississement par centrifugation
- Epaississement réalisé par des systèmes drainants (grilles et tamis d'égouttage).

NB : Au niveau de la station d'épuration de Marrakech l'épaississement utilisé est l'épaississement gravitaire. Son objectif est d'augmenter la concentration des boues de 5 g/l à 70 g/l.

La STEP est équipé par deux ouvrages d'épaississeurs de type gravitaire, (Fig. 13) (photo6, annexe2).

Cette épaississeur gravitaire est caractérisé par :

- Un diamètre : 15 m.

- Une surface unitaire : 177 m².
- Un volume unitaire : 600 m³.
- Une hauteur cylindrique : 3,5 m.

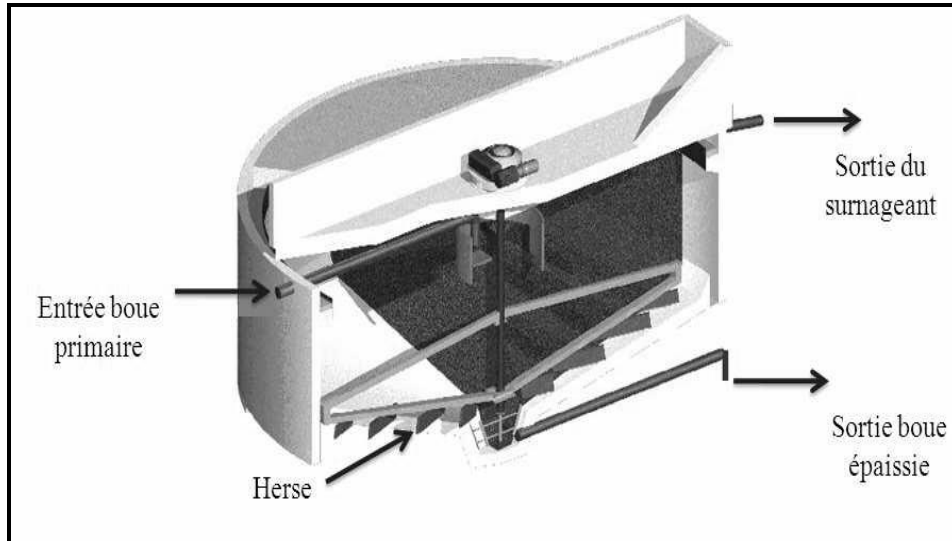


Fig. 13 : Coupe longitudinale d'un épaisseur gravitaire

Les boues primaires extraites des décanteurs primaires sont envoyées par une tuyauterie commune alimentant la bêche de répartition des épaisseurs gravitaires de boues primaires. La répartition est assurée par deux déversoirs et deux batardeaux permettent l'isolement de chaque épaisseur.

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

II.3.3.6.2 Digestion (méthanisation)

La méthanisation ou digestion anaérobie est un procédé naturel de transformation de la matière organique par des bactéries méthanogènes. Les boues riches en MO sont introduites dans des enceintes confinées appelées digesteurs à l'intérieur desquelles les réactions de fermentation sont optimisées et contrôlées, elles y séjournent pendant 3 à 4 semaines. Les digesteurs sont maintenus à une température de 37 °C (ou 55°C) et brassés pour maintenir des conditions favorables au développement de micro-organismes. La matière organique de nombreux déchets ou sous-produits biodégradables se réduit quasiment de moitié.

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

Le résidu de la digestion est stable, désodorisé, débarrassé en majeure partie des germes pathogènes. La méthanisation facilite le traitement des boues quelque soit leur destination finale (valorisation agronomique, incinération, enfouissement en installation de stockage), et quelque 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 une digestion stabilisé, débarrassé en grande partie des germes pathogènes (bactéries mais aussi virus et parasites) et présente un pouvoir fertilisant.
- réduit les teneurs en composés organiques volatils.

La STEP est équipé par deux de digesteurs anaérobies de type mésophile (Fig.14) (photo7, anexe2).

Chaque digesteur est caractérisé par :

- Volume unitaire : 6000 m³.
- Volume total : 12000 m.
- Diamètre : 24 m.
- Hauteur cylindrique : 12,25 m.

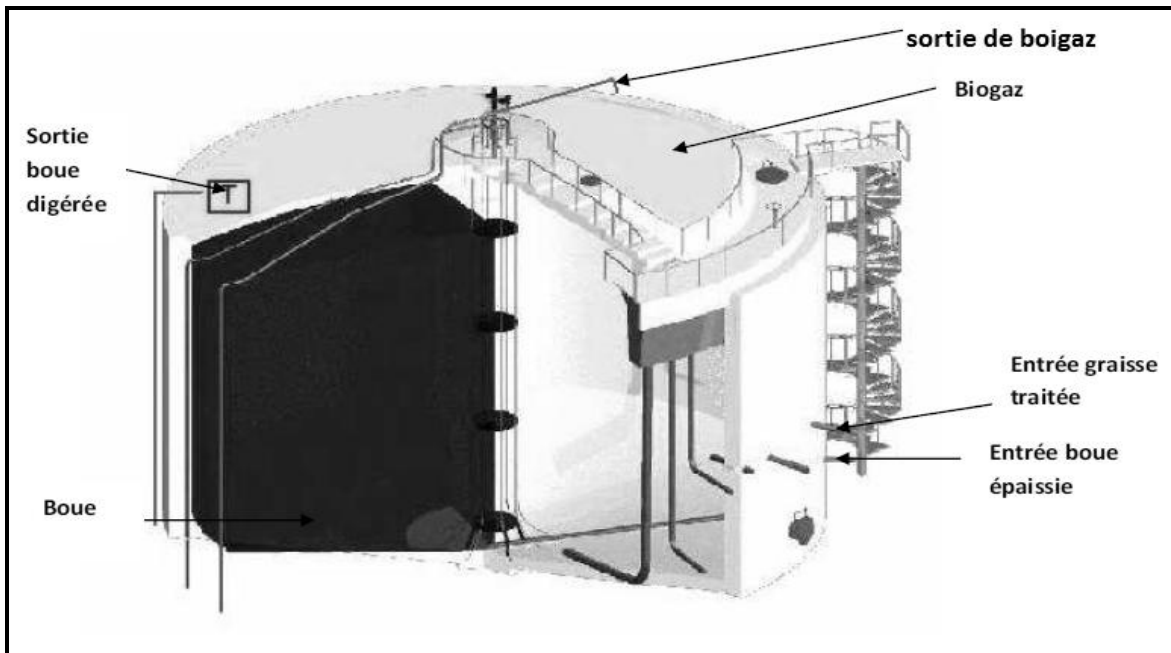


Fig. 14 : Coupe longitudinale d'un digesteur anaérobie

Au niveau de la STEP de Marrakech, le mode de fonctionnement des digesteurs se fait de la manière suivante :

Les boues épaissies (35 392 Kg MS/j tel que 70% matière organique et 30% matière minérale) arrivant au digesteur vont subir une digestion anaérobie à une température de 35°C pendant une durée de 21j, selon quatre phénomènes (Fig. 15) :

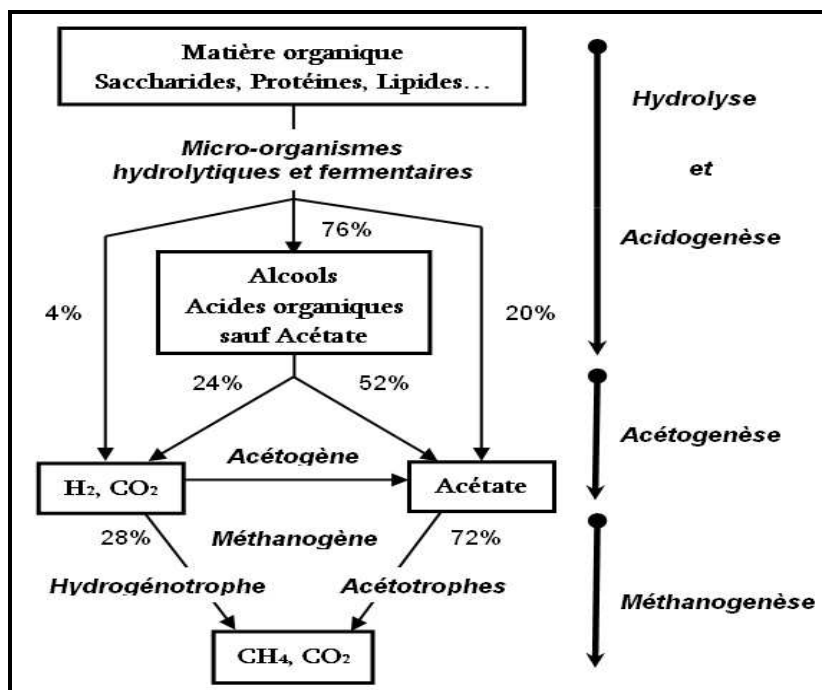


Fig. 15 : Schéma explicatif du processus de la digestion anaérobie

II. 3.3.6.3 Stockages des boues digérées

Les boues digérées sont stockées dans une bache qui présente l'intérêt de constituer un tampon vis-à-vis de 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.

Fonctionnement de l'ouvrage :

Les boues digérées s'écoulent par gravité depuis des digesteurs vers une unité de stockage de forme circulaire dont la capacité est de 1210 m³. Le stockeur est non couvert et équipé de trois agitateurs submersibles assurant l'homogénéité de la boue digérée.

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

II.3.3.6.4 Déshydratation

Les boues digérées sont envoyées du stockeur de boues vers la déshydratation. Cette opération est effectuée sur des filtres à bandes (Fig.16). Ces FAB sont alimentés par des pompes situées dans un local à côté du stockeur.



Fig.16 : Filtre a bandes

1) Préparation du polymère

Une installation automatique de préparation de polymères d'une capacité d'environ 3,2 kg/ j est installée. La préparation de polymères à 3 g/l se fait via les pompes de polymérisation

avec de l'eau potable et la dilution en ligne avant que le dosage soit fait avec de l'eau industrielle très filtrée. Aussi, 2 pompes doseuses sont installées pour les 3 FAB.

2) Evacuation des boues

Les boues sont évacuées par une bande transporteuse qui alimente une trémie d'une pompe pour être ensuite distribuées automatiquement vers trois bennes de stockage d'une capacité de 20 m³ chacune.

3) Chaulage

Il est prévu un chaulage de sécurité qui sera utilisé en cas de maintenance lourde d'un digesteur pour compléter la stabilisation des boues.



DEUXIEME PARTIE

Valorisation des boues de la station d'épuration de la ville de Marrakech

Introduction

Les boues résiduaires de la station d'épuration de la ville de Marrakech sont considérées comme étant des déchets. Une quantité de **150t** par jour de boues déshydratées est produite par la station est déposée dans la décharge de la ville.

La décharge est caractérisée de point de vue géologique par un socle perméable (schiste et granite altérés), se qui accélère l'infiltration des métaux lourds des boues et par conséquence la contamination des eaux souterraines et celle d'oued Tensift situé près de la décharge.

Et Pour ce qui concerne la pollution atmosphérique Les boues jetées dans la décharge constituent une source de pollution due aux échappements des gaz nocifs et surtout à effet de serre.

La solution de la mise en décharge a perdue progressivement de son intérêt et se retrouve actuellement interdite pour des raisons financières et pour des problèmes environnementaux tels que les odeurs nauséabondes, pullulation de moustiques, entraînement d'éléments fertilisants (nitrates, phosphates) et de produits toxiques par les eaux superficielles et contamination des nappes d'eaux souterraines par le lixiviat.

C'est pour cela qu'on est recommandé de faire une étude analytique des boues pour diminuer ou débarrasser son impact et par conséquent protéger les réserves naturelles du phénomène contre la pollution (eau, sols et atmosphère).

Et pour résoudre se problème il est nécessaire de savoir :

- Les caractéristiques physiques et chimiques des boues.
- Définir Les déférentes filières de valorisations de boues.

Actuellement les modes d'élimination des boues de la station de traitement des eaux usées utilisables dans les pays développé sont :

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

Un séchage des boues présente une place très importante dans les filières de valorisation. C'est pour cela qu'on ne peut pas traiter les domaines de valorisation sans parler de cette étape de séchage.

I LE SECHAGE

Le séchage est un des procédés de traitement des boues qui consiste à éliminer une grande partie ou en totalité l'eau par évaporation. Cette élimination d'eau se fait soit par voie **Solaire** ou **Thermique**

I.1 Séchage Solaire

Le séchage est l'opération ayant pour but d'éliminer partiellement ou totalement l'eau d'un corps humide par évaporation de cette eau. Le corps humide mis en jeu peut être solide ou liquide, mais le produit final est solide. Dans le cas des boues de STEP le séchage solaire est un traitement qui vise à augmenter la siccité des boues grâce à l'énergie émise par les rayonnements solaires.

I.1.2 Le principe de séchage des boues par effet de serre

Le séchage solaire consiste à mettre en contact, sous une serre, un air régulièrement renouvelé et une boue répartie sur une dalle en béton et remuée mécaniquement. Entre l'entrée et la sortie de la serre, l'air se charge de vapeur d'eau, aux dépens de la boue qui s'assèche. Un système de ventilation assure le renouvellement de l'air dans le but d'évacuer la vapeur d'eau s'échappant de la boue. La quantité d'eau évaporée dépend toutefois des caractéristiques de l'air et de celles de la boue. Les étapes de séchage des boues dans la serre sont les suivantes :

1^{ère} phase : Réchauffement de la boue

Les boues fraîches introduites dans la serre se réchauffent jusqu'à atteindre la température ambiante de la serre, cette température est supérieure à celle de l'extérieure en raison l'activité biologique et l'effet de serre. Cette période est généralement très courte par rapport au temps total de séchage.

2^{ème} phase : Régime superficielle

Le séchage s'effectue par évaporation de l'eau disponible en surface. Cette phase perdure tant que la surface est alimentée de manière suffisante en eau venant de l'intérieur des boues.

3^{ème} phase : Ralentissement

Cette phase commence quand les boues atteignent leur seuil d'hygroscopicité, c'est-à-dire que l'eau restante dans les boues ne peut plus remonter en surface.

I.1.3 Les différents types de serres

I.1.3.1 Les serres ouvertes

La serre ouverte est équipée d'ouvertures en partie basse et en partie haute afin de favoriser la convection naturelle c'est-à-dire ventilation naturelle (non contrôlée). Le taux de renouvellement de l'air dans la serre n'est pas maîtrisé car seule l'action sur l'ouvrant en toiture permet d'accentuer ou de réduire le débit de ventilation dans la serre. (Amadou, 2007) (fig.17)

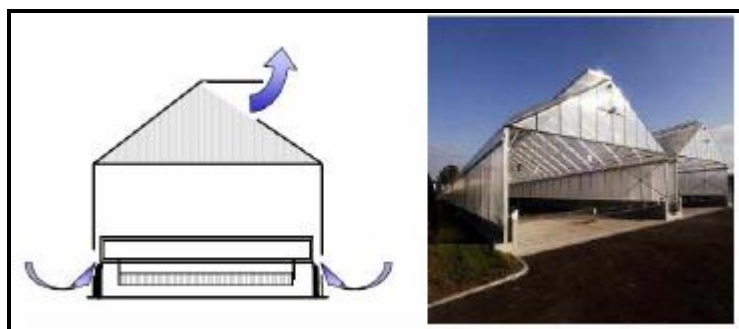


Fig. 17. Serre ouverte

La technique de séchage au niveau des serres ouvertes présente des avantages et inconvénients ressentés dans le tableau ci-dessous (Tab. 2).

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - limitation des dépenses énergétiques, - si la ventilation est suffisante, la dilution des odeurs dans l'atmosphère reste constante, - conception simple. 	<ul style="list-style-type: none"> - températures intérieures plus basses que dans une serre fermée, - performances de séchage sur l'année moindres et aléatoires.

Tab. 2 : Les avantages et les inconvénients d'une serre ouverte (Brison et al, 2010)

I.1.3.2. Les serres fermées

La serre fermée comporte des vantelles (de dimensions précises) sur les parois latérales ou sur un pignon, et des extracteurs pour la sortie d'air sur le pignon opposé (Amadou, 2007) (Fig. 18)

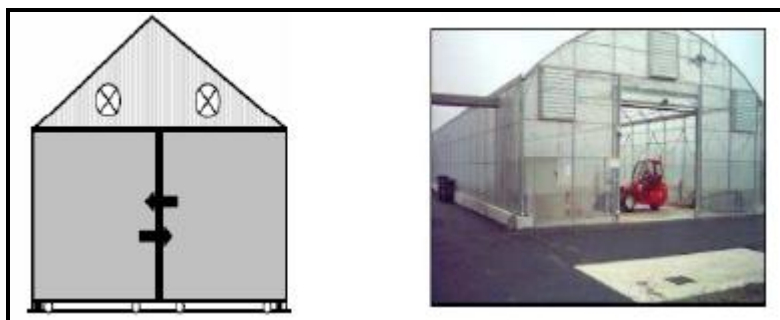


Fig. 18 : Serre fermée

La technique de séchage au niveau des serres fermées présente un avantage et un inconvénient (Tab. 3).

Avantage	Inconvénient
maîtrise de la ventilation donc du taux de Renouvellement	consommation énergétique plus importante

Tab. 3 : L'avantage et l'inconvénient d'une serre ouverte (Brison et al, 2010)

I.2 Séchage Thermique

Il repose sur deux méthodes : directe et indirecte. Le séchage direct consiste en une évaporation des boues par convection, via un fluide caloporteur. Le séchage indirect repose quant à lui en un échange de chaleur par conduction, via une paroi chauffée par un fluide caloporteur. En sortie, les boues se présentent sous forme de poudres ou de granulés, avec un taux de siccité pouvant atteindre 90 à 95 %. Ces deux procédés sont très énergivores ; ils représentent un poste sur lequel il est possible de réduire l'empreinte environnementale de la filière boue, par exemple en mettant en place des boucles de récupération d'énergie.

L'apport d'énergie thermique peut se faire de trois façons :

Séchage par conduction : l'énergie thermique nécessaire au chauffage est apportée par contact avec une paroi chauffée; les vapeurs dégagées par le produit durant le séchage sont aspirées ou entraînées par un gaz de balayage.

Séchage par convection : il consiste à mettre en contact un gaz chaud et le produit.

Séchage par rayonnement : l'énergie est apportée au produit à sécher par des ondes électromagnétiques. Les rayonnements utilisés en séchage sont les infrarouges ou les micro-ondes.

I.2.1 Les différents types de sècheurs

Les sècheurs sont divisés en deux grands types : les sècheurs directs et indirects

I.2.1.1 Sécheurs directs (sécheur rotatif ou à tambour)

Dans ces types des sécheurs la boue est mise en contact direct avec la source de chaleur qui peut être de l'air chaud ou de la vapeur surchauffée.

Le sécheur est constitué d'un long cylindre rotatif horizontal ou légèrement incliné pour faciliter le déplacement du solide (1 à 2.5 m de diamètre et une dizaine de mètres de longueur). Il peut fonctionner à Co-ou contre-courant.

Un système d'**extrusion** ou de **granulation** divise le solide à l'entrée. L'air chaud circule à la surface de la boue pendant que le sécheur est en rotation. L'intérieur du tambour est muni d'organes divers assurant le brassage et la progression du solide dans le four. Il peut s'agir d'un jeu d'ailerons, de fléaux et de palettes ou de chicanes, ou bien encore d'un rotor interne qui malaxe la boue (Fig19).

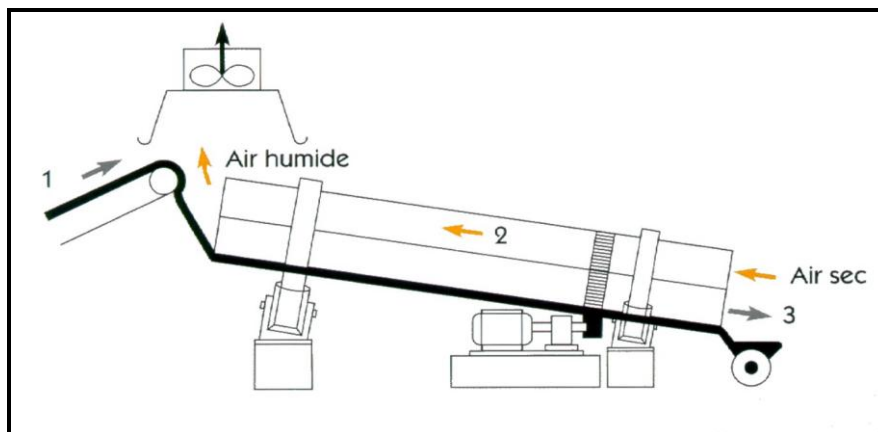


Fig. 19 : Tambour rotatif de type direct. 1. Entrée du produit humide ; 2. Léchage d'air chaud ; 3. Sortie du produit sec (Ademe et al. 2000).

I.2.1.2 Sécheurs indirects (sécheurs Tambours rotatifs)

La boue est séparée de la source de chaleur qui est constituée de parois chauffées par un fluide caloporteur.

Ils sont constitués d'un cylindre tournant dont l'axe est légèrement incliné par rapport à l'horizontale pour favoriser l'avancée des boues. La rotation lente du tambour partiellement rempli assure le renouvellement du produit sur la surface d'échange. (Fig. 17)

Il existe d'autres types des sécheurs indirects tels que les sécheurs à couche mince, les sécheurs à disques et les sécheurs à palettes

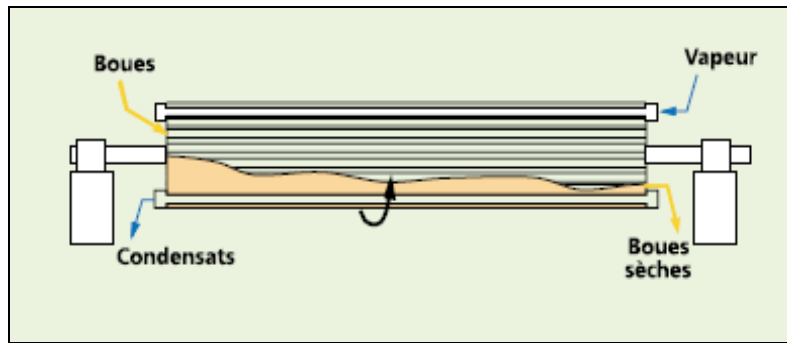


Fig. 20 : Tambours rotatifs

I.2.2 Considérations énergétiques

Le coût énergétique du séchage est de l'ordre de 800 à 1000 kWh par tonne d'eau extraite.

Le coût rapporté à la tonne de matière sèche de boue se situe entre 2300 et 3050 DH selon les sources.

En termes d'investissements, l'utilisation du sécheur indirect est indiquée pour de faibles capacités évaporatoires. Par contre, l'emploi d'un sécheur direct se révélera judicieux pour des capacités évaporatoires élevées, de l'ordre de 3 à 4 tonnes d'eau par heure.

I.2.3 Avantages et inconvénients des sécheurs

Les sécheurs directs et indirects possèdent à la fois des inconvénients et des avantages qui sont repris dans le Tableau ci dessous (OTV, 1997 ; Ferrasse, 2000) (Tab.4).

	SÉCHEUR DIRECT	SÉCHEUR INDIRECT
AVANTAGES	<ul style="list-style-type: none"> -Simplicité de la technologie -Absence de pièces en mouvement -Robustesse -Mise en forme aisée -granulation ou extrusion -Faibles temps de séjour - Peu de sensibilité à la siccité Initiale 	<ul style="list-style-type: none"> -Simplicité des périphériques - Plus facilement sécurisable - Faibles débits gazeux à traiter -Confinement des buées et odeurs
INCONVENIENTS	<ul style="list-style-type: none"> -Complexité des périphériques -Contrôle des odeurs -Risques d'explosions 	<ul style="list-style-type: none"> - Technologie complexe - Temps de séjour plus long - Capacité évaporatoire limitée (4 T d'eau /h) - Problèmes lors du passage à l'état pâteux de la boue : croûtage, pannes, dysfonctionnement

Tab. 4 : Avantages et inconvénients des sécheurs directs et indirects

I.3 Intérêts de Séchage

Le séchage s'intègre à toutes les grandes voies de traitement des boues. Ses principaux intérêts sont :

- Réduction de la masse et du volume mais attention à la masse volumique,
- Meilleure image et perception seulement si les boues séchées sont de structure granulaire sans excès de poussières,
- Large accès aux filières : agronomique et surtout thermique,
- Favorise le transport et diminue les impacts Environnementaux,
- Améliorer les possibilités de recyclage (Co-incinération en centrale d'énergie, cimenterie, valorisation comme amendement agricole).

I.4 CONCLUSION

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

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

II. Valorisation Agronomique

La valorisation des boues en agriculture par épandage direct ou après traitement spéciale (compostage) .sa justifié par la présence de matière organique et d'éléments fertilisants (azote, phosphore, potassium et calcium) dans ces boues.

II.1 Epandage

L'épandage des boues a pour principal but d'augmenter le rendement des cultures, elles ont la capacité de restituer au sol des éléments structurants et fertilisants pour améliorer les propriétés physiques et chimiques du sol.

Les boues épandues peuvent être liquides, pâteuses, solides, sèches, selon le degré de la siccité qui présente le pourcentage massique de matière sèche dans la boue.

L'apport de boues augmente :

- ✓ la compaction du sol, la stabilité, La perméabilité, la conductivité hydrique, la vitesse d'infiltration de l'eau, d'autres paramètres, tels que la capacité de rétention en eau, la conductivité électrique,
- ✓ De point de vue physique du sol, les boues interfèrent sur la production des espèces herbacées et diminuent, ainsi, le taux d'érosion.

II.1.1 Conditions générales d'épandage

L'épandage de boues ne peut être pratiqué que si celle-ci respectent des règles telles que :

- Innocuité pour l'homme, les animaux, les cultures, les sols et l'eau,
- Il est interdit de pratiquer des épandages à titre de simple décharge,
- Les boues doivent subir un traitement approprié,
- L'exploitant doit établir à ses frais une étude préalable,
- Une solution alternative d'élimination ou valorisation doit être prévue,
- La mise en place d'un dispositif de surveillance de la qualité des boues,
- L'exploitant adresse au préfet une synthèse annuelle des résultats consignés sur le registre,
- Le préfet peut faire procéder à des contrôles inopinés des boues ou des sols,
- Des capacités d'entreposage doivent être prévues pour les périodes inappropriés à l'épandage.

Et pour ce qui concerne les Dispositions techniques d'épandage :

- Les épandages de boues doivent être adaptés aux caractéristiques des sols et aux besoins des plantes,
- Il ne faudra jamais dépasser les capacités d'absorption, ni de provoquer la stagnation prolongée, le ruissellement, ou une percolation rapide des sols.
- L'épandage est interdit dans les cas suivants ;
 - Périodes de gel, neige, forte pluviosité ;
 - Terres irrégulièrement travaillées, prairies inexploitées ;
 - Terrains en forte pente ;

- Sur le site d'anciennes carrières ;
- A l'aide de dispositifs d'aérodispersion produisant des brouillards fins ;
- Des distances minimales doivent être respectées par rapport aux berges des cours d'eau, lieux de baignade, pisciculture, ainsi par rapport aux habitations et établissements publics (Tab.5).

Nature des activités à protéger	Distances d'isolement minimales	Domaine d'application
Puits, forages, sources, stockage pur AEP ou arrosage	35 m 100 m	Toute boue + pente terrain < 7% Toute boue + pente terrain > 7%
Cours et plans d'eau	35 m des berges 200 m des berges 100 m des berges 5 m des berges	Cas général Boues non stabilisées et pente > 7% Boues solides, stabilisées et pente >7% Boues stabilisées, enfouies dans le sol et pente <7%
Immeubles, établissement public	100 m	Cas général
Zones conchylicoles	500 m	Toutes boues

Tab. 5 : les conceptions et gestions des épandages sur différents types de terrain

II.1.2 Modalités pratiques d'épandage

La nature, les caractéristiques et les quantités de boues épandues ainsi que leur utilisation doivent être telles que leur usage et leur manipulation ne portent pas atteinte, directe ou indirecte, à la santé de l'homme et des animaux, à l'état phytosanitaire des cultures, à la qualité des sols et des milieux aquatiques.

- L'épandage de boues ne peut être pratiqué que si celles-ci présentent un intérêt pour les sols ou pour la nutrition des cultures et des plantations. Il est interdit de pratiquer des épandages à titre de simple décharge.

- Les épandages sur les sols doivent être conformes aux mesures arrêtées par les préfets dans les zones vulnérables.

- Les épandages de boues, effectuées sur les parcelles cultivées ou destinées à la culture, doivent être adaptés aux caractéristiques des sols et aux besoins nutritionnels des plantes

La Norme d'utilisation des boues (NF U 44-095) rendu d'application obligatoire le 18 mars 2004 est une première d'une série de projets de normes sur les matières fertilisantes contenant des boues (Tab 6 et 7).

Eléments Traces Métalliques	Valeur limite dans les boues (mg/kg MS)
Cadmium	20
Chrome	1.000
Cuivre	1.000
Mercure	10
Nickel	200
Plomb	800
Zinc	3.000
Chrome+cuivre+nickel+zinc	4.000

Tab. 6 : Teneurs limites en éléments-traces dans les boues

Composés Traces Organiques	Valeur limite dans les boues (mg/kg MS)		Flux maximum cumulé apporté par les boues en 10 ans (mg/m ²)	
	Cas général	Epandage sur pâturages	Cas général	Epandage sur pâturages
Les 7 principaux PCB	0,8	0,8	1,2	1,2
Fluoranthène	5	4	7,5	6
Benzo(b)fluoranthène	2,5	2,5	4	4
Benzo(a)fluoranthène	2	1,5	3	2

Tab. 7 : Teneurs limites en composés-traces organiques dans les boues

II.1.3 Analyses des boues de la STEP

Les tableaux suivants résument les résultats d'un échantillon d'analyses faites sur les boues déshydratées de la STEP (Tab. 8 et 9).

	Echantillon du 25/02/2010		Echantillon du 15/03/2010	
	sur brut	sur sec	Sur brut	Sur sec
Matière sèche (MS)	314	-	306	-
PH (à 25 °C)	8,3	-	8,2	-
Azote (N)	10,34	32,93	10,36	33,86
N-NH ₄	1,319	4,201	1,475	4,82
C/N	7,6		7,7	
Phosphore (P ₂ O ₃)	7,43	23,56	7,83	25,59
Calcium (CaO)	29,05	92,52	29,74	97,2
Magnésium (MgO)	4,43	14,1	4,34	14,18
Potassium (K ₂ O)	1,05	3,35	1,01	3,31

Tab. 8 : Résultats des analyses de valeur agronomique en (g/kg) de la STEP de Marrakech

Les analyses montrent que ces boues sont relativement alcalines, très riches en matière organique. Et ils sont très riches en Phosphore total et en Azote. Vis-à-vis des normes, ces boues d'épuration ont un réel intérêt agronomique pour les sols et les plantes, notamment pour l'azote et le phosphore et aussi pour le calcium (Tab.8).

Eléments Traces Métalliques	Echantillon 15/05/2012	Echantillon 15/03/2010	Valeur limite dans les boues (mg/kg)
	Boues déshydratées (mg/kg)	Boues déshydratée (mg/kg)	
Cadmium	1.14	2,03	10
Chrome	2613.89	269,76	1000
Cuivre	165.17	186,76	1000
Plomb	311.57	175,89	800
Zinc	854.09	723,32	3000
Chrome+cuivre+zinc	3633.15	1357,76	4000

Tab. 9 : Résultats des analyses des éléments de traces métalliques de la STEP de Marrakech

Les analyses des éléments traces métalliques montrent que les teneurs de Cadmium, Zinc, Cuivre et le Plomb dans la boue ne dépasse pas les valeurs limites considérées comme seuil de tolérance dans les sols. Le chrome par contre dépasse deux fois les limites tolérées à cause des eaux issues des unités industrielles (Tab.9). Ces teneurs élevées en chrome rencontrées dans les boues ne favorisent pas leur utilisation en tant que fertilisants car il peut devenir l'un des contaminants alimentaires pouvant affecter la santé de l'Homme.

II.2 Compostage

Le compostage est un processus de décomposition et de transformation de matières organiques présentes dans les boues sous l'action de populations microbiennes diversifiées évoluant en milieu aérobie.

Grâce à ses caractéristiques chimiques, le compost peut assurer en même temps la fertilité et l'équilibre du sol. Il combat efficacement l'érosion et le lessivage des éléments fertilisants en reconstituant la structure de la terre grâce à sa composition riche en humus qui lui confère à la fois la fonction d'amendement organique et d'engrais minéral.

II.2.1 Les différentes étapes de production d'un compost

Dans un premier temps, les boues, sources d'azote, sont mélangées avec des coproduits, sources de carbone comme par exemple les déchets verts, les écorces, de la sciure, etc. Chaque lot de boues est analysé avant d'être mélangé pour vérifier sa conformité réglementaire à un usage agricole.

Dans un deuxième temps, il s'agit d'aérer le mélange de manière à favoriser le développement de champignons et bactéries qui vont dégrader la matière organique.

L'aération est assurée soit par aspiration de l'air au travers du mélange, soit par retournement, soit par les deux simultanément.

La montée en température au sein du mélange témoigne de l'activité biologique intense qui s'y déroule. Ainsi la température peut atteindre 70 à 80 °C pendant une quinzaine de jours, au cours de la phase de fermentation. Elle favorise l'hygiénisation du compost et assure la perte d'eau par évaporation.

Le compost est ensuite stabilisé au cours de la phase de maturation, qui peut durer plusieurs mois. Enfin, il peut être criblé pour éliminer les particules les plus grossières. Le compost est analysé pour caractériser sa valeur agronomique et vérifier sa conformité réglementaire à un usage agricole (Fig. 21).

II.2.2 Paramètres du compostage

Les conditions de bon développement des activités microbiologiques doivent être optimisées et leur suivi est indispensable pour évaluer la bonne conduite du compostage et l'obtention d'un produit final de bonne qualité (humus).

La composition chimique du substrat à composter doit avoir :

- Un rapport carbone sur azote C/N en début de compostage qui se situe dans l'intervalle 20 à 30. Un rapport élevé lié à une teneur faible en azote conduit à un ralentissement de l'activité ou de la croissance des populations microbiennes.
- Le pH est un paramètre qui intervient essentiellement par son rôle sélectif sur la microflore responsable de la décomposition des déchets initiaux. Le pH optimal est de 5,5 à 8.

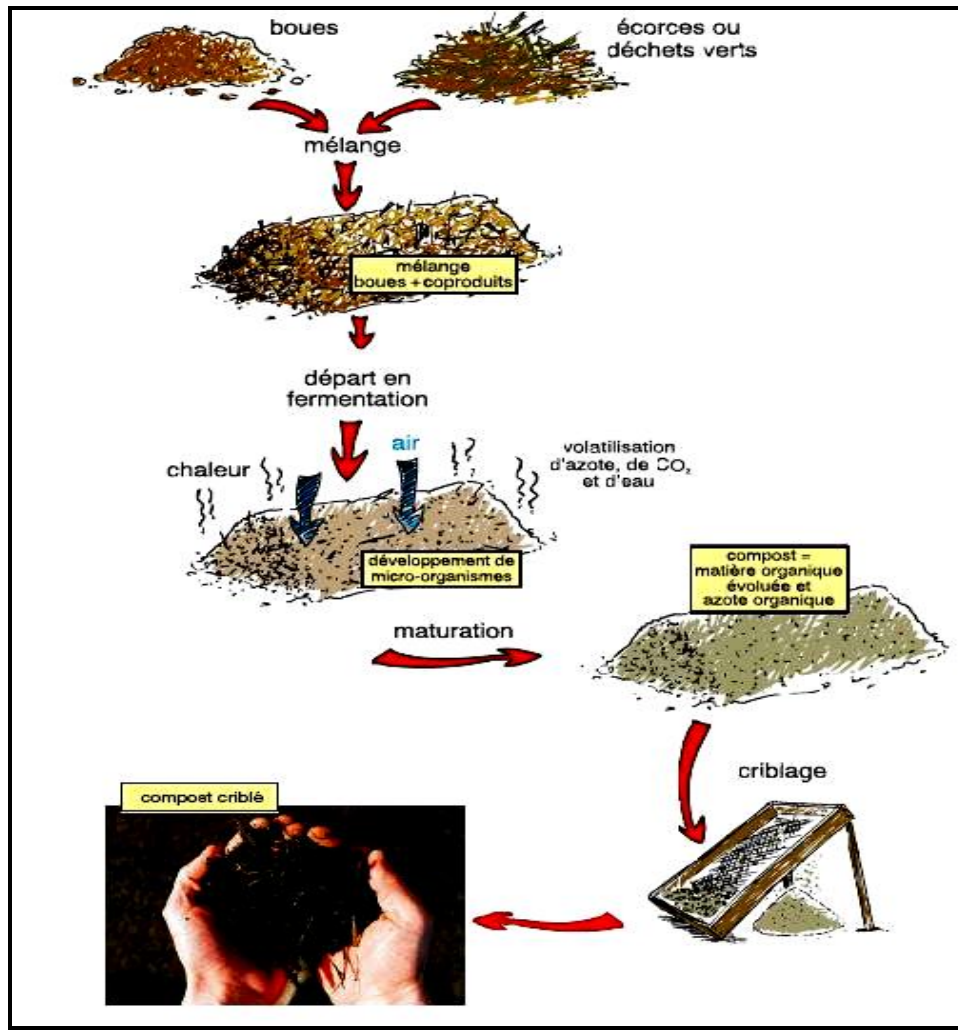


Fig. 21 : les différentes étapes de production d'un compost

Critères microbiologiques et enzymatiques :

L'oxygène est aussi un paramètre important car il intervient au niveau de la respiration des microorganismes et des réactions d'oxydation. Le taux d'oxygène est directement lié au :

- ❖ Pourcentage d'espaces lacunaires (porosité ou vides) dans les matières à composter,
- ❖ la granulométrie des particules, car une granulométrie trop fine, provoque un «étouffement », mais si elle est trop grossière elle provoque un dessèchement dû à des circulations d'air importantes,
- ❖ l'humidité du compost, sachant qu'une teneur en eau trop faible limite le développement microbien, et dans le cas d'une humidité trop élevée, l'eau sature les espaces lacunaires et étouffe les microorganismes.

Récapitulatif des différents critères de stabilité et de maturité d'un compost (Tab.10).

Critères physiques	Odeur, couleur, aspect (terreau homogène), absence de reste végétal ou autres débris non bien décomposés), température.
Critères chimiques	Rapport C/N, capacité d'échange cationique CEC, NO ₃ , NO ₂ rapport NO ₃ /NO ₄ , pH, analyse des substances facilement biodégradables (sucres, acides aminés, phénols etc) et des fibres.
Critères microbiologiques et Enzymatiques	Activité de phosphatase alcaline, indicateurs des microorganismes : phospholipides, mesure de biomasse, métabolisme latent évalué par le taux respiratoire et la capacité d'auto-chauffage.

Tab. 10 : Récapitulatif des différents critères de stabilité et de maturité d'un compost

II.2.3 Avantages du compost de boues

Composter les boues de station d'épuration est une technique qui se développe aujourd'hui, dans la perspective de pérenniser le recyclage des boues. Les motivations sont autant réglementaires et pratiques que sociales.

Les bonnes raisons de composter les boues sont énumérées ci-dessous :

- 1) Le compost de boues est un produit stabilisé, qui ne génère pas d'odeurs lors des chantiers d'épandage,
- 2) Le compost de boues est un produit hygiénisé, du fait de la montée en température au cours du procédé de fabrication (quasi absence de germes pathogènes),
- 3) Le compost de boues est un fertilisant et un amendement,
- 4) Les calendriers d'interdiction d'épandage sont réglementairement moins contraignants que pour les boues brutes dont le compost est issu,
- 5) Le compostage permet de traiter simultanément boues et déchets verts des communes,
- 6) Le compostage diminue les volumes de produit à stocker puis à épandre,
- 7) Le compost de boues est un produit facile à manipuler, car déshydraté et homogène,
- 8) Le recyclage agricole de compost de boues est mieux accepté par les concitoyens.

En ce qui concerne la STEP, une expérience de compostage est menée actuellement pour la fertilisation des espaces verts.

III. Valorisation Energétique

Lorsque leur recyclage s'avère impossible en agriculture, les boues constituent un déchet humide difficile à brûler et à valoriser par voie thermique. La valorisation énergétique regroupe différentes technologies permettant de convertir la fraction organique des boues en énergie. La valorisation énergétique peut être une voie d'élimination complémentaire ou alternative à la valorisation agricole.

Les technologies de valorisation énergétique des boues de station d'épuration permettent de tirer profit de la nécessité d'éliminer et de détruire les boues. La valorisation des boues, sur le site de la station d'épuration, permet d'améliorer le bilan environnemental en diminuant le transport des boues et en produisant une énergie (chaleur, électricité) directement consommée sur la station.

III.1 Méthanisation

La méthanisation ou digestion anaérobie est un processus de minéralisation de la matière organique par une microflore spécialisée. C'est un moyen efficace d'abattement de charge de la matière organique biodégradable. La digestion anaérobie conduit à la formation d'un biogaz riche en méthane et dioxyde de carbone et d'un résidu liquide, le digestat.

La méthanisation se déroule en quatre étapes déterminées par les conditions physico-chimiques. Elle fait intervenir successivement trois groupes bactériens. Elle peut se dérouler dans trois gammes de températures, température qui conditionne la vitesse de réaction, la zone psychrophile pour des températures inférieures à 20°C, la zone mésophile de 20 à 45°C et la zone thermophile de 45 à 65°C.

La digestion des boues comporte quatre phases de fermentation qui se déroulent simultanément dans le bioréacteur :

- **Hydrolyse** : certains micro-organismes libèrent dans le milieu des enzymes capables d'hydrolyser les macromolécules ou polymères en molécules simples ou monomères. Cette hydrolyse permet de rendre biodisponible la matière organique nécessaire à son assimilation dans le métabolisme microbien ;
- **Acidogénèse** : les monomères sont ensuite hydrolysés en acides gras volatils en alcools et en ammonium ;
- **Cétogénèse** : une grande partie des acides gras volatils (AGV) et des alcools est assimilée par les bactéries acétogènes autotrophes pour former de l'acétate. Une autre partie est convertie en hydrogène et dioxyde de carbone ;
- **Méthanogénèse** : le méthane est produit soit à partir de l'acétate (bactéries méthanogènes acétoclastes), soit à partir du dioxyde de carbone et de l'hydrogène (bactéries méthanogènes hydrogénéophiles).

Le biogaz issu de la digestion anaérobie contient principalement du méthane et du gaz carbonique. La proportion de ces deux gaz dépend de la nature du substrat, et précisément de la proportion Carbone - Hydrogène - Oxygène - Azote (CHON)

III.1.1 Valorisation Energétique De Biogaz

La méthanisation est réalisée sur des boues épaissies à une siccité de 3 à 5 %. La digestion anaérobie permet une réduction de 40 à 50 % de la matière volatile des boues. Cette matière organique est convertie en méthane et en dioxyde de carbone. La production de biogaz est de l'ordre de 0,8 à 1,2 Nm³/kg MV détruite. Le biogaz produit contient en moyenne 64 % de méthane. Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) est voisin de 6,4 kWh/Nm³.

Le biogaz peut être valorisé en chaudière ou par cogénération. La chaleur produite peut être utilisée pour le chauffage du digesteur (digestion mésophile à 35°C), mais également pour le chauffage des locaux techniques de la station d'épuration ou pour le conditionnement thermique des boues. Plus rarement, le biogaz peut être valorisé en gaz naturel pour les véhicules. Sinon le biogaz est au minimum brûlé dans une torchère (Fig 22).

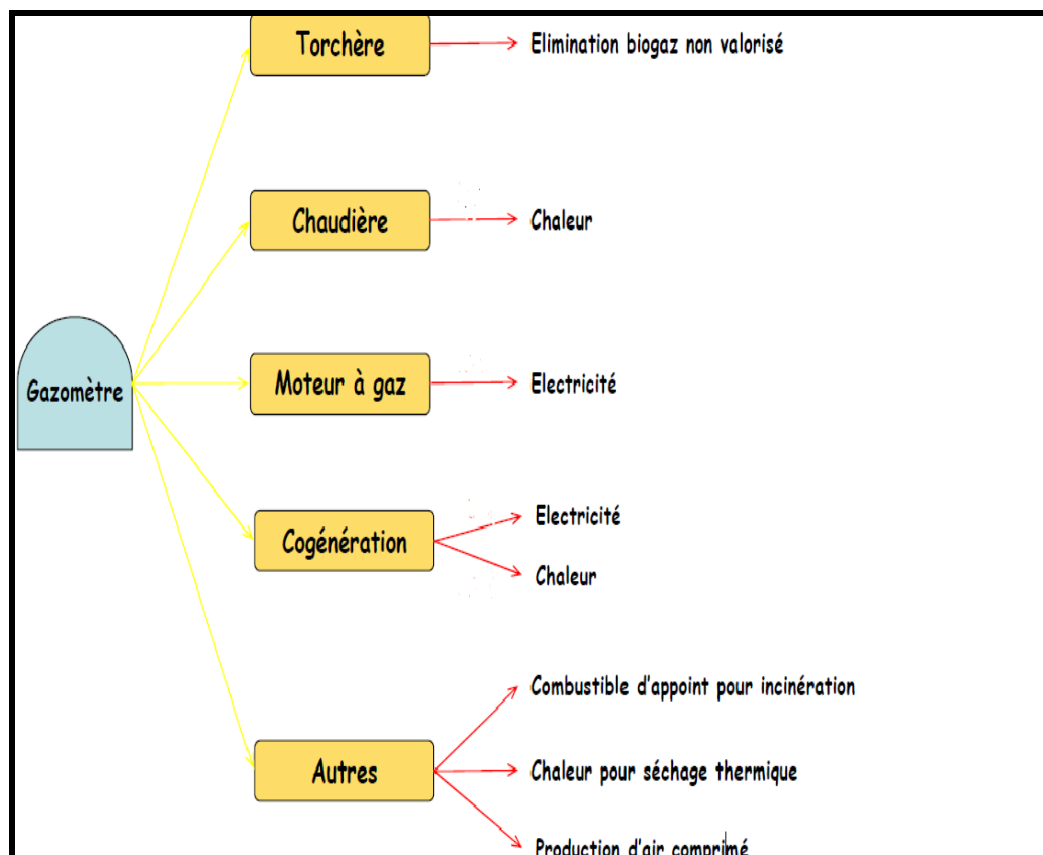


Fig. 22 : Différentes voies de valorisation du méthane

III.1.2 Production de chaleur

Les fours ou chaudières représentent la voie de valorisation la plus simple. En effet, le biogaz est brûlé tel quel, en général sans traitement préalable. L'énergie de combustion est récupérée sous forme de chaleur. La production minimale permettant la valorisation en chaudière dans des conditions économiques acceptables est de 100 Nm³/h.

La chaleur ainsi produite, est en premier lieu utilisée pour maintenir le digesteur à sa température de consigne. En métropole, le surplus est fréquemment utilisé pour le chauffage des locaux ce qui n'est pas une application envisageable pour les stations réunionnaises, vu le climat local. 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).

III.1.3 Production d'électricité

La cogénération est la production simultanée d'électricité et de chaleur. La production d'électricité est réalisable à partir de moteur à combustion interne ou moteur à gaz, de turbine à vapeur, de turbine à combustion et plus récemment à partir de piles à combustible. La production de la chaleur est réalisée par récupération de l'énergie thermique dégagée lors de la réaction de combustion du gaz (Fig. 4, annexe 1).

Remarque : La production d'électricité au niveau de la STEP de Marrakech alimente 50 % des besoins de la station.

Il existe des 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.

III.2 Pyrolyse

La pyrolyse (ou thermolyse) est une dissociation thermique de la matière organique et de la matière minérale, en l'absence d'oxygène (moins de 2 %), sous l'action de la chaleur (400 à 800°C). Il s'agit donc d'un traitement thermique sans combustion et endothermique.

Selon les conditions de la réaction (température, pression partielle en oxygène, pression totale), la fraction organique se décompose en gaz, huiles et résidus solides carbonés. Les

faibles températures favorisent la production d'huile par rapport au gaz. Ces produits seront récupérés en sortie du procédé, dans le but d'être valorisés (Fig. 23)

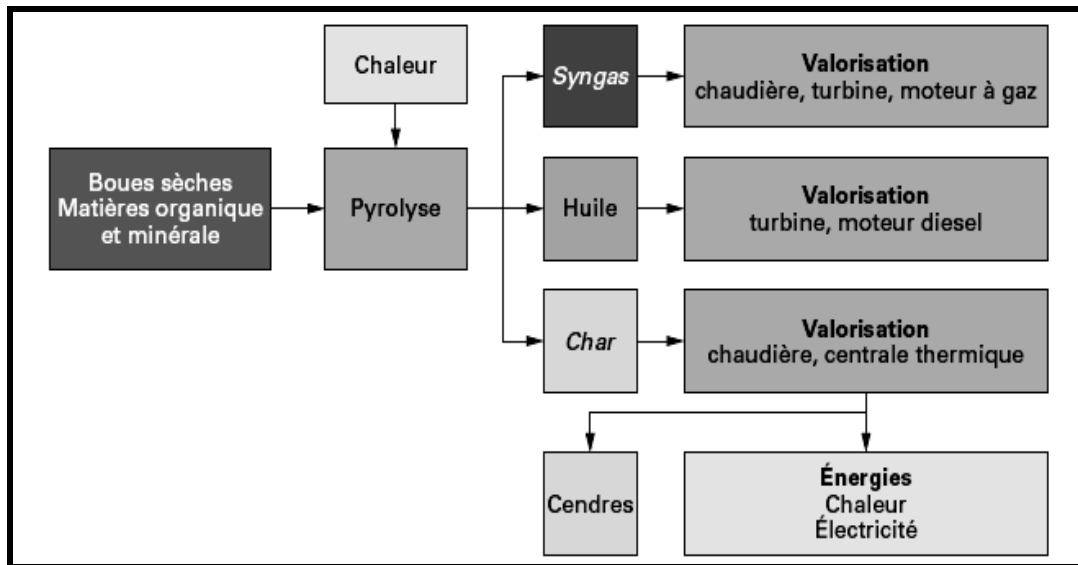


Fig. 23 : Représentation schématique de la pyrolyse

III.2.1 Valorisation des produits

La pyrolyse conduit à une décomposition de la matière en différents produits (gaz, huiles, charbon). Les rendements de formation de ces produits sont très variables selon les technologies de pyrolyse. Certains procédés ne produiront que du gaz, d'autres produiront une grande quantité d'huile.

III.2.2 Gaz de synthèse

Le gaz de synthèse produit par pyrolyse est généralement constitué d'un mélange de composés organiques volatils plus ou moins lourds, de méthane, d'hydrogène, de dioxyde et monoxyde de carbone et d'eau provenant en grande partie de la fraction humide du déchet. Le gaz après traitement peut contenir encore de nombreux composés organiques volatils (huile ou goudron). Le plus souvent, il est valorisé dans une chaudière pour le séchage des boues ou directement dans le réacteur de thermolyse pour fournir l'énergie nécessaire à la dissociation thermique (figure2, annexe1).

III.2.3 Huile

L'huile est produite par condensation d'une fraction des gaz de synthèse. L'huile est un produit intéressant car elle permet un stockage de l'énergie qui peut être utilisé dans une turbine à combustion ou un moteur diesel. Le découplage entre la production de cette huile et

la production d'énergie permet d'envisager cette solution pour l'effacement des pointes de consommation (tarification élevée) (Fig.3, annexe1).

III.2.4 Résidu carboné

Le résidu carboné est un matériau relativement proche d'un charbon pauvre qui contient de 10 à 40% de carbone. Il peut être valorisé dans une chaudière classique pour la production de chaleur nécessaire au séchage des boues. Le résidu final est alors constitué de cendres volantes issues de la combustion du charbon. Le résidu carboné peut également être envoyé en centrale thermique ou en cimenterie pour une valorisation.

IV L'incinération

Elle réalise la destruction de la matière organique des déchets par combustion à haute Température (+ de 500 °C) produisant des fumées et des matières minérales résiduelles Nommées cendres. Dans l'objectif d'une valorisation énergétique des déchets, la chaleur Produite est récupérée sous forme de vapeur ou d'électricité pour le fonctionnement du four Lui même, pour le chauffage urbain ou industriel. Les résidus de l'incinération (Mâchefer) sont utilisables pour les travaux publics.

Les boues peuvent être incinérées sous diverses formes :

- **Co-incinération avec les ordures:** La Co incinération peut s'effectuer avec des boues séchées (60 à 90 % de siccité) ou avec des boues pâteuses (20 – 25 % de siccité),
- **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 Caractérisée par 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. Cette incinération est Réservée à des stations de grande capacité (> 100 000 EH).

Remarque : L'incinération ne peut être pratiqué que sur des boues ayant déjà subi un premier stade de déshydratation.

IV.1 Installation d'incinération

L'atelier d'incinération se compose de différents blocs ce qui demande un espace assez grand (Fig. 24)

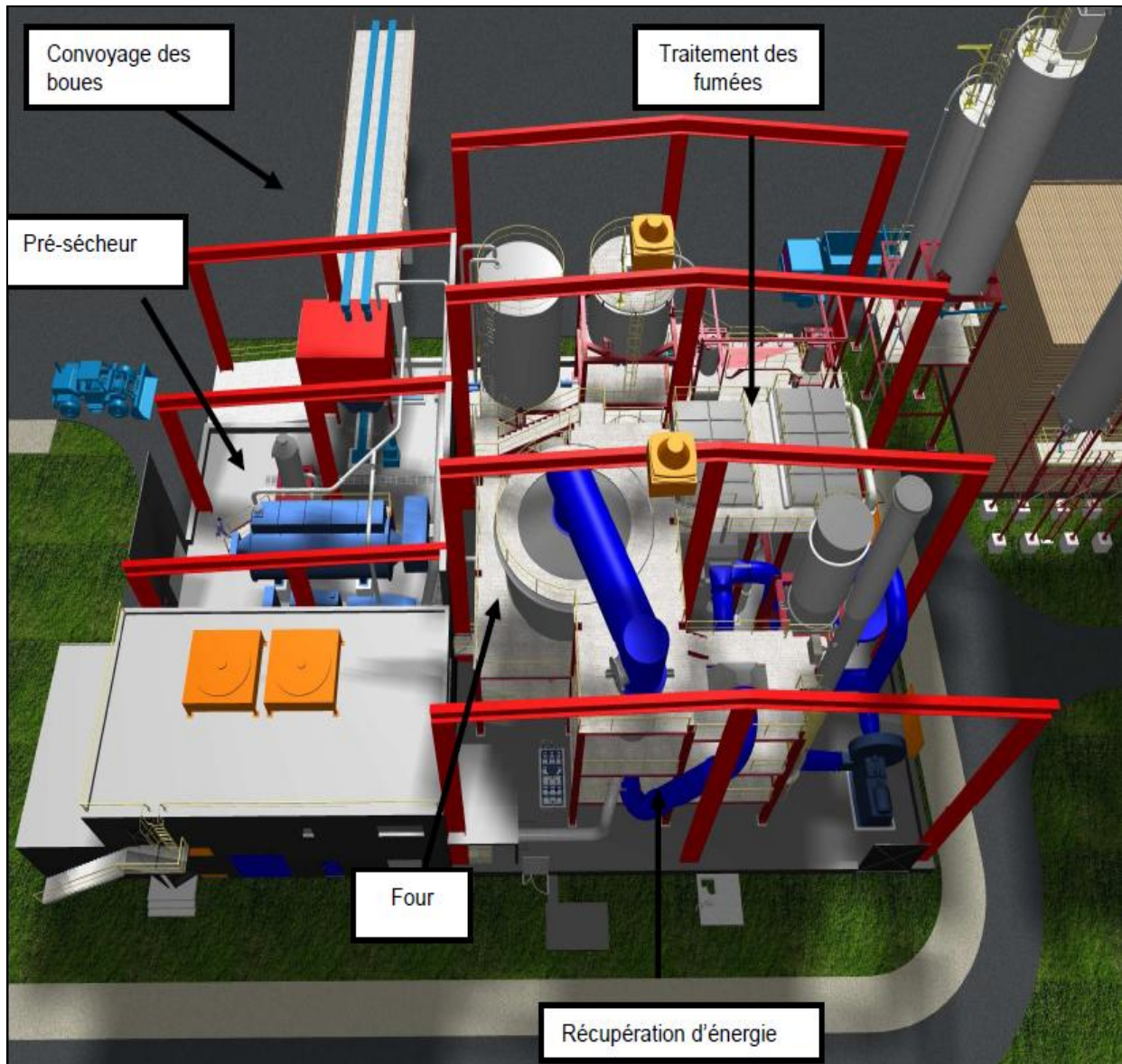


Fig. 24 : Atelier d'incinération des boues

IV.1.1 Convoyage des boues

Les boues seront directement convoyées des unités déshydratation de la STEP vers l'unité d'incinération à l'aide de vis sans fin ou transporteur à bandes. L'unité d'incinération possède ensuite une trémie de réception. Les boues dépotées dans cette trémie sont stockées dans un silo. Compte tenu de la siccité des boues (23 à 25%) et de la faible distance entre les pompes et le Sécheur, des pompes à rotor excentré sont sélectionnées.

IV.1.2 Pré-séchage des boues

L'étape de pré-séchage (fig.25) permet d'économiser de l'énergie pendant l'étape d'incinération. En effet, la boue sera séchée de manière à atteindre des conditions d'auto-

thermicité, c'est à dire qu'il ne sera pas nécessaire d'injecter du gaz ou du fuel supplémentaire pour assurer la combustion.



Fig. 25 : Un pré-sécheur

IV.1.3 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 fours à rouleaux.

IV.1.3.1 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.1.3.2 Fours à rouleaux

Ils sont constitués de gros rouleaux à fonctionnement autonome qui tournent dans le sens de l'inclinaison du four. L'air est injecté par l'intérieur des rouleaux. La surface de combustion est alors plus grande que dans les fours à grille traditionnels. Ils sont utilisés dans des installations de capacité moyenne à forte.

IV.1.3.3 Fours à lits fluidisés

Le four maintient les déchets en suspension, en général au sein d'une masse de produits inertes (sable), grâce à un système d'injection d'air à la base de la chambre de combustion (fluidisation du lit). Le mouvement du lit entraîne un brassage des déchets et la présence d'inertes facilite l'homogénéisation de la température du four. Il existe plusieurs types de fours à lit fluidisé : le lit fluidisé dense, le lit fluidisé rotatif et le lit fluidisé circulant. La différence réside dans la forme des fours, le type d'injection d'air (central, latéral, à grande vitesse...) et le mouvement des particules.

Le four se divise en trois zones : une boîte à vent, un lit de sable et une revanche. Le terme "lit fluidisé" vient de l'action violente de bouillonnement du lit de sable qui se produit sous l'effet de l'air soufflé par en-dessous. Pour garantir le débit régulier de l'air à travers le sable, il traverse au préalable la boîte à vent et l'arche réfractaire, par des buselures qui assurent la distribution homogène de l'air. Pour profiter totalement d'un mélange idéal, la boue déshydratée, et lorsque c'est nécessaire le fuel d'apport, sont injectés directement dans le lit de sable, et instantanément brûlés à 680°C. Ensuite, le gaz de la combustion et la vapeur d'eau montent à travers une revanche en forme de goutte d'eau, en se débarrassant du sable. Le fonctionnement à une température de 850°C et le temps de séjour permettent de laver le gaz et d'achever la combustion. L'enchaînement de turbulence, temps, température, fait de l'incinération par lit fluidisé la méthode d'élimination des boues la plus économique et la plus respectueuse de l'Environnement. Le système de contrôle de la pollution de l'air du four se fera par voie humide.

Le gaz d'échappement quitte le lit fluidisé pour les systèmes de récupération de chaleur et de contrôle de pollution de l'air ; selon la nature des boues, le système de récupération de chaleur se compose, soit d'un échangeur primaire pour préchauffer l'air de combustion ou le gaz, soit d'une chaudière produisant de la vapeur. Dans les deux cas, la récupération de chaleur permet de réutiliser l'énergie pour des économies de coûts substantielles (Fig. 26).

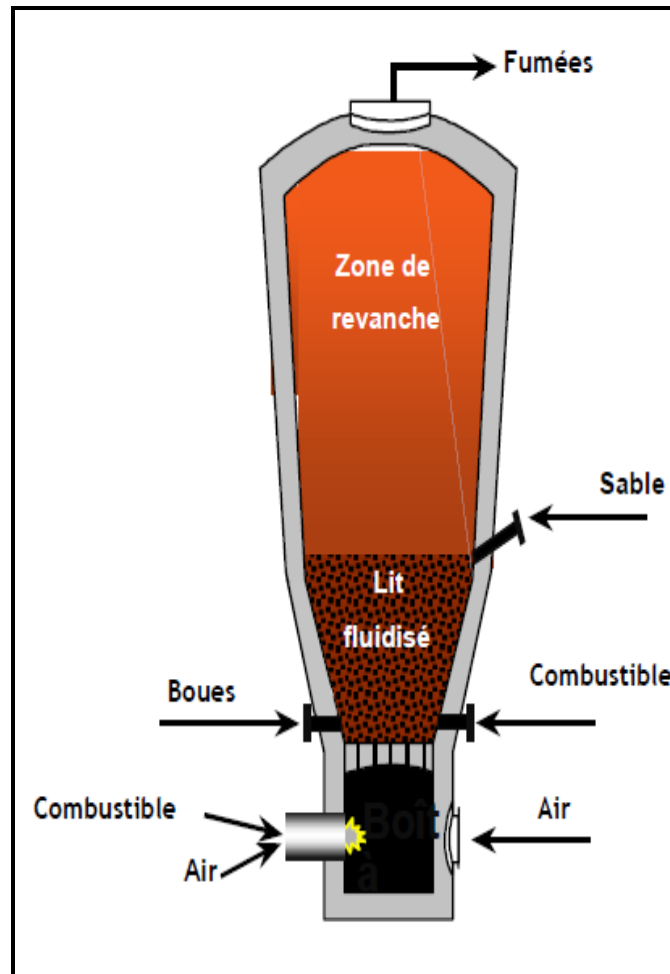


Fig. 26 : Coupe schématique d'un four à lit fluidisé

IV.1.4 La récupération d'énergie

Le processus d'incinération des boues, qui produit les cendres, permet aussi de récupérer la chaleur pour chauffer le centre en hiver et en été, cette chaleur est transformée en eau glacée pour permettre la climatisation des espaces administratifs du centre.

IV.1.5 Traitement des fumées

Dans ce bloc se retrouvent tous les dispositifs de traitement des fumées

IV.1.5.1 Dépoussiérage

L'objet du dépoussiérage est d'éviter le rejet dans l'atmosphère de quantités importantes de Poussières et d'éviter ainsi leur retombée sur les zones urbanisées.

IV.1.5.2 Neutralisation des gaz

La neutralisation des gaz utilise le plus souvent la technologie d'absorption sèche, par voie

Humide ou combinée. Le traitement des émissions gazeuses par la méthode d'absorption par voie humide consiste à neutraliser les contaminants à l'aide d'un liquide d'épuration (souvent l'eau). Ce liquide d'épuration, dont la nature varie en fonction des contaminants à traiter, est mis en contact avec les émissions gazeuses. Les contaminants sont alors captés par le liquide et extraits de l'effluent gazeux. À la sortie du système, les eaux d'épuration peuvent être rejetées dans le réseau d'égout municipal ou, si leurs caractéristiques l'exigent, dirigées vers un système de traitement.

IV.1.5.3 Traitement des dioxines et furanes

Ce traitement consiste à l'injection de charbon actif dans les fumées qui est le plus utilisé. Les contaminants sont adsorbés dans la matrice du charbon

IV.1.5.4 Traitement des oxydes d'azote

Le traitement des oxydes d'azote peut se faire par voie catalytique (exemple peau D'échappement des automobiles) ou par d'autres techniques innovantes (domaine récent).

IV.1.5.5 La dispersion des fumées

Les fumées traitées (dépoussiérage, neutralisation, etc) contiennent encore, dans les limites de la réglementation certaines poussières non captées par les filtres et des éléments chimiques polluants. L'atténuation de la pollution au stade d'éjection est basée sur la dispersion.

Le rôle de dispersion est assuré par **la cheminée** en plus de son rôle d'extraction des gaz vers l'extérieur. La dispersion dépend essentiellement de la hauteur de la cheminée, de la vitesse d'éjection des fumées et des conditions atmosphériques. Dans la conception des cheminées il s'agit de déterminer la hauteur minimale en fonction de la concentration maximale de poussières admises au sol.

IV.2 Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique est une mesure de la quantité d'énergie dégagée par la combustion d'un échantillon solide ou liquide. Cette valeur est essentielle lorsque l'efficacité thermique d'un échantillon est prise en considération. Selon le Règlement sur les matières dangereuses, les huiles usées ou les matières dangereuses résiduelles autres que les huiles usées peuvent être utilisées à des fins énergétiques si leur pouvoir calorifique est d'au moins 18 500 kJ/kg.

IV.2.1 Unités

Le pouvoir calorifique donne une valeur d'énergie contenue dans une unité de masse du combustible. L'unité SI est le J/g, l'unité la plus généralement utilisée dans la littérature est le kcal/kg et pour le bois énergie le kWh/tonne.

IV.2.2 Mesure de la pouvoir calorifique des boues

Le pouvoir calorifique de l'échantillon est mesuré par l'équation suivante :

$$PC = C (m + \mu) \cdot (T^{\circ}f - T^{\circ}i) - q$$

C : capacité calorifique de l'eau (C= 1cal/g °C)

m : masse de l'eau (m=1800g)

μ : la valeur en eau du calorimètre est ($\mu=552.01$ g)

q : la chaleur d'oxydation du fil d'alumag q= (17,6 cal/kg)

T[°]f : température finale maximum de l'eau dans le réservoir après la mise à feu (°C)

T[°]i : température initiale de l'eau dans le réservoir avant la mise à feu (°C)

IV.2.3 Détermination du pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique est déterminé en brûlant une quantité d'échantillon connu dans une bombe calorimétrique contenant un excès d'oxygène sous pression et il est calculé à partir de la variation de la température observée durant la combustion de l'échantillon (Fig. 27)

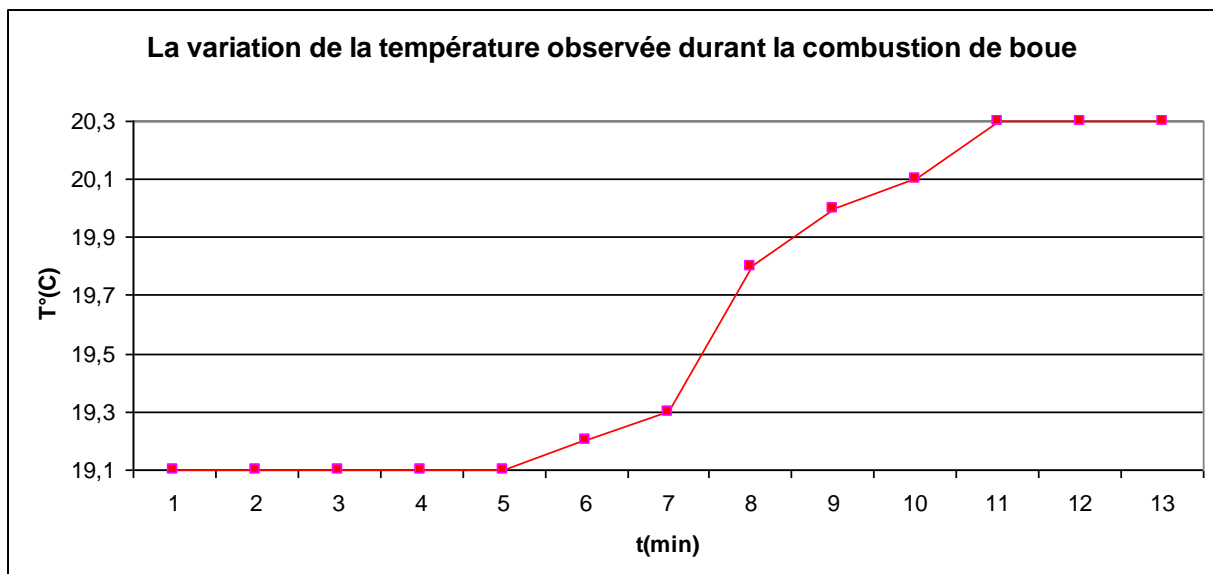


Fig. 27 : les variations de la température observée durant la combustion de boue

A partir de cette courbe on trouve que $(T^{\circ}f - T^{\circ}i)=1.2^{\circ}C$ donc le pouvoir calorifique des boues de la STEP est :

$$PC= 1*(1800+552,01)*(1,2)- 17,6$$

$$\text{Soit } PC= 2804,812 \text{ cal/kg}$$

On constate donc que la quantité d'énergie dégagée par la combustion d'un échantillon de boue de la station d'épuration de Marrakech est moyennement intéressante.

IV.3 Valorisation des résidus d'incinération

Les résidus d'épuration des fumées d'incinération de déchets comprennent essentiellement :

- les cendres volantes,
- les résidus de neutralisation des fumées,
- les gâteaux de filtration des eaux de lavage des fumées,
- les cendres sous chaudière.

Les destinations finales envisageables pour l'évacuation des cendres sont :

- valorisation en Techniques routière et travaux publics.
- valorisation en Matériaux de construction.
- mise en décharge pour déchet non dangereux.

IV.3.1 Valorisation en Techniques routière et travaux publics

Les mâchefers sont essentiellement utilisés en couche de forme (ronds points, parking, autoroute) ou remblai (bords d'autoroute, remblais de quais, comblement de mines) pour des chantiers nécessitant des quantités importantes. Les intérêts de ce matériau sont : la prise hydraulique naturelle, la granulométrie constante en sortie d'incinération, la portance élevée et une teneur en eau optimale.

IV. 3.2 Valorisation en matériaux de construction

Une technique de valorisation des mâchefers consiste à en substituer 50 % en masse aux matières premières lors de la fabrication de ciments.

Les mâchefers peuvent aussi être utilisés en substitution partielle dans la fabrication de carreaux de grès (**carrelage**).

V. Conclusion

Il existe donc une grande variété de techniques permettant une valorisation énergétique des boues de stations d'épuration. Certaines sont très largement utilisées, alors que d'autres restent ponctuelles et ne bénéficient pas encore suffisamment de retour d'expérience.

Néanmoins, toutes ces techniques ont en commun l'avantage de contribuer à la réduction de l'utilisation d'énergie fossile, de fournir un débouché pour la gestion des boues de STEP et la production d'énergie.

Toutefois, le choix de ces filières devra se faire au cas par cas en fonction de la qualité des boues, de la taille de la station d'épuration, du contexte local et des aspects socio-économiques, environnementaux, techniques.



TROISIEME PARTIE

Les aspects socio-économiques, environnementaux et Techniques

I. Aspect environnementaux

I.1 Valorisation énergétique

La valorisation énergétique est un procédé qui permettant de valoriser des matières organiques en produisant une énergie renouvelable (electricite, chaleur).

D'un coté La valorisation énergétique (méthanisation ou pyrolyse) des boues participe de manière évidente à la protection de l'environnement. Car Elle contribue à l'économie d'énergie fossile et limite les émissions de gaz à effet de serre et des odeurs (CH₄ a un effet de serre 21 fois plus grand que le CO₂).Elle empêche aussi l'oxydation de certaines molécules au fort impact environnemental (destruction de : 87% de dioxines ,90%furanes, 75%PCB).

D'un autre coté ce procède devient néfaste pour l'environnement a cause de :

- Emission de H₂S à effet de serre.
- Lavage du coke (500 litres d'eau/tonne de déchets) : déplacement de la pollution atmosphérique (dioxines) vers le sol et les nappes phréatiques.

I.2 L'incinération

L'incinération est un traitement basé sur la combustion avec excès d'air qui minimiser les consommations de ressources énergétiques et certains impacts environnementaux (Tab.11)

	AVANTAGE	INCONVINIENTS
incinération	<ul style="list-style-type: none"> - Diminution de la consommation d'énergie fossile par récupération de la chaleur dégagée par l'incineratio - Limitation de l'extraction de la matière première naturelle (sable, argile,...) par valorisation des cendres et des résidus solides dans la construction, technique routière - Réduction du volume des déchets de 80 90 % 	<ul style="list-style-type: none"> - Emission de NOx et de mercure malgré le traitement des fumées - Rejet de CO2 plus élevé que la méthanisation environ une tonne de CO2/t boues traitée, et de SO2 malgré le lavage de fumées

Tab. 11 : les aspects environnementaux d'incinération

I.3 Valorisation agronomique

La valorisation au sol des boues (compost) de bonne qualité entraîne des bénéfices Environnementaux qui sont largement reconnus et peuvent être regroupés en trois catégories :

- **Amélioration des propriétés physiques des sols**

Le compost accroît la capacité de rétention en eau et aide la conservation de l'eau dans le sol. Il améliore l'aération (porosité), la stabilité structurale, la résistance à l'érosion (hydraulique, éolienne), la pénétration des racines et la stabilisation de la température des sols.

- **Amélioration des propriétés chimiques des sols**

Le compost augmente la teneur en éléments fertilisants (majeur et oligoéléments), la disponibilité de substances minérales, favorise la stabilité du pH et fournit une source de nutriments à long terme en agissant comme réserve fertilisante dans les sols.

- **Amélioration des propriétés biologiques des sols**

Le compost stimule l'activité bénéfique des microorganismes du sol, réduit les risques d'infestations parasites ou pathogènes (effet supprimeur de maladies), favorise le développement racinaire et de meilleurs rendements de culture. Le compost réduit la dépendance aux pesticides, herbicides et fongicides en contribuant à créer un milieu riche en matière organique.

II. Aspect techniques et économiques

II.1 Valorisation énergétique

Les aspects techniques des procédés de la valorisation énergétiques sont essentiellement :

- la réduction des quantités de boues à traiter (moins de rejet des déchets).
- Réduction du volume des boues.
- Inadaptation aux grandes STEP (technique de pyrolyse)
- Inadaptation aux petites STEP (technique d'incinération)
- Facilité de mise en œuvre de nouvelles installations sur les incinérateurs existants.

Et pour l'aspect économique de ces procédés est très variable selon la technique utilisée et la capacité de la STEP (EH).

Par exemple la méthanisation, les coûts d'investissement de la procède de est compris entre 500et1000€/t MS pour 100000 EH. Et son cout d'installation est élevé, mais amortis sur le moyen terme par valorisation du biogaz. Elle permet aussi de réduire le cout de transport grâce à la reduction de la quantité des boues.

Et pour ce qui concerne l'incinération, les couts d'investissements varient évidemment en fonction des équivalents habitants (EH).ces prix s'établissent entre 487 à 609 €/t MS pour 300000 EH.et 350 à 487€/t MS pour 500000 EH.

Pour le Budget d'installation d'incinération est de **165 Mdh** la Part d'équipements et **35 Mdh** la Part de Génie Civil (water eau).

II.2 Valorisation agronomique

Le cout d'investissement pour l'élimination agricole dépend de type des boues (liquide ou compostées) et de la taille de la station(EH) (tab.12)

Taille des Stations(EH)	Cout selon les modes d'élimination (dh/T Ms)	
	épandage	compostage
3000 à 10 000	3810 à 6400	–
50000 à 100000	3200 à 4110	–
100000 à 300000	2740 à 3200	3960 à 4570
300000 à 500 000	2590 à 2740	3500 à 3960

Tab.12 : Les couts d'investissement des modes d'éliminations agricole des boues

A Partir de se tableau on peut retenir :

Que l'épandage et le compostage agricole est un mode économiquement favorable pour toutes les stations mais son coût est particulièrement élevé pour les petites stations.

II.3 Etude de faisabilité économique d'installation d'incinération

Le tableau ci-dessous illustre les dépenses fournit par la RADEEMA pour l'évacuation des boues au niveau de la décharge publique. (Tab.13)

Production des Boues	150 t/J
Location de décharge	4000DH/Mois
Mise en décharge	300DH/Voyage
Nombre de voyages	16 V/J
Nombre de jours de Fonctionnement	365j/an
Cout de transport (28V)	1500DH

Tab. 13 : Données des coûts d'exploitation relatives à la STEP de Marrakech

A partir de ces données on peut calculer combien d'argent la RADEEMA peuvent exploiter chaque année :

$$((4000*12) + (300*16) + (209*1500))=2112000 \text{ DH}$$

On constate donc que l'installation d'incinération au niveau de la STEP Peut économiser plus que **2112000 DH** chaque année pour la RADEEMA.

CONCLUSION GENERALE

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

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

Les analyses des éléments métalliques des boues de la station d'épuration de la ville de Marrakech montrent que l'élimination agricole des boues actuellement présente un risque pour les sols et les nappes à cause de la teneur élevée en chrome.

La valorisation agricole des boues sera la meilleure voie sur le plan économique grâce à la répartition des terrains agricole dans la région El 'Haouz de superficie totale d'environ 663300 ha selon l'ORMVAH grâce au projet MOROCOMP qui s'intéresse Particulièrement à la production et la gestion des boues produites au niveau des stations d'épuration. Les boues seront valorisés par compostage et produits utilisables comme fertilisants pour la production agricole.

Le domaine agricole reste la meilleur solution pour se débarrasser des boues mais à conditions qu'elles répondent aux normes internationales et en contiennent pas de polluants qui peut contraindre la vie de la population.

Dans le cas de la ville de Marrakech il suffit de faire un traitement spécifique pour réduire les fortes teneurs en chrome en amont avant d'être acheminé vers la station d'épuration.

L'incinération est un procédé qui permet la valorisation énergétique de tout le carbone présent dans les résidus à traiter, et non pas seulement de la fraction organique biodégradable. Mais il présente des contraintes principalement liées à un investissement très coûteux. Cette technique reste aussi néfaste de point de vue écologique et environnemental puisqu'elle contribue en plus du gaspillage de matières organiques utiles pour le sol, à la diffusion de gaz très toxiques et surtout à effet de serre.

Bibliographie

- BREF, (2006)- Document de référence sur les meilleures techniques disponibles- Incinération des déchets, 231p.
- AIT AYANE et DOUNIA, (2009)- Assainissement liquide de Marrakech Valorisation agricole énergétique des boues issues de l'épuration des eaux usées de la ville de Marrakech. Mémoire de stage de fin d'étude, Université Cadi Ayyad, FSTM, 63p.
- RAYAN SLIM, (2007)- Etude et conception d'un procédé de séchage combiné de boues de stations d'épuration par énergie solaire et pompe à chaleur. Thèse de doctorat, l'Ecole des Mines de Paris, 145p.
- ITOUNI et LACHHEB, (2011) - Valorisation des boues déshydratées de la station d'épuration des eaux usées de Marrakech. Mémoire de fin d'étude. Université Cadi Ayyad, FSTM, 57p.
- RADEEMA, (2011) - Traitement secondaire et tertiaire et Traitement des boues et du biogaz Traitement de l'air vicié, document PDF.
- EL HORRE, (2009) - Le Projet d'Assainissement de la RADEEMA et la Problématique Environnementale de Marrakech. Mémoire de fin d'étude, Université Cadi Ayyad, FSSM, p79.
- RADEEMA, (2011) - Marrakech Incinération. Document d'étude préliminaire, 27p.
- JULIEN BERTHOLON, (2002) – Les déchets solides de l'incinération des ordures ménagères. Tuteur de mémoire de fin de cycle, Université de Cergy-Pontoise, 38p.
- Ferrasse, J.-H., 2000. Développement d'outils expérimentaux pour le dimensionnement de procédés de séchage conducteur avec agitation : application à des boues de stations d'épuration urbaines, Thèse de doctorat, Centre Energétique & Environnement, Ecole des Mines d'Albi Carmaux.
- Brison.C, Perret J.M.,CanlerJ.P., 2010. «Le séchage solaire des boues : Etat actuel de l'art et retours d'expérience» pages (15-22) et pages (28-33).
- AMADOU.H, 2007. «Modalisation de séchage solaire sous serres des boues de station d'épuration urbains. (page 51)
- CSEC (1994). Réutilisation des eaux usées en agriculture.
- ADEME, et CETIAT, Les procédés de séchage dans l'industrie, ADEME et CETIAT, eds; ADEME Editions : Angers (2000).
- OTV, Traiter et valoriser les boues, Infinities Communication : Rennemoulin (1997).
- Numrich, R., et Brown, B. W., "Sludge drying with mechanical vapour recompression," UTA International, 2, 126-130 (1997).

Listes des figures

Fig.1 : Evolution des eaux usées urbaines au Maroc.....	5
Fig.2 : Situation géographique de la STEP de la ville de Marrakech (RADEEMA).....	7
Fig.3 : Modèle de STEP avec les trois filières.....	9
Fig.4 : Schéma d'une station d'épuration.....	10
Fig.5 : Etape de prétraitement	11
Fig.6 : Coupe longitudinale d'un décanteur	12
Fig.7 : Etape du traitement secondaire.....	13
Fig.8 : Décantation secondaire.....	14
Fig.9 : Traitement tertiaire.....	15
Fig.10 : Chaîne de la ligne biogaz.....	16
Fig.11 : Schéma des différents types de boues dans un procédé de traitement par boues activées.....	19
Fig.12 : Chaîne de traitement des boues.....	21
Fig.13 : Coupe longitudinal d'un épaisseur gravitaire.....	23
Fig.14 : Coupe longitudinal d'un digesteur anaérobie.....	25
Fig.15 : Schéma explicatif du processus de la digestion anaérobie.....	25
Fig.6 : Filtre a bandes.....	26
Fig.17 : Serre ouverte.....	31
Fig.18 : Serre fermée.....	32
Fig.19 : Tambour rotatif de type direct.....	33
Fig.20 : Tambours rotatifs.....	34
Fig.21 : Les différentes étapes de production d'un compost.....	41
Fig.22 : Différentes voies de valorisation du méthane.....	44
Fig.23 : Représentation schématique de la pyrolyse.....	46
Fig.24 : Atelier d'incinération des boues (watereau).....	48
Fig.25 : Un pré-sécheur.....	49
Fig.26 : Coupe schématique d'un four à lit fluidisé.....	51
Fig.27 : Les variations de la température observée durant la combustion de boue.....	53

Liste des tableaux

Tab.1 : Débit à traiter au niveau de la station.....	8
Tab.2 : Les avantages et les inconvénients d'une serre ouverte (Brison et al, 2010).....	31
Tab.3 : L'avantage et l'inconvénient d'une serre ouverte (Brison et al, 2010).....	32
Tab.4 : Avantages et inconvénients des sécheurs directs et indirects.....	34
Tab.5 : Les conceptions et gestions des épandages sur différents types de terrain.....	37
Tab.6 : Teneurs limites en éléments-traces dans les boues.....	38
Tab.7 : Teneurs limites en composés-traces organiques dans les boues.....	38
Tab.8 : Résultats des analyses de valeur agronomique en (g/kg).....	39
Tab.9 : Résultats des analyses des éléments de traces métalliques.....	39
Tab.11 : les aspects environnementaux d'incinération.....	57
Tab.12 : Les couts d'investissement des modes d'éliminations agricole des boues.....	59
Tab.13 : Données des coûts d'exploitation relative à la STEP de Marrakech.....	60

Annexes 1

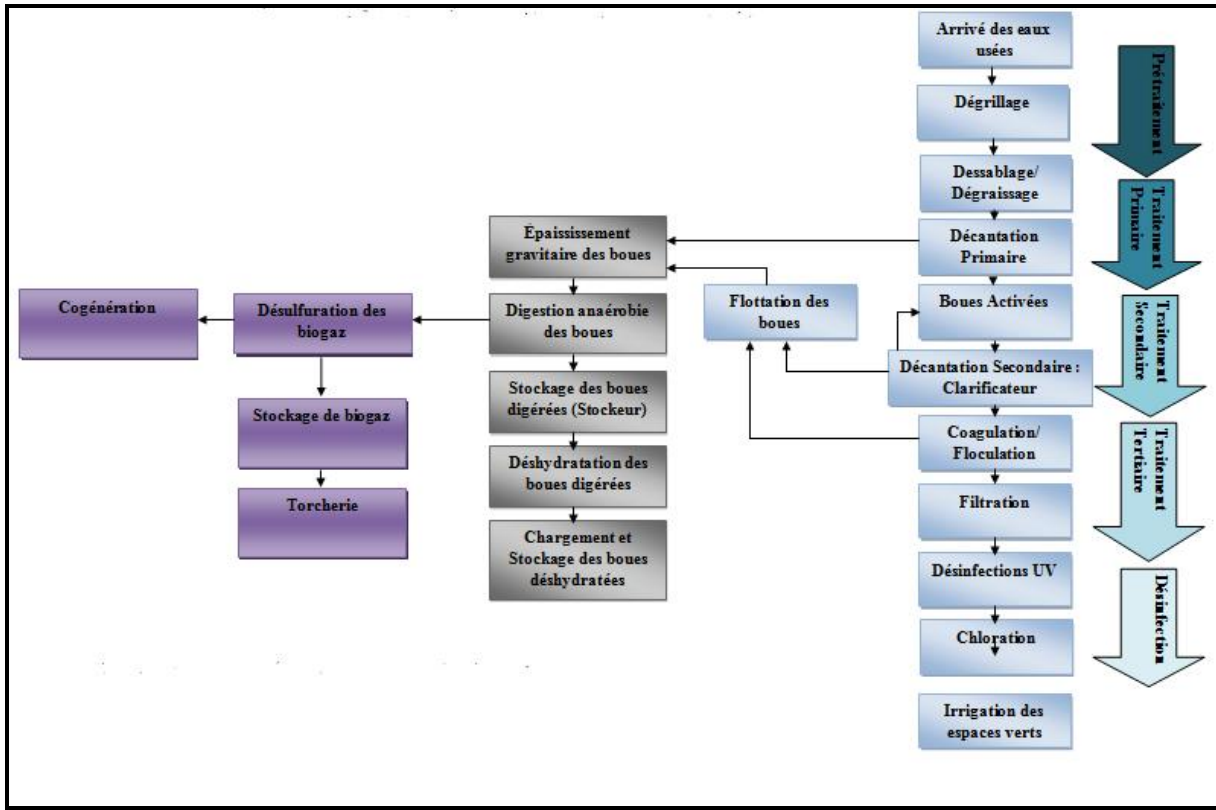


Fig. 1: Schéma de fonctionnement de la STEP de Marrakech.

Paramètres de qualité	Entrée STEP	Traitement Primaire	Traitement Secondaire	Traitement Tertiaire
MES (mg/l)	584	200	30	5
DBO5 (mg/l)	640	430	30	10
NTK (mg/l)	120	120	5	5
PT (mg/l)	22	22	20	10
Germes fécaux (U/l)	10^7	10^7	10^6	$2 \cdot 10^3$

Tab.1 : qualité des eaux entrant et sortant de la STEP

	Production	Besoins	Résultat
1ère phase	16 000	12 000	Excédent de 4000
2ème phase	30 000	66 000	Besoin de 36 000

Tab.2 : Bilan d'énergie en KWh/j

H ₂	CO ₂	CO	Méthane	Ethane	Ethylène
30.86	28.69	19.62	13.71	2.17	2.17

Tab.3 : Composition des gaz obtenus par pyrolyse (% volume)

Température (°C)	Huile		Energie		Valeur économique de l'huile (cents/kg MS)
	Rendement (kg huile/kg MS)	Valeur (cents/kg MS)	Requise (kJ/kg MS)	Coût (cents/kg MS)	
Boues primaires					
300	26	8.3	2555	3.1	5.2
400	39	12.5	2750	3.3	9.2
500	42	13.4	2945	3.5	9.9
Boues activées épaissies					
300	18	5.8	2900	3.5	2.3
400	33	10.6	3095	3.7	6.9
500	32	10.2	3290	3.9	6.3
Boues digérées					
300	14	4.5	2424	2.9	1.6
400	24	7.7	2619	3.1	4.6
500	28	9.0	2814	3.4	5.6

Tab. 4 : Valeur économique de l'huile obtenue par pyrolyse

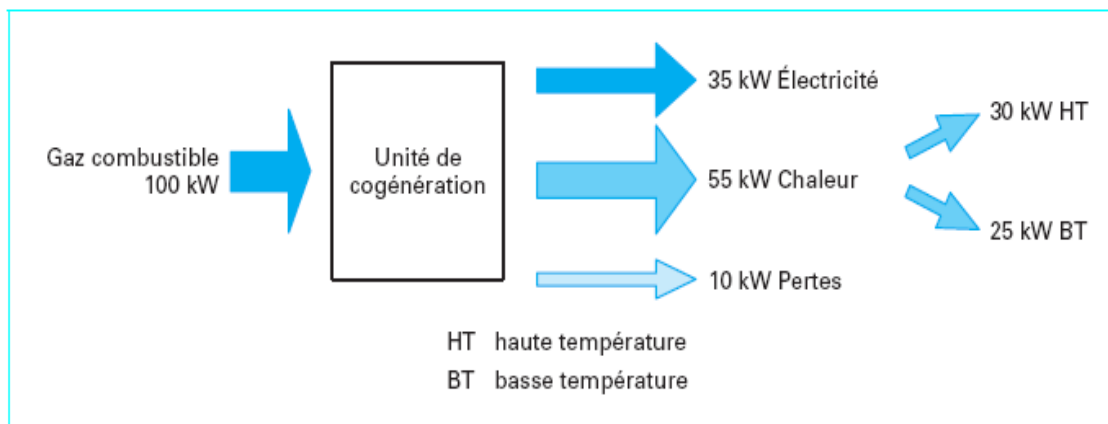


Fig. 4: Exemple de rendement d'un moteur à gaz

Annexe 2

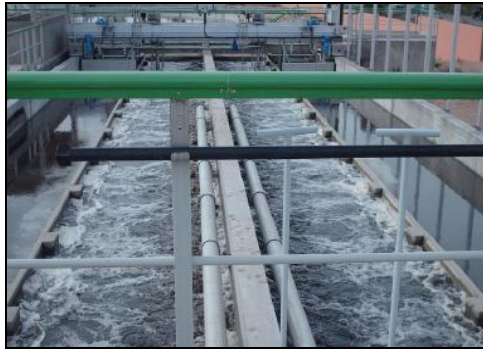


Photo1 : Dessablage – Dégraissage



photo2 : Dégrillage



Photo3 : Décanteur primaire



Photo4 : bassin d'aération



Photo5 : clarificateur



Pohto6 : Épaisseurs des boues



Photo7 : digesteur



Photo8 : Gazomètre