

Stage réalisé du 14 juin 2010 au 31 août 2010 à Marrakech



Bilan sur les possibilités de la filière boue de la STEP de Marrakech



Armelle Sfiligoi

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE
TOULOUSE

Av de l'Agrobiopole, BP 32607, Auzeville
Tolosane - 31326 Castanet-Tolosan Cedex
Tel : 05.62.19.39.00



Abstract

During the second of study, we have to do a training period of ten weeks in a laboratory or in a company. These ten weeks could be the opportunity to do our twelve-weeks stay in a foreign country required by ENSAT. I chose to do this stay in Morocco. I find my training period in the water treatment plant of Marrakech exploited by the French society Degrémont.

At present, Morocco develops its politic of environment protection, and does a lot of efforts to make up the delay about water treatment and pollution. That's how, the water treatment plant of Marrakech which functions since April 2009, is the first modern water treatment plant in Morocco. However, this first plant status implies that there isn't experience in this field in Morocco.

The water treatment plant of Marrakech has a stoking problem with the sludge which results from the water treatment. Sludge has been stocked on a land for 5 month, but the surface area is only of 1 ha and the land will be saturate with sludge at the beginning of September 2010. There isn't law which can help to find a solution because at present time, there isn't other water treatment plant in the same case in Morocco. So the subject of my training period was to assess the situation of the water treatment plant of Marrakech and list the possibilities to evacuate sludge.

To find these possibilities, we have to peruse the Moroccan legislation and if it isn't complete, we complete with European and French legislation. Then, we have to characterize Marrakech sludge, quantitatively and qualitatively. Finally we list the possibilities for sludge and the advantages and the drawbacks of every possibility. So, there are four solutions. The first is the easiest. It consists in put sludge in dump. The second is the most used in France, it's the sludge reusing in agriculture. The third is the sludge use as a fuel in cement work. The last one is the fabrication of bricks with sludge. All these possibilities can be feasible with Marrakech sludge.

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier Monsieur Jean-Claude Séropian, Directeur Opération et Maintenance de la zone Afrique. Il a fait preuve de beaucoup de gentillesse et d'une grande attention à mon égard et a su répondre à mes attentes en m'offrant l'opportunité de faire ce stage.

Je remercie également Monsieur Philippe Thiel qui m'a volontiers mis en contact avec Jean-Claude Séropian.

Je remercie bien sûr toute l'équipe de la STEP de Marrakech.

Tout d'abord, Yann Thépot, le chef d'exploitation et mon maitre de stage, qui malgré un emploi du temps chargé, a su trouver du temps pour me conseiller et m'orienter dans mon travail.

Noureddine Sakhraoui, responsable process dont j'ai partagé le bureau durant mon stage qui m'a aidé à comprendre le fonctionnement de la station et a toujours répondu à mes questions, aussi bien dans le domaine de mon stage que dans la découverte de la culture marocaine.

Le responsable maintenance Adil Hidar, les chefs de quart Mustapha Ben Hammadi et Redouan El Bouanami, ainsi que la responsable labo, Karima Benazouz et le laborantin, Tarik Al Mansour, qui ont toujours tous été attentifs à mes demandes, ils m'ont conseillés pour mes expérimentations et ont ainsi été d'une très grande aide.

Je remercie également Hakima Harrach, l'assistante et Abdeljalil Akile, le comptable, et les autres stagiaires (Karim et Raoula) dont j'ai beaucoup apprécié la gentillesse, la sympathie et la bonne humeur.

Pour terminer, merci à toutes les personnes travaillant à la station, coursier, opérateurs, mécaniciens, jardinier... qui ont toujours été d'une grande gentillesse.

Je remercie enfin Elodie Lasne, Sylvie Peuron et Karine Vignard qui travaillent au siège de la société Degremont à Paris pour leurs conseils concernant mon séjour au Maroc.

Sommaire

Introduction	1
1. La société Degrémont.....	2
1.1. Le Groupe	2
1.2. La succursale de Marrakech	3
2. Le Contexte actuel de l'assainissement au Maroc.....	4
2.1. Généralités	4
2.2. Quelques exemples.....	5
2.2.1. La situation de Fès	5
2.2.2. La situation de Marrakech.....	5
2.2.3. Les stations d'Agadir et de Meknès.....	5
2.3. Les institutions Marocaines en lien avec les stations d'épurations.....	6
2.4. La législation concernant les boues de STEP	8
2.4.1. La réglementation marocaine	8
2.4.2. La réglementation Européenne et Française	9
3. La STEP de Marrakech	10
3.1. Présentation générale de la station	10
3.1.1. La ligne eau.....	11
3.1.2. La ligne boue	12
3.1.3. La ligne biogaz	13
3.2. Les caractéristiques des boues produites	13
3.2.1. La quantité de boue	13
3.2.2. La qualité de la boue	13
3.3. La gestion de l'évacuation des boues : problématique	20
3.3.1. Démarrage de l'exploitation et gestion des boues	20
3.3.2. Mise en place d'une gestion provisoire des boues	21
3.3.3. Problématique : évacuation et stockage des boues	21

4. La filière boue	22
4.1. <i>Les filières boues en Europe.....</i>	22
4.2. <i>Le séchage des boues</i>	22
4.2.1. Le séchage à l'air libre	23
4.2.2. Le séchage avec sécheur thermique	24
4.3. <i>La mise en décharge.....</i>	24
4.4. <i>L'utilisation des boues pour de l'épandage agricole et pour les espaces verts.....</i>	26
4.4.1. Généralités	26
4.4.2. Qualité des sols susceptibles de recevoir des boues de la STEP	27
4.4.3. Effets des boues en Agriculture	28
4.4.4. Epandage des boues.....	28
4.4.5. Compostage.....	30
4.4.6. Conclusions de la filière agricole/espaces verts.....	31
4.5. <i>La revalorisation énergétique.....</i>	32
4.5.1. L'incinération en cimenterie (fabrication de chaleur).....	32
4.5.2. La carbonification (fabrication d'énergie)	33
4.6. <i>La transformation en matériaux de construction.....</i>	34
4.7. <i>Comparaison des différentes possibilités</i>	35
4.7.1. L'investissement et les couts d'exploitation	35
4.7.2. Bilan des possibilités.....	35
 Conclusion.....	 37
 Conclusion sur l'expérience personnelle	 38
 Bibliographie.....	 39

Abréviations

A Argile

BL Business Line

BOT Build, Operate and Transfer

BU Business Unit

CEC Capacité d'Echange Cationique

DBO5 Demande biologique en oxygène (mesurée au bout de 5 jours)

DCO Demande chimique en oxygène

ETM Élément Trace Métallique

LF Limon Fin

LG Limon Grossier

LIE Limite Inférieure d'Explosivité

MES Matière En Suspension

MO Matière Organique

MS Matière Sèche

MV Matière volatile

ONEP Office National de l'Eau Potable

PCI Pouvoir Calorifique Inférieur

RADEEMA Régie Autonome de Distribution d'Eau et d'Electricité de Marrakech

SF Sable Fin

SG Sable Grossier

STEP Station d'épuration

Introduction

Le Maroc situé au nord de l'Afrique se trouve à seulement 14 km de l'Europe. C'est pourquoi ce pays a depuis toujours été en forte interaction avec l'Europe, avec des relations privilégiées qui prennent de plus en plus l'allure de partenariat, en particulier avec la France. C'est dans ce royaume tantôt si ressemblant à l'Europe, tantôt si différent, que j'ai passé 12 semaines durant l'été 2010 afin de réaliser mon stage de deuxième année d'école d'ingénieur.

Le Maroc est un pays en pleine transformation. Non seulement, il ne cesse de se développer économiquement, notamment en accueillant de nombreuses délocalisations européennes, mais en plus, il entame actuellement une transition du point de vue environnemental. Ainsi, un grand nombre lois et une quantité de programmes sont aujourd'hui mis en place, destinés à protéger et à améliorer l'environnement.

C'est dans ce contexte qu'a été construite par la société française Degrémont, en 2009, la station d'épuration de Marrakech. Il s'agit d'une des toutes premières stations d'envergure du pays. C'est dans cette structure d'une vingtaine d'employés que j'ai été accueillie pour mon stage. La STEP est en activité depuis le mois d'avril 2009 et génère, comme toute station de traitement des eaux usées, des boues résiduaires. Sa particularité est d'ailleurs de produire l'électricité qui lui permet de fonctionner en utilisant le biogaz issu de la digestion anaérobie de ces boues. Cependant, aucun système de gestion des boues n'ayant été pensé avant la mise en action de la station, le lieu d'évacuation des boues est un problème récurrent. C'est ce problème qui constituait le sujet de mon stage. J'ai ainsi eu pour mission de faire un bilan des possibilités de la filière boue de la STEP de Marrakech.

Afin de présenter au mieux mon travail, je vais un premier temps, présenter la société Degrémont et la succursale de Marrakech qui m'a accueillie. J'exposerais ensuite le contexte actuel de l'assainissement au Maroc (ce qui a été fait, ce qu'il reste à faire, les institutions et la réglementation...). Dans une troisième partie, je décrirai la STEP de Marrakech et ses caractéristiques, notamment au sujet des boues. Puis, j'exposerai les différentes possibilités répondant à la problématique. Enfin, une dernière partie sera consacrée à mes impressions et à l'expérience que j'ai retirée de ce stage au Maroc.

1. La société Degrémont

1.1. Le Groupe

La société Degrémont a été créée en 1939 par Gilbert Degrémont. En 1971, la Lyonnaise des eaux devient actionnaire majoritaire de la société Degrémont avant que la compagnie financière de Suez ne devienne à son tour le principal actionnaire de la Lyonnaise des eaux en 1974. Aujourd'hui, la société Degrémont est une filiale de Suez Environnement de 4600 collaborateurs dont le siège se situe à Paris.

Elle est spécialisée dans le domaine du traitement de l'eau. Elle conçoit, construit et exploite des stations d'épuration des eaux usées, des stations de potabilisation, de dessalement, ou encore de traitement de boues. La société a une politique d'innovation, c'est pourquoi elle possède aujourd'hui 500 technologies brevetées (1).

Son organisation est constituée en quatre niveaux, dont deux sont visibles sur l'organigramme de la figure 1.

- Le premier niveau est le siège,
- Le second niveau est représenté par les business lines (BL) qui constituent les zones d'actions de Degrémont divisées en 3 et Degrémont technologie (figure 1),
- Le troisième niveau : les business units (BU) qui constituent les BL. La BL Europe est par exemple divisée en 6 BU qui représentent des zones géographiques (ex : BU Degrémont Italie) ou des secteurs d'activités (ex : BU Degrémont services),
- Les projets et contrats sont le quatrième et dernier niveau.

En parallèle de cette organisation à 4 niveaux, on trouve les Build, Operate and Transfert (BOT) qui sont un type de contrat particulier alliant conception, construction, financement et exploitation sur une durée de 20 à 30 ans.

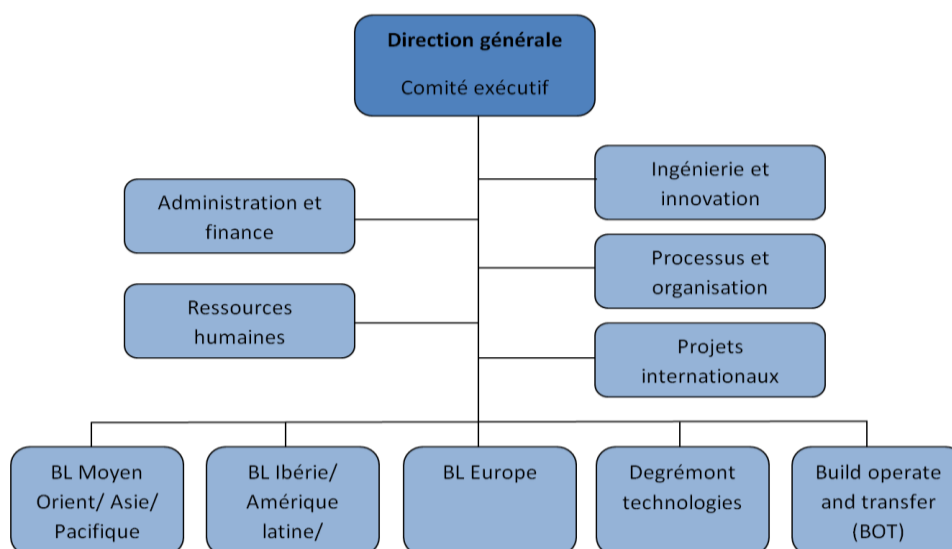


Figure 1 : Organigramme du groupe Degrémont

Cette société est présente dans 70 pays, a équipé plus de 65 capitales, et construit près de 10 000 usines, sur tous les continents.

1.2. La succursale de Marrakech

J'ai réalisé mon stage à la station de Marrakech. Il s'agit de la station de traitement des eaux usées de la ville de Marrakech qui a une capacité d'un million équivalent habitant. La station reste tout de même de taille relativement petite puisque elle ne réalise pour l'instant que le traitement primaire des eaux usées, la seconde phase d'épuration étant en construction. Cette station a été conçue et construite par Degrémont pour la RADEEMA (Régie Autonome de Distribution d'Eau et d'Electricité de Marrakech). Cette dernière représente donc le client de la station d'épuration de Marrakech. La société Degrémont exploite la station depuis 2009 et possède un contrat d'exploitation jusqu'en 2014.

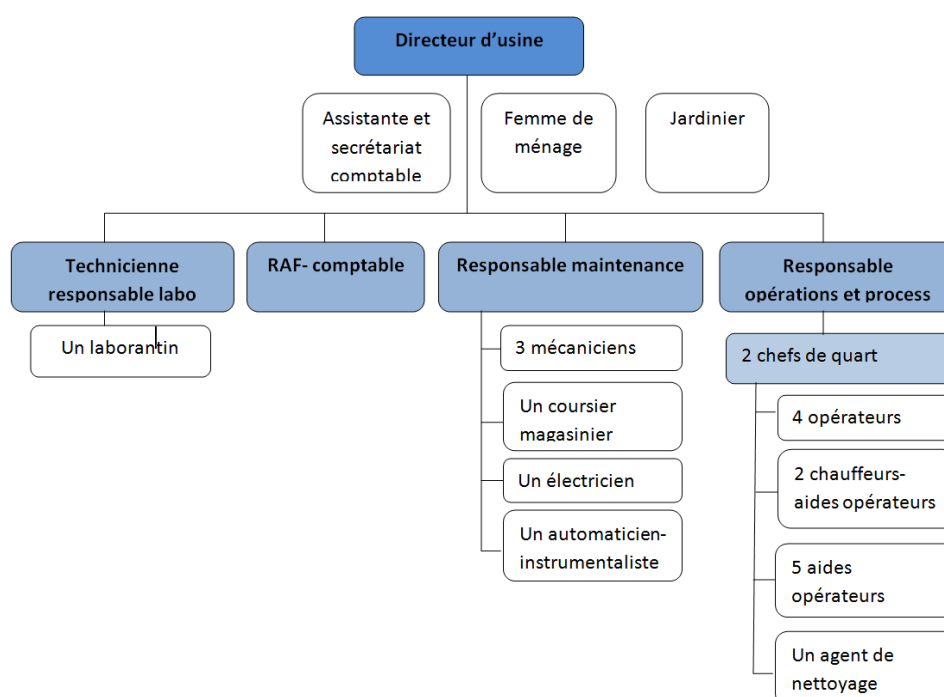


Figure 2 : Organigramme de la succursale de Degrémont Marrakech

Cette structure compte 29 salariés. L'organigramme (figure 2) ci-dessus décrit l'organisation de la succursale. La plus part des employés, (tous ceux qui sont dans des cadres blancs à part le laborantin) travaillent sur « le terrain ». Les responsables du process et de la maintenance ainsi que les chefs de quart sont également beaucoup amenés à travailler directement sur le terrain pour mieux appréhender les problèmes potentiels, même si leur travail consiste tout de même à gérer les équipes.

Un bureau est également réservé à une employée de la RADEEMA. Une représentante du client est donc présente à temps plein à la station d'épuration. Elle ne travaille cependant pas avec les équipes de Degrémont. Son rôle consiste plutôt à surveiller et observer le bon fonctionnement de la station. Elle permet également de faciliter le contact avec la RADEEMA.

2. Le Contexte actuel de l'assainissement au Maroc

2.1. Généralités

Le Maroc possède une des plus importantes économies d'Afrique (5° PIB africain) et ne cesse de se développer. Malheureusement, les infrastructures nécessaires ne suivent pas toujours l'urbanisation et la croissance industrielle. Le volume d'effluents urbains est estimé à 600 millions de m³/an (1 000 millions de m³/an d'ici 2030) et la majorité est déversée directement dans la mer (45%) ou les oueds (rivières le plus souvent à sec) sans traitements préalables. Les effluents urbains représentent d'ailleurs la principale source de pollution au Maroc, ayant des répercussions sur l'environnement mais également sur la santé des populations(2).

Il n'y a actuellement presque aucune station d'épuration des eaux usées au Maroc. Le gouvernement a conscience de son retard en matière d'assainissement et pour y remédier, a placé l'assainissement liquide au rang de priorité gouvernementale. Le Programme National d'Assainissement Liquide et d'Épuration des Eaux Usées (PNA), mis en place en 2005, prévoit un niveau de raccordement moyen au réseau de 80% à l'horizon 2020 et un taux de rabattement de la pollution domestique d'au moins 60% en 2020. Les premières STEP voient donc le jour aujourd'hui, et des projets de construction se dessinent dans tout le pays.

Ville	Situation	Nb d'hab.	Assainissement des eaux usées	Détails
Casablanca	Ville côtière	3270000	NON	Emissaire à 3,6 km en mer et déversement direct en mer
Rabat- Salé (agglomération)	Ville côtière	1550000 (2004)	NON	Emissaire en mer de 2,15 km, potentiel 200 000 m ³ /j
Fès	250 km côte atlantique	1000000 (2010)	En Cour	Construction d'une station à boues activées, Capacité 100 000m ³ /j
Meknès	200 km cote atlantique	960000 (2008)	OUI	Lagunage anaérobie sur 35ha, capacité 1,1m ³ /s, construction du traitement secondaire : boues activées qui débutera en 2012
Marrakech	200 km côte atlantique	920000 (2010)	OUI	Station de traitement primaire : décantation et digestion anaérobie des boues, capacité 100 000 m ³ /j. Traitement secondaire en construction
Tanger	Ville côtière	760000 (2010)	NON	Emissaire en mer à 2,5 km et déversement direct en mer
Oujda	50 km côte méditerranéenne	650000 (2008)	En Cour	Construction d'un lagunage aéré sur 40ha, capacité 40 000 m ³ /j
Agadir	Ville côtière	570000 (2010)	OUI	Station traitement primaire : décanteurs anaérobie, capacité 50 000m ³ /j, Traitement secondaire : filtre à sable capacité 10 000m ³ /j
Kenitra	Ville côtière	370000	NON	

Tétouan	Ville côtière	320000 (2004)	NON	
Safi	Ville côtière	280700 (2004)	NON	

Tableau 1 : classement des villes marocaines de plus de 200 000 habitants et présentation de leurs systèmes d'assainissement.

Si on considère les villes de plus de 200 000 habitants (3) (tableau 1), on constate que les premiers projets à avoir été mis en place sont ceux des grandes villes de l'intérieur du pays (Marrakech, Fès...). En effet, les villes côtières utilisent pour la plus part des émissaires qui permettent de rejeter les eaux usées à plusieurs kilomètres des côtes et en profondeur (40m) après avoir procédé à un dégrillage pour isoler les déchets solides et un dessablage dégraissage. Cela limite la pollution de la côte. De plus les eaux urbaines des villes côtières ne polluent pas tout un bassin versant, comme celles des villes non côtières. La priorité est donc à l'assainissement liquide des villes de l'intérieur du pays.

2.2. Quelques exemples

2.2.1. La situation de Fès

La ville de Fès connaît un important problème de pollution du bassin de Sebou. Il s'agit d'un des plus grand bassins hydrographique du pays (30% du potentiel national en eaux de surface) mais aussi du plus pollué : la qualité des eaux est considérée inclassable et surtout impropre à toute utilisation. Les pertes économiques pour la région sont grandes (difficultés à irriguer, problèmes de potabilisation...) sans parler des risques pour la santé. Les eaux usées de Fès (1 million d'habitants) contribueraient à cette pollution à hauteur de 40%, c'est pourquoi la construction d'une station d'épuration dans cette ville est une vraie nécessité. Une station d'une capacité de 100 000 m³/j (= 1 million équivalent habitant) est actuellement en construction. Elle prévoit un traitement primaire et un traitement secondaire à boues activées.

2.2.2. La situation de Marrakech

Marrakech est la première ville touristique du Maroc, et draine environ 2 millions de touristes par ans. L'importance pour son image de la préservation de son environnement et de la qualité de l'eau l'a incitée à construire la première station « moderne » de grande envergure du pays. Elle fonctionne depuis 2009. Avant cela, les eaux usées de la ville étaient rejetées directement dans l'oued Tensift. D'ici peu, la construction de la seconde phase de traitement sera terminée et l'eau ainsi traitée pourra alimenter les golfs de la ville.

2.2.3. Les stations d'Agadir et de Meknès

Parmi les villes de plus de 200 000 habitants, seules les villes de Marrakech, Agadir et Meknès possèdent des stations d'épurations.

La ville d'Agadir voit tout comme Marrakech une problématique liée au tourisme. C'est en effet la plus importante des stations balnéaires du Maroc. Cette ville de près de 600 000 habitants attire plus de 500 000 de touristes par an, mais c'est aussi une ville industrielle. Dans ces conditions, l'assainissement des eaux usées urbaines et industrielles est primordial afin de limiter les rejets en mer et d'assurer une bonne qualité des eaux de baignades. De plus, la ville

souffre d'un épuisement de sa nappe souterraine dû à un usage trop intensif de l'eau. Cet épuisement entraîne une salinisation de la nappe qui rend l'eau des puits impropre à l'irrigation. La construction de la station avait donc également un but de réutilisation des eaux usées.

La station d'épuration d'Agadir achevée en 2006, réalise un traitement primaire par lagunage anaérobie et est dimensionnée pour un débit moyen de 50 000 m³/jours (4). L'épuration secondaire est de type infiltration percolation (infiltration progressive) sur sable et traite 10 000 m³ par jour sur une surface de 12 ha. Seulement 1/5 de l'eau qui subit le traitement primaire reçoit le traitement secondaire, mais ces traitements ont tout de même permis d'améliorer grandement la qualité des eaux du bassin d'Agadir (5).

La station de Meknès qui fonctionne depuis le mois de mai 2009 est une station de traitement primaire à lagunage anaérobie, tout comme la STEP d'Agadir. Elle s'étend sur 35 ha et possède une capacité de traitement de 96 000 m³/j. Il s'agit donc de la troisième grande station d'épuration aujourd'hui en fonctionnement au Maroc.

Concernant les boues, la STEP d'Agadir en génère environ 5 000 m³ (MS) par an. Elles sont stockées dans la station d'épuration depuis le début de l'exploitation. Depuis 2009, des lits de séchages installés sur la station permettent d'augmenter leur siccité et de réduire leur volume. Il s'agit de boues très différentes de celles de la station de Marrakech, et cela pour plusieurs raisons. Tout d'abord, il n'y a pas dessablage-dégraissage à Agadir, on retrouve donc du sable et des graisses dans les boues. Ensuite, les boues sont digérées différemment de celles de la STEP de Marrakech (temps de séjour des boues de plusieurs mois), les boues sont donc moins riches en matière volatile (50% de moins). Pour finir, les boues sont très riches en écailles de poisson, du fait de la présence d'usines agroalimentaires travaillant le poisson à Agadir. Il est également important de préciser que les stations d'Agadir et Meknès n'ont pas les mêmes problématiques que la station de Marrakech. Il s'agit en effet de stations installées sur de très grands terrains de plusieurs dizaines d'hectares. Elles possèdent donc relativement plus de place pour stocker les boues et les faire sécher grâce à des lits de séchage. De plus la station de Meknès ne fonctionne que depuis un peu plus d'un an, elle n'a donc pas encore vidangé de décanteurs et n'a ainsi produit aucune boue pour l'instant. La station d'Agadir commence quant à elle à s'intéresser à des possibilités de revalorisation mais n'a rien concrétisé car sa capacité de stockage de boue lui permet d'attendre les textes de loi qui commencent à être envisagés au sujet des boues urbaines.

2.3. Les institutions Marocaines en lien avec les stations d'épurations

La principale institution chargée de la protection de l'environnement est le **ministère de l'énergie, des mines, de l'eau et de l'environnement**. Il est responsable de la protection des ressources en eau, de la réduction de la pollution et de l'application de la législation. Il gère également les études d'évaluation de l'impact environnemental et de la sensibilisation du public.

Le **ministère de l'Équipement** joue également un rôle très important dans la planification et la gestion des projets d'assainissement. Le **ministère de la santé** est responsable de la qualité de l'eau potable et le **ministère de l'intérieur** participe par l'intermédiaire de la direction régionale des collectivités territoriales et la direction des régions.

La distribution et l'assainissement de l'eau au Maroc sont assurés par trois types d'opérateurs selon les villes. Chacun prend un tiers du marché (figure 3). On trouve parmi ces opérateurs les 13 **régies communales** qui dépendent du ministère de l'intérieur. Le deuxième tiers de la distribution d'eau revient à des **sociétés délégataires** pour quatre villes (Casablanca, Tanger, Tétouan et Rabat). L'**ONEP** (Office National de l'Eau Potable) se charge du dernier tiers et s'occupe en majorité de petites et moyennes villes et des zones rurales. L'ONEP assure également la production d'eau qui est revendue aux régies et opérateurs privés (2).

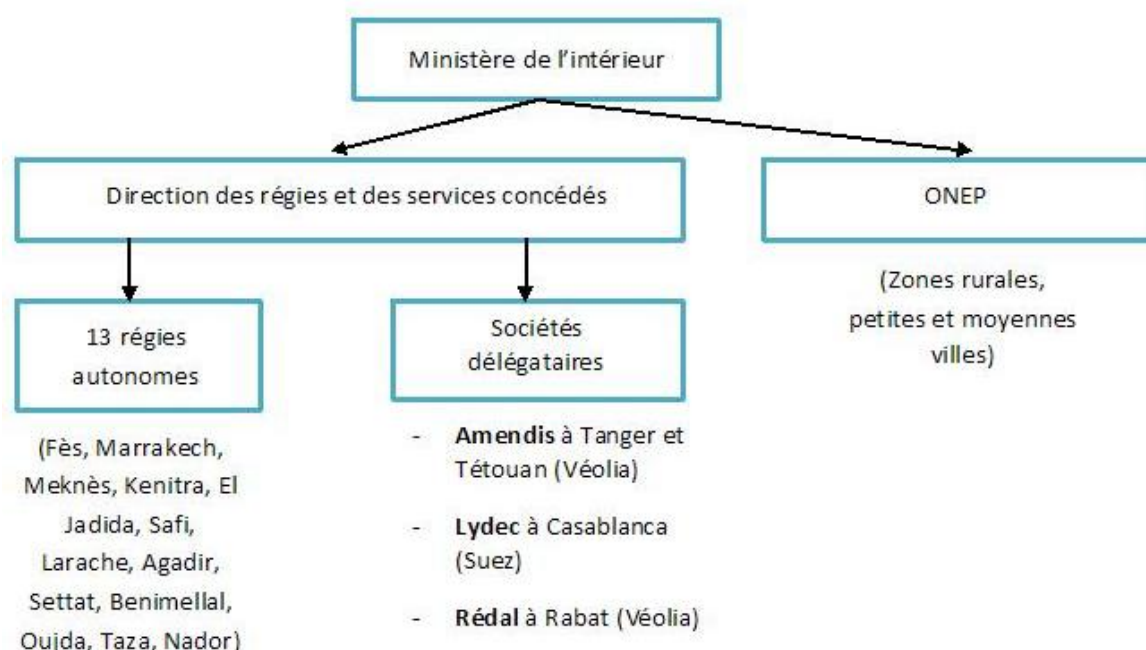


Figure 3 : Répartition de l'exploitation du réseau d'assainissement au Maroc

Depuis la loi sur l'eau, le territoire a été découpé en 9 bassins hydrographiques possédant une **agence de bassin** chacun. Elles sont chargées de la gestion des ressources en eau à la fois quantitative et qualitative sur le bassin hydrographique, et ce sont elles qui sont responsables de l'élaboration des plans de gestion intégrés de l'eau et de leur mise en œuvre. Elles jouent plusieurs rôles (figure 4) puisqu'elles financent, contrôlent et organisent la gestion de l'eau. Elles perçoivent les redevances d'assainissement et de captage de l'eau. Ces redevances sont coefficientées en fonction de la qualité de l'eau rejetée, sur le principe « pollueur –payeur » et les agences de bassins tirent leurs ressources de ces redevances. Elles ne sont malheureusement pas toutes complètement opérationnelles et leurs moyens restent faibles pour mener à bien toutes leurs missions. Elles n'ont par exemple pas de réel moyen de pression en tant que police de l'eau. Il faut cependant surtout retenir que le Maroc est entré dans un processus de mise à niveau de son assainissement liquide et qu'il se donne les moyens pour y parvenir. Certes, certaines structures encadrantes ne sont pas encore tout à fait en place ou tout simplement inexistantes, mais un tel projet ne peut être accompli en quelques années seulement (2).

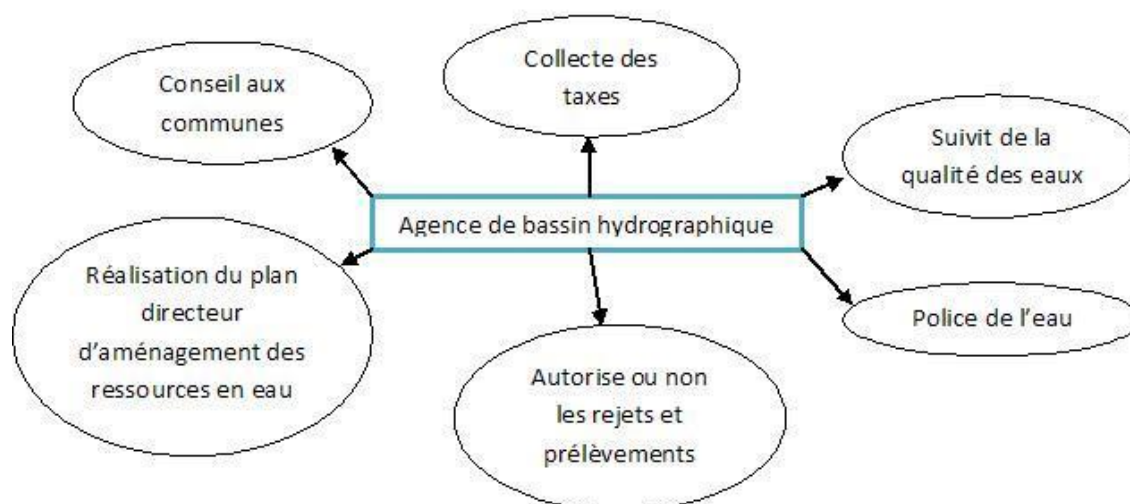


Figure 4: Les activités des agences de bassin

2.4. La législation concernant les boues de STEP

2.4.1. La réglementation marocaine

La législation marocaine concernant la préservation de l'environnement et plus précisément la gestion des déchets est relativement récente. La plus part des lois, décrets et arrêtés dans ce domaine ont en effet moins de 5 ans, et la réglementation reste encore incomplète ou pas assez précise sur de nombreux points. Pour exemple, il n'existe pas de réglementation spécifique sur les boues de STEP. Certains textes peuvent cependant concerner leur stockage ou leur revalorisation.

La loi n°10-95 sur l'eau de 1995 (6) effectue une synthèse d'un grand nombre de sujets se rapportant à l'eau comme la propriété, l'utilisation, mais aussi la sauvegarde de la qualité et de la quantité et met en place les agences de bassins hydrauliques et les plans de gestion intégrés de la ressource en eau ayant pour objectif sa gestion à l'échelle des bassins hydrauliques. Cette loi stipule par exemple l'interdiction de déposer ou d'épandre des substances et « déchets susceptibles de polluer par infiltration les eaux souterraines ou par ruissellement les eaux de surface ». Cependant, la loi ne quantifie pas et ne détaille pas qu'est ce qui est désigné par « polluer ». Il est donc difficile de savoir ce qui peut être épandu et ce qui ne peut pas l'être.

La Loi 28-00 du 22 novembre 2006 relative à la gestion des déchets et à leur élimination, (6) prévoit la mise en place de plans de gestion pour les déchets ménagers et assimilés, les déchets industriels, les déchets médicaux et pharmaceutiques, les déchets agricoles, les déchets ultimes et inertes et enfin les déchets dangereux. Les boues ne sont pas spécialement traitées et sont difficile à classer, mais on peut tout de même les assimiler aux déchets industriels qui sont cités dans la loi. On lit ainsi que « les déchets industriels non dangereux doivent être déposés par leurs générateurs ou par les personnes autorisées à les gérer dans les lieux et les installations d'élimination désignés à cette fin par le plan directeur régional sous le contrôle des communes ». Le projet de décret d'application est en cours de finalisation, les plans régionaux de gestion des déchets ne sont pas encore mis en place.

Décret n°2-07-253 du 18 juillet 2008 portant sur la classification des déchets dangereux (6) cite les boues : «Les boues provenant du traitement des eaux usées urbaines (19/08/05) » ne sont pas classées comme déchets dangereux.

Un décret relatif à l'incinération des déchets (6) et fixant les limites des émissions atmosphérique, et du rejet des eaux usées résultant de l'épuration des gaz de combustion des déchets est actuellement à l'étude. Il précisera notamment les valeurs limites des émissions atmosphériques pour les cimenteries pratiquant l'incinération de déchets, qui représentent un client potentiel des boues de stations d'épuration. Les boues ne figurent pas dans la liste des déchets exclus de l'incinération.

2.4.2. La réglementation Européenne et Française

La réglementation Européenne concernant les stations d'épuration et plus précisément la valorisation des boues urbaines est très complète et précise.

La directive européenne 86/278/CEE du 12 juin 1986, relative aux boues d'épuration (7). Son but est de « réglementer l'utilisation des boues d'épuration en agriculture de manière à éviter des effets nocifs sur les sols, la végétation, les animaux et l'homme, tout en encourageant leur utilisation correcte ». En effet, elle définit les valeurs limites en métaux lourds dans les boues destinées à une revalorisation agricole, mais précise que cela peut être adapté par chaque pays en fonction des teneurs en métaux lourds des sols.

La directive européenne 91/676/CEE du 12/12/1991 (7) concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles prévoit la mise en place de « zones vulnérables » correspondant aux zones polluées par les nitrates et demande aux états membres d'établir des contraintes particulière au sujet de la fertilisation dans ces zones. L'épandage des boues est donc concerné par cette directive.

Le décret n°97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à la valorisation agricole des boues urbaines (7), précise les conditions générales d'épandage des boues et les dispositions techniques relatives à l'épandage. Il rappelle aussi certains éléments de la **loi sur l'eau** (quantité maximum à épandre par an), et pour finir, il fixe les sanctions encourues en cas de non-respect de la loi.

L'arrêté du 8 janvier 1998 (7) précise les obligations des producteurs de boues lorsqu'ils veulent procéder à une revalorisation agricole. Il détaille ainsi le contenu de l'étude préalable d'épandage, du programme prévisionnel d'épandage et du bilan fait après épandage. Il définit également les valeurs limites en élément traces métalliques et en composés traces organiques pouvant se trouver dans les boues destinées à une revalorisation agricole. Ces valeurs limites en métaux lourds sont plus sévères que celles de la directive 86/278/CEE c'est pour cela que nous les prendrons en référence par la suite.

En l'absence de réglementation marocaine précise concernant la revalorisation de boues de stations d'épuration, nous nous référerons à la réglementation française ou européenne (nous prendrons la plus sévère des deux en fonction de la situation).

3. La STEP de Marrakech

3.1. Présentation générale de la station

La station d'épuration des eaux usées de Marrakech est une station de traitement primaire dont la principale caractéristique réside dans son autonomie en électricité, possible grâce à l'utilisation du biogaz issue de la fermentation des boues résiduelles. Le schéma ci-dessous et les commentaires qui lui succèdent présentent le fonctionnement de la STEP.

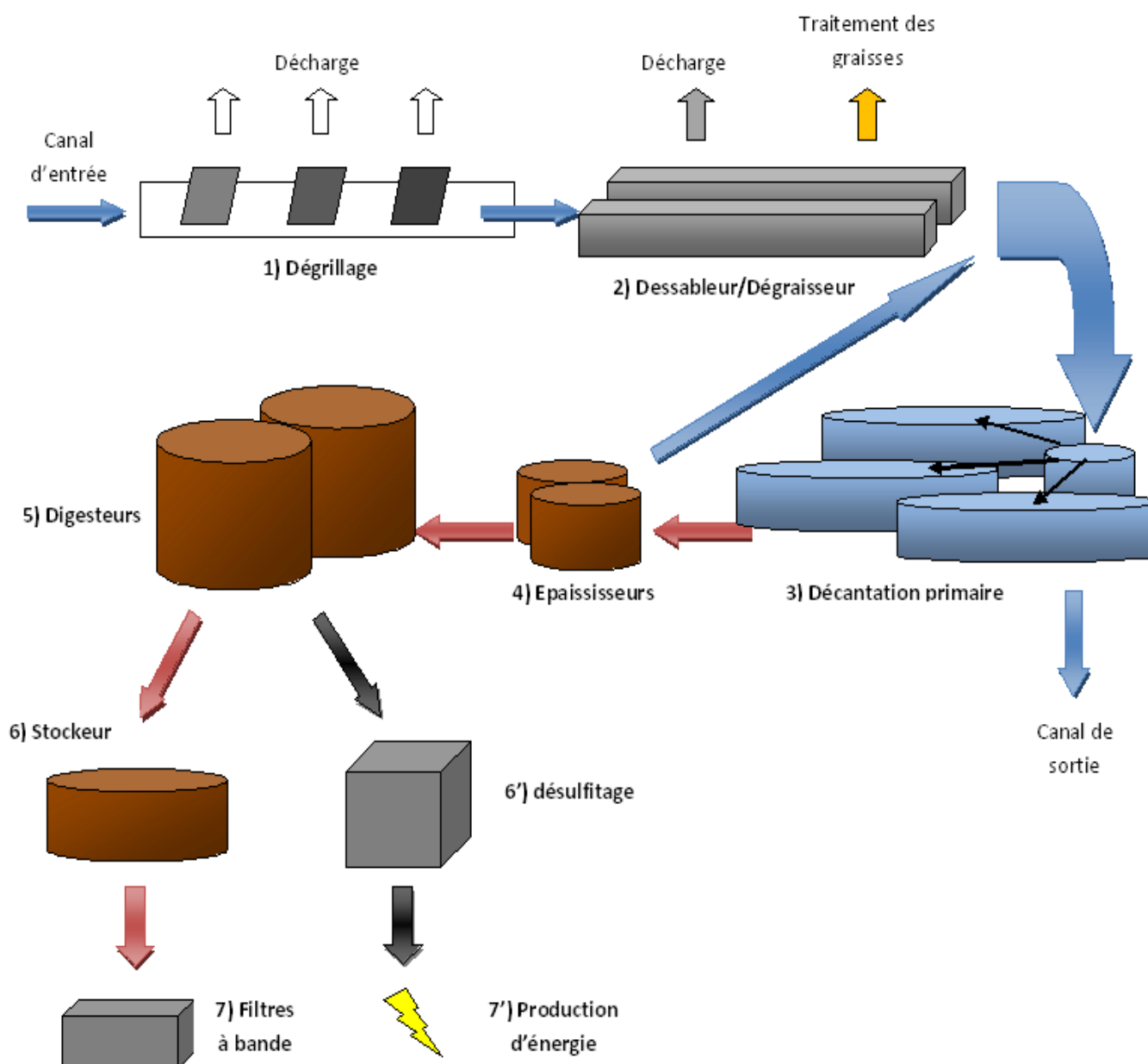


Figure 5 : schéma récapitulatif du fonctionnement de la STEP de Marrakech

3.1.1. La ligne eau

- 1) Les eaux usées de Marrakech (90 000 m³/j) sont acheminées à la STEP de Marrakech. Le premier traitement qu'elles subissent est un pré-dégrillage de 1 m qui protège deux autres étages de dégrillage de 80 mm (dégrillage grossier) et 10 mm (dégrillage fin). Cette première étape permet d'éliminer les déchets de taille supérieure à 10 mm.
- 2) Après le dégrillage, l'eau est répartie sur deux dessableurs-dégraisseurs à double cellule (figure 6), son temps de séjour moyen y est de 19 mn. Ces ouvrages permettent de récupérer au fond, le sable qui tombe sous l'effet de son propre poids, et en surface, les graisses (à gauche sur la photo). Des bulles d'air sont injectées pour accélérer et améliorer le processus, elles permettent de mieux séparer la « boue » du sable et facilitent la remontée des graisses. Les sables récupérés sont envoyés à la décharge publique alors que les graisses sont traitées (tamisées à une maille de 6 mm, concentrées, puis diluée) avant d'être intégrées aux boues dans les digesteurs.



Figure 6 : Un dessableur-dégraisseur

- 3) Un répartiteur distribue ensuite l'eau de manière égale vers trois décanteurs primaires (Figure 7) de 4 000 m³ chacun, où 90 % des matières décantables vont être récupérées après un temps de rétention moyen de 3 h. L'eau est ensuite dirigée vers le canal de sortie, qui la rejette dans l'oued Tensift. Son traitement se termine pour l'instant ici. Une station de traitement secondaire de l'eau est actuellement en construction (L'eau pourra ensuite être réutilisée pour l'irrigation des golfs aux alentours de Marrakech).



Figure 7 : Décanteur primaire

3.1.2. La ligne boue

- 4) Les boues issues de la décantation primaire sont extraites des décanteurs et envoyées par une tuyauterie commune vers deux épaisseurs gravitaires. La boue va ainsi être concentrée 5-10 g de MS/l à 60 g de MS par litre par décantation avant l'étape suivante. L'eau qui résulte de cet épaissement est renvoyé au niveau de la sortie des dessableurs/dégrieurs.
- 5) 700 m³/j de boue épaissie est envoyée dans deux digesteurs de 6000 m³ chacun. Elle y est digérée en 21 jours en moyennes, par des bactéries anaérobies, à 35°C. On observe alors l'hydrolyse des polymères en monomères qui vont subir une acidogénèse suivie d'une acétogénèse et pour finir une méthanogénèse. Cette digestion permet de stabiliser les boues mais surtout de produire environ 800 Nm³ de biogaz par heure qui est récupéré pour produire l'électricité nécessaire à la station d'épuration. La matière volatile est digérée et passe ainsi de 65% de la MS à 50%, la concentration de la boue est alors d'environ 40 g/l.
- 6) La boue digérée s'écoule gravitairement vers un stockeur de 1 200 m³, non couvert et équipé d'agitateur pour maintenir l'homogénéité des boues digérée.
- 7) Après l'ajout d'un polymère, la boue circule dans 3 filtres à bandes (figure 8) où elle est pressée de manière à parvenir à un taux de siccité de 31%. Une pompe gavage équipée d'une vis de malaxage gavage permet de malaxer les boues déshydratées et de les acheminer vers les bennes. Ces dernières sont remplies une par une et le remplissage est suivi par un calcul de volume des boues déshydratés à partir d'une totalisation du volume de boue alimentant les filtres à bandes. Les chaque benne est alimentée en boue en deux points en alternance (figure 9). Une alarme signale la fin de remplissage de chaque benne (13 m³) qui est ensuite acheminée par un camion à bras ampliroll (qui permet de lever la benne à 90° pour la vider) jusqu'à un terrain de stockage privé à proximité de la décharge publique, à environ 3km de la STEP.



Figure 8 : Filtre à bande



Figure 9 : Bennes de boues et leur système de remplissage

3.1.3. La ligne biogaz

6') Le biogaz résultant de la digestion anaérobie est composé de 65% de CH₄, 35% CO₂, 3 200 ppmv de H₂S, et moins d'1% de N₂. Il faut moins de 250 ppmv de H₂S, c'est pourquoi le biogaz est désulfuré. Il est ainsi rincé dans un laveur, grâce à de l'eau alcaline qui permet le passage de l'H₂S de la phase gazeuse à la phase liquide. Le sulfure de l'eau est ensuite converti biologiquement en soufre élémentaire en présence d'air. A la fin du traitement, on obtient un biogaz à 58% de CH₄, 32 % de CO₂, moins de 250 ppmv de H₂S, 8% de N₂ et 2% d'O₂.

7') le biogaz désulfuré est soit envoyé vers le cogénérateur pour produire de l'électricité, soit envoyé vers la chaudière. La production excédentaire qui ne peut être stockée est brûlée avec une torchère

3.2. Les caractéristiques des boues produites

3.2.1. La quantité de boue

Depuis le démarrage de l'exploitation en avril 2009, la station génère en moyenne 71 tonnes par jour de boues déshydratées à 31 % de siccité en moyenne (boue brute) (Annexe 1). Cela représente donc environ 26 000 tonnes de boues brutes par an et 8 000 tonnes de matière sèche par an.

3.2.2. La qualité de la boue

Les boues de STEP sont très différentes d'une station d'épuration à une autre. En effet, la grande variété de techniques d'épuration des eaux, puis de traitement des boues fait qu'on ne peut généraliser la qualité des boues. Nous allons donc tenter de caractériser les boues de la station de Marrakech.

3.2.2.1. La siccité

La siccité des boues est le pourcentage de matière sèche présente dans les boues. Elle évolue tout au long du traitement des boues dans la station d'épuration. Cependant, une seule nous intéresse, celle à la sortie de la STEP, que les clients ou partenaires pour des revalorisations ou éliminations sont susceptibles de récupérer. Cette boue a une siccité moyenne de 31%.

La siccité a une grande importance, elle a effectivement un impact sur la facilité de manipulation des boues, mais également sur leur pouvoir calorifique, et pour finir, sur le coût du transport. En effet, plus la siccité est basse et plus le volume de boue est important, ce qui rend le transport plus coûteux.

3.2.2.2. Les macro et micro éléments présents dans les boues

Les boues sont composées d'éléments divers et variés. Certains sont des éléments positifs et avantageux pour certaines revalorisations (substances fertilisantes...), d'autres sont indésirables et peuvent être dangereux pour la santé humaine (métaux lourds, pathogènes...). Ces derniers, au-delà d'un certain seuil peuvent même rendre les boues impropres à l'épandage agricole.

Éléments fertilisants dans les boues

Les boues contiennent de nombreux éléments fertilisants tout comme les engrais de ferme (tableau 2)

g/kg	Fumier Bovin	Boues brutes	Fiente volaille
MS	272	310	500
MO	200	170	309
pH		7	
Azote total	8	10,35	19,5
Azote Ammoniacal	0,5	1,397	2,5
Phosphore (P205)	3	7,63	21,3
Calcium (CaO)	9,8	29,395	57
Magnésium (Mg)	1,8	4,385	6,7
Potassium (K2O)	8,9	1,035	16,8
C/N	16,1	7,65	8,2

Tableau 2 : Valeur agronomique des boues comparée à d'autres engrais organiques

La proportion de matière organique dans les boues est un peu plus faible que celle dans le fumier de bovin ou de volaille, mais reste tout de même intéressante.

L'azote total présent dans les boues est en proportion légèrement plus élevé que dans le fumier de bovin et moins élevé que dans les fientes de volailles. On observe également cette tendance pour l'azote ammoniacal (l'azote directement assimilable par les plantes), le phosphore. Le rapport C/N est de 7,6 donc la libération de l'azote est assez rapide, c'est une bonne valeur.

A siccités égales, les boues sont beaucoup plus riches en calcium et en magnésium que le fumier de bovin et à peu près équivalentes aux fientes de volailles. Elles sont par contre très pauvres en potassium, il est presque inexistant dans leur composition.

Les boues sont donc de manière générale plus riches en éléments fertilisants que le fumier de bovin et légèrement moins riches que les fientes de volailles. Elles sont cependant très pauvres en potassium (quasi inexistant). On peut dire que cette boue s'apparente à un engrais à 10,3 unités d'azotes/ tonnes, 7,4 unités de phosphore/tonnes, 1 unité de potasse/tonnes, 29 unités de chaux/tonnes, 4,4 unités de magnésie/tonnes. Les unités de P, K, Ca, Mg sont quasiment immédiatement disponibles, mais les 10,3 unités d'azote sont essentiellement sous forme organique et doivent donc être minéralisées pour être disponibles pour les plantes (sous forme NH_4^+)

ETM et composés traces organiques

Les ETM (Elément trace métallique) ont une origine industrielle (Cd, Ni, Hg, Cr), domestique (Cd, Cu, Pb) et pluviale (Ni, Pb, Zn). Les métaux les plus toxiques pour l'homme sont Cd, Hg et Pb.

mg/kg	15/11/2008	25/02/2010	15/03/2010	Moyenne	Valeur max*
Cadmium (Cd)	5,1	2,05	2,03	2,04	10
Chrome (Cr)	300	372,47	269,76	321,115	1000
Cuivre (Cu)	98	168,85	186,76	177,805	1000
Mercure (Hg)		2,22	1,89	2,055	10
Nickel (Ni)	13,6	24,53	24,7	24,615	200
Plomb (Pb)	110	177,79	175,89	176,84	800
Zinc (Zn)	530,4	645,61	723,32	684,465	3000
Cr+Cu+Ni+Zn	942	1211,46	1204,54	1208	4000

(*) Valeurs maximum définies par l'arrêté du 8 janvier 1998

Tableau 3 : Éléments traces métalliques

mg/kg	25/02/2010	15/03/2010	Moyenne	Valeur max*
Fluoranthène	0,2621	0,2957	0,2789	5
Benzo(a)pyrène	0,1048	0,0739	0,08935	2
Benzo(b)fluoranthène	0,0839	0,0739	0,0789	2,5
Somme des 7 PCB	<0,1834	<0,1848	< 0,1848	0,8

(*) Valeurs maximum définies par l'arrêté du 8 janvier 1998

Tableau 4 : Composés traces organiques

Les éléments traces métalliques et composés traces organiques présents dans les boues, sont bien en dessous des valeurs maximales autorisées en France pour la revalorisation agricole (tableau 3 et 4), il n'y a donc pas de problèmes concernant la revalorisation à ce niveau. De plus, les valeurs sont stables d'un mois à l'autre (entre février et mars 2010) ce qui est positif. Il serait tout de même intéressant de pouvoir comparer à d'autres analyses. La différence entre les celles de 2008 et celles de 2010, est due au raccordement de nouvelles zones au réseau et notamment de la zone industrielle de Marrakech.

Pathogènes et hygiène des boues

Les boues contiennent de nombreux micro-organismes qui jouent un rôle important dans le processus d'épuration de l'eau et de transformation des boues. Certains de ces micro-organismes, une infime minorité, sont considérés comme pathogènes. Ils sont classés parmi les virus, les bactéries, les protozoaires, les champignons et les helminthes. La concentration des eaux usées et par extension, des boues de STEP, en pathogènes dépend bien sûr de la provenance des eaux usées. Ainsi, les eaux provenant d'abattoirs ou d'autres industries traitant des produits animaux est plus largement contaminée en micro-organismes pathogènes. Marrakech n'est pas une ville dont les industries travaillent avec ce type de produits ce qui limite la présence de pathogènes.

	25/02/2010	15/03/2010	Moyenne	Valeur max pour boue hygiénisée
Coliformes Thermotolérants	2300000/g	2800000/g	2550000	/
Salmonelles	1100/10g de MS	1100/10g de MS	1100/10g de MS	8/10g de MS
Œufs d'helminthes	<1/10g de MS	86/10 g de MS	43/10g de MS	3/10g de MS
Antérovirus	<2/10g de MS	<2/10 g de MS	<2/10g de MS	3/10g de MS

Tableau 5 : Pathogènes

Le tableau 5 présente la teneur en 4 pathogènes des boues et donne les valeurs à partir desquelles une boue peut être considérée comme hygiénisée.

Les boues de la STEP de Marrakech ne sont pas hygiénisées puisqu'elles n'ont pas subi de traitement d'hygiénisation (chaulage, séchage à haute température, compostage...) elles possèdent cependant un taux de CaO plus important que la moyenne, qui les apparente presque à des boues chaulées et on peut dire que la digestion anaérobie hygiénise en partie les boues. Cependant, lorsqu'on compare les quantités de pathogènes présents dans les boues déshydratées avec les valeurs maximum pour une boue hygiénisée (tableau 5), on constate que la condition « salmonelles < 8/10 g de MS n'est pas respectée et celle « œufs d'helminthes < 3/10 g de MS » n'est pas toujours respectée non plus. On ne peut donc pas parler de boues hygiénisées.

Il n'existe cependant pas de norme obligeant les boues à être hygiénisées. C'est un point positif lorsqu'elles le sont mais dans le cas contraire, cela n'empêche pas de revalorisations en particulier.

3.2.2.3. Le pouvoir Calorifique Inférieur (PCI)

Le PCI est une propriété des combustibles. Il s'agit de la « quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible, la vapeur d'eau étant supposée non condensée et la chaleur non récupérée ». Elle s'exprime dans trois unités (Annexe 2) : J/g, Kcal/kg, Kwh/t. Cette information a une importance si on souhaite incinérer les boues afin de produire de la chaleur (par exemple en cimenterie).

Le PCI des boues de Marrakech a été mesuré par la compagnie des Ciments du Maroc. Il serait d'environ 2800 kcal/kg (=11 MJ/kg) pour des boues sèches. Cela correspond à peu près au chiffre observable dans la figure 10 pour une boue digérée et sèche (aux alentours du point A).

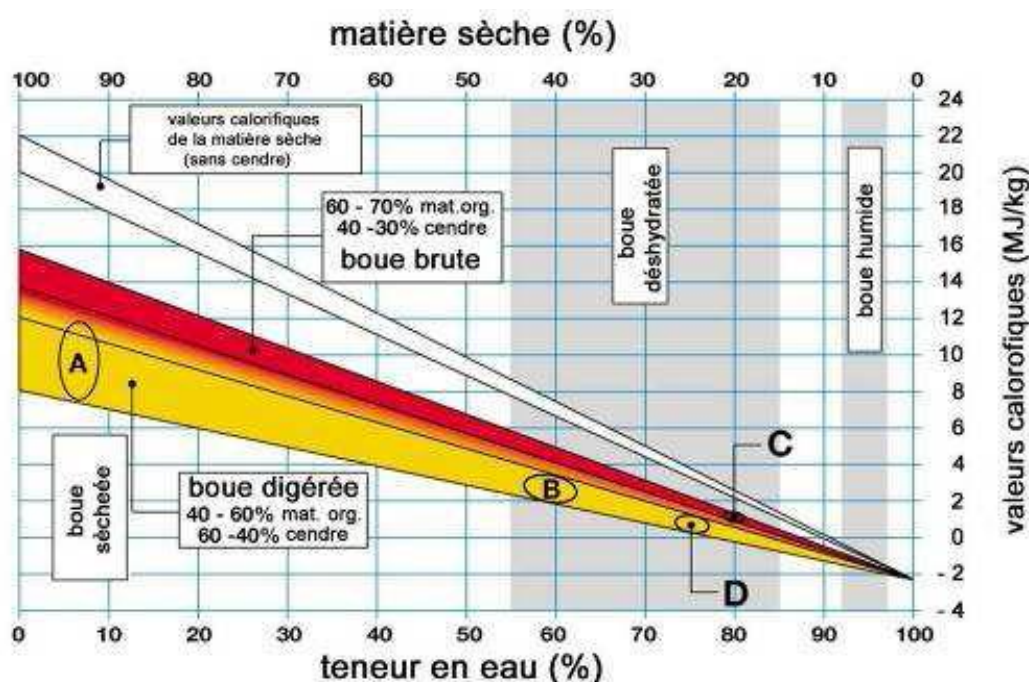


Figure 10 : Valeur calorifique des boues d'épurations (8)

Les boues digérées ont une valeur calorifique inférieure aux boues brute (figure 10) du fait que la digestion élimine la matière organique et donc la matière susceptible d'être dégradée pour produire de la chaleur. De plus, les boues de la STEP de Marrakech proviennent d'une décantation primaire c'est-à-dire d'une décantation qui concerne fortement la matière minérale. Elles sont donc moins calorifiques que des boues issues de traitement secondaire. Pour finir on observe clairement sur la figure 10 que le pouvoir calorifique diminue avec la siccité. Ainsi, lorsque les boues sortent de la station d'épuration à une siccité de 31%, leur pouvoir calorifique se situe au niveau du point D sur la figure 10. La quantité d'énergie produite va donc être très inférieure à celle des boues séchées (1MJ/kg au lieu de 11 MJ/kg). On comprend donc aisément à quel point le séchage des boues peut améliorer la propriété calorifique des boues.

3.2.2.4. La capacité de séchage des boues

Du fait de l'importance de la valeur de la siccité des boues, nous avons, tenté de comprendre la dynamique de séchage des boues. Cela devrait en effet permettre d'organiser plus facilement la gestion des boues et de leur séchage en vue de les valoriser.

La première expérience à avoir été réalisée consistait à constituer un tas très semblable à ceux qui sont fait lorsque le camion dépose les boues sur le terrain de stockage. Le tas mesurait ainsi environ 70 cm de haut pour un mètre de long et 70 cm de large (figure 11).



Figure 11 : tas de boue d'environ 70 cm de haut

Nous avons ensuite suivi l'évolution de la siccité du tas en prenant des échantillons deux fois par semaine (à trois ou quatre jours d'intervalle) à 40 cm de profondeur. Nous avons également répertorié les données météo pouvant jouer sur la vitesse de séchage des boues durant toute l'expérience. Nous avons ainsi suivi l'évolution de la température, la vitesse du vent, la durée d'ensoleillement, et l'humidité relative (Annexe 3).

Avec une température moyenne d'environ 30°C sur la durée de l'expérience, une température maximum journalière de 38°C et une température minimum de 22°C en moyenne tout au long de l'expérience, un vent moyen de 13 km/h et une humidité relative moyenne de 28%, on constate qu'une « croute » extrêmement sèche d'une dizaine de centimètres se forme en surface au bout de quelques jours à peine. En revanche, la siccité à l'intérieur n'augmente pas et aurait même tendance à baisser légèrement durant les premiers jours. Ce phénomène s'explique par le fait que les boues ne sont pas totalement stabilisées, des phénomènes de fermentation

perdurent et s'ajoute à l'activité d'insectes, ce qui provoque la diminution de la siccité. De plus, la croute en surface a tendance à étanchéifier le tas et donc à limiter le séchage et à faciliter cette fermentation.

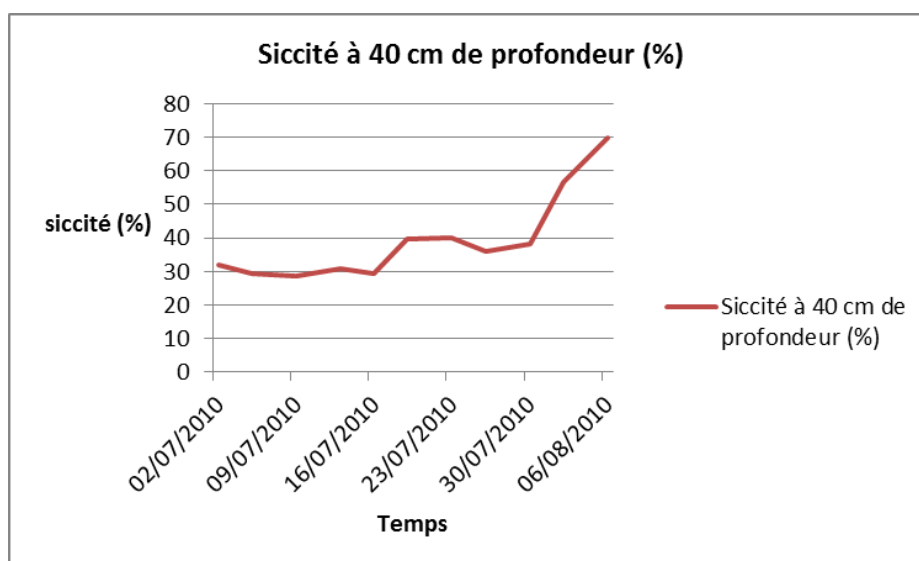


Figure 12 : Evolution de la siccité d'un tas de boue de 70 cm de hauteur en plein air.

Su la figure 12, on constate le séchage des boues, mais on remarque surtout que de nombreuses valeurs semblent aberrantes, et cela illustre parfaitement la difficulté de prélever des échantillons corrects dans un tas de boue. En effet, chaque prélèvement détruit un peu plus le tas et l'aère à certains endroits plus qu'à d'autres ce qui fausse les résultats suivants. De plus, les contours du tas sont très irréguliers, et cela s'accroît avec le séchage, le critère de prélèvement à 40 cm de profondeur devient donc très subjectif et imprécis.

Cette première expérience étant trop peu précise, nous avons réalisé une **seconde expérience**. Nous avons ainsi constitué 4 tas de boue, de 20, 30, 40 et 50 cm de hauteur aux contours plus réguliers (Figure 13). Nous avons pris un échantillon par semaine au centre milieu de chaque tas, car la première expérience nous a démontré que la vitesse de séchage ne nécessitait pas plus d'échantillon. Le but est de définir l'épaisseur de séchage la plus intéressante, c'est-à-dire celle qui permettra le meilleur séchage en proportion de la surface utilisée.



Figure 13 : 4 tas de boues de 30, 40, 50 et 20 cm de hauteur

La figure 14 représente l'évolution de la siccité des différents tas. Pour cette expérience, nous n'avons pas constaté le phénomène de diminution de la siccité en début, comme nous l'avions

observé avec le tas de 70 cm de haut. Cela est probablement dû à la différence d'épaisseur de boue qui a permis de créer un environnement propice à la fermentation et à l'activité des microorganismes pour le tas de 70 cm de haut et pas pour les autres.

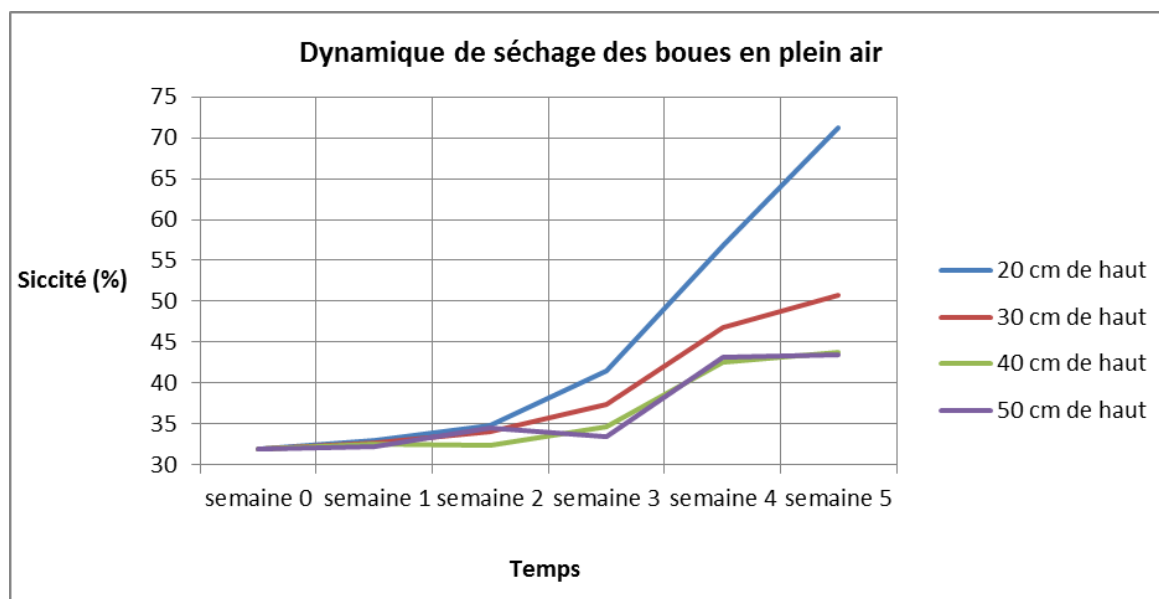


Figure 14 : Evolution de la siccité des tas de 20, 30, 40 et 50 cm de haut en plein air.

Les siccités indiquées sur le graphique de la figure 14 sont celles à mi- profondeur des tas. Cela ne représente donc pas la siccité moyenne du tas. Au bout d'un mois de séchage (semaine 4), nous avons donc réalisé des carottes de boues de chaque tas, que nous avons « mixées », afin de connaître la siccité globale de chaque tas. En combinant les différentes données, nous avons pu évaluer approximativement l'allure des courbes d'évolution de la siccité globale des 4 tas (figure 15).

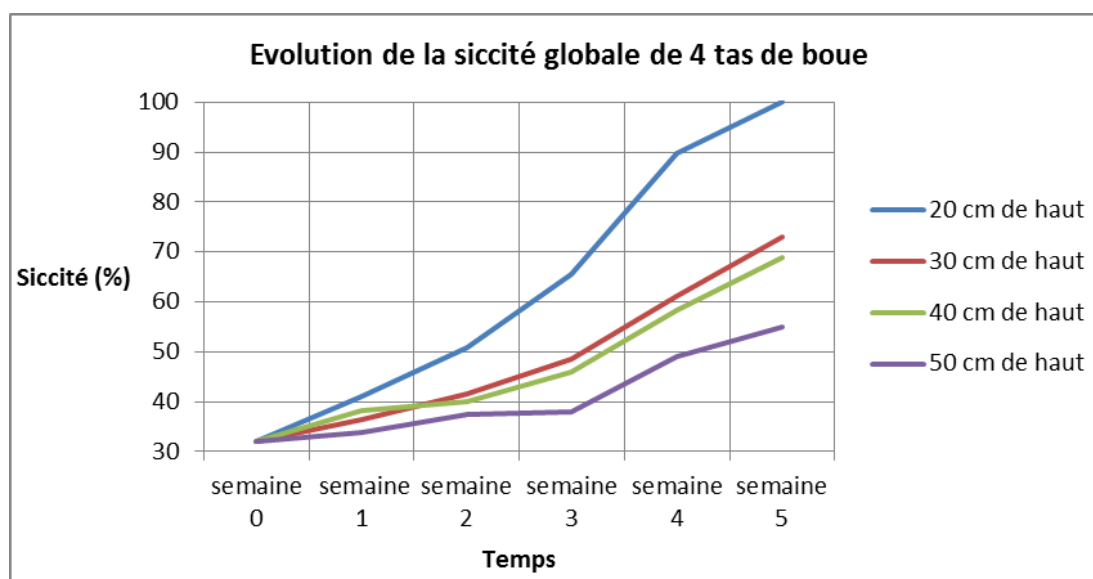


Figure 15 : Evolution de la siccité globale de 4 tas de boue de différentes hauteurs en plein air

Ces expériences ont permis de déterminer la vitesse de séchage de la boue de la STEP de Marrakech en plein air, en été, à Marrakech. On peut donc dire que la vitesse observée est la plus importante que l'on puisse mesurer durant l'année, puisqu'il s'agit de la période la plus sèche et la plus chaude. On constate ainsi qu'avec une épaisseur de boue de 20 cm, on parvient à sécher théoriquement entièrement la boue en 5 semaines et que pour la même durée de séchage, on avoisine les 70% de siccité pour les épaisseurs de 30 et 40 cm, ce qui reste très intéressant.

3.2.2.5. La propriété inflammable des boues

Les boues qui sèchent sur le terrain de stockage prennent très facilement feu. Nous avons donc tenté de découvrir à partir de quelle siccité les boues sont susceptibles d'être facilement enflammées (cela dans le but d'optimiser le stockage des boues et leur séchage tout en évitant leur combustion).

Pour cela, nous avons placé de la boue déshydratée à l'étuve, et avons extrait un échantillon toutes les 3h pendant 24h (= temps de séchage total des boues à l'étuve) nous avons ainsi un panel de boues déshydratés, à différentes siccités et issues du même échantillon de départ. Nous avons ensuite tenté de mettre le feu à chacun des échantillons à l'aide d'un chalumeau. Le résultat est qu'aucun des échantillons n'a facilement pris feu, pas même celui théoriquement complètement sec.

Il apparaît donc qu'un autre élément favorise la combustion des boues au terrain de stockage. Nous soupçonnions ces dernières de continuer leur fermentation sur ce terrain. Nous avons donc cherché à connaître si du biogaz y était produit. Pour cela, nous avons utilisé un appareil qui permet de mesurer le pourcentage de la LIE (Limite Inférieure d'Explosivité) du méthane et le CO₂. Nous avons ainsi constaté que ces taux étaient respectivement de 7% et de 5%.

On peut donc en conclure que les boues de la STEP continuent à fermenter sur le terrain de stockage et que le gaz produit est probablement le facteur qui favorise et facilite la combustion des boues. En effet, grâce à la présence de gaz, seules quelques cendres incandescentes (provenant de la décharge par exemple) suffisent à enflammer les boues. De plus, nous avons pu observer que lorsque les boues prennent feu, tout l'ensemble brûle, y compris les boues encore relativement humide (35-40% de siccité).

3.3. La gestion de l'évacuation des boues : problématique

3.3.1. Démarrage de l'exploitation et gestion des boues

Le projet de réalisation de la STEP de Marrakech n'intégrait pas la filière boue, aucune solution de destination des boues autre que la décharge n'a donc été étudiée avant le début de l'exploitation de la STEP. Pourtant, aucun accord formel n'a été signé entre la municipalité et la RADEEMA autorisant l'évacuation durable des boues à la décharge.

L'ordre de service de démarrage de la station d'épuration a été donné le 1 avril 2009. Les boues de la STEP sont à cette époque évacuées à la décharge municipale. Cependant, la gestion de la décharge étant très superficielle et plutôt « anarchique » (personnes qui vivent dans la décharge, moutons qui y « pâturent », camions poubelles qui déposent les ordures sur des terrains privés à côté de la décharge, ordures constamment en train de se consumer...), la

décharge n'est pas stable et le dépôt des boues de la station d'épuration rendait encore plus difficile l'accès pour les autres camions. Ainsi, le 1 juillet 2009, après seulement 3 mois de dépôt, le camion qui transporte les boues de la STEP à la décharge publique se voit refuser l'accès à cette dernière. Les boues vont alors être stockées au sein même de la station pendant quelques jours. Une solution provisoire est trouvée une semaine plus tard elle permettra de continuer à décharger les boues pendant 6 mois dans une zone de la décharge publique.

3.3.2. Mise en place d'une gestion provisoire des boues

Le 29 janvier 2010 la RADEEMA et Degremont ont signé une convention dans laquelle Degremont s'engage à trouver un terrain pouvant accueillir de manière temporaire les boues et à assurer la gestion de l'entassement des boues en attendant de mettre en place une solution de revalorisation. Il est précisé que la commercialisation des boues ne fait pas partie de la prestation. Degremont a ainsi loué et aménagé un terrain d'un hectare attenant à la décharge publique pour limiter les désagréments dus au stockage des boues déshydratées. Les boues y sont stockées depuis le 24 février et à la fin du mois d'août le terrain arrivera à saturation.

De plus, la facilité avec laquelle les boues brûlent complique la situation. En effet, la proximité de la décharge publique qui se consume et les gaz issus de la fermentation ainsi que le pouvoir calorifique des boues lorsqu'elles sèchent facilitent la combustion incontrôlée de ces dernières. Le 20 juillet 2010, les boues ont pris feu, et elles n'ont cessé de se consumer par la suite, rendant impossible leur manipulation. La combustion détruit également les possibilités de revalorisation en éliminant la matière organique présente dans les boues. Cette combustion représente tout de même un petit avantage, celui de diminuer le volume de boue et de laisser un résidu totalement stable.

3.3.3. Problématique : évacuation et stockage des boues

La station d'épuration produit et doit évacuer 71 tonnes de boues à 31% de siccité par jour. Cela représente en moyenne 66 m³ et donc 5 bennes de 13 m³ de volume utile par jour. Aucune filière boue n'a été envisagée à la création de la STEP, et à la fin de l'été 2010, le terrain de stockage sera saturé et la station se retrouvera dans la même situation qu'en juillet 2009 et qu'en janvier 2010, c'est-à-dire, sans lieu où stocker ses boues. L'épuration de l'eau étant impossible sans production de boues résiduelles, l'absence de lieu de stockage des boues pourrait conduire à un arrêt du fonctionnement de la STEP, jusqu'à ce qu'une solution soit trouvée.

Devant ces faits, il devient évident qu'il est indispensable de découvrir et de mettre en place rapidement une ou des solutions qui permettraient d'évacuer la plus grande quantité de boue possible et ce, durablement.

4. La filière boue

4.1. Les filières boues en Europe

Comme nous avons pu le voir dans le paragraphe II. 2), la filière boue au Maroc est inexistante du fait de la petite quantité de stations d'épuration de grandes envergures et de leur récente mise en place.

Nous allons donc nous intéresser à la destination des boues en Europe. Les pays Européens ont de manière générale 3 modes d'élimination des boues de STEP :

- L'utilisation en agriculture ou en ou espaces verts ;
- L'incinération ;
- La mise en décharge.

On remarque cependant que les proportions de chaque destination peuvent être très différentes d'un pays à l'autre (figure 16). Certains pays tel que l'Allemagne n'utilisent presque plus la décharge comme mode d'élimination ($< 2\%$) alors que pour d'autres, comme l'Italie, ou la Roumanie il s'agit du mode d'élimination le plus pratiqué.

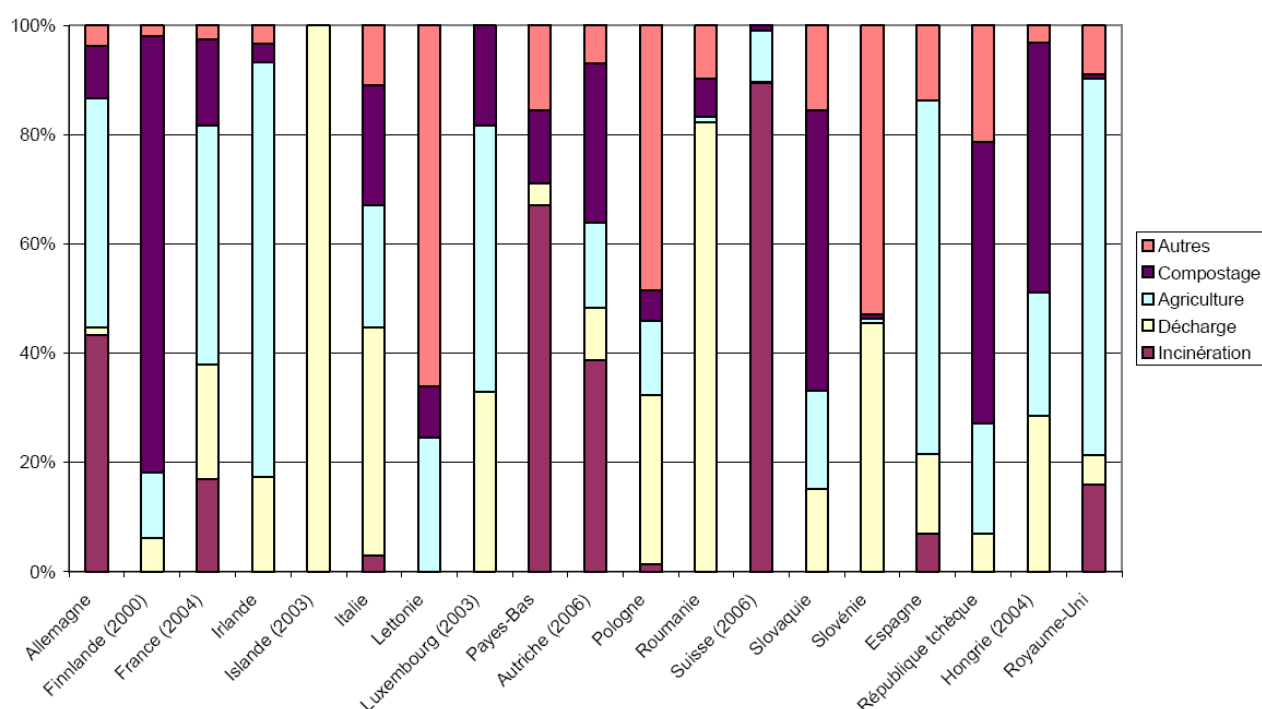


Figure 16 : Destination des boues en Europe (2005) (8)

On note tout de même une diminution progressive de la mise en décharge au profit d'autres filières telles que l'incinération. L'Allemagne a ainsi fait diminuer la part de cette filière de 54 % à 0,2 % en 10 ans. En France, elle devrait petit à petit être réduite jusqu'à être interdite en 2015.

4.2. Le séchage des boues

Le séchage des boues ne constitue pas une revalorisation ou une filière à part entière. Cependant, la siccité des boues à la sortie de la station (31%) est insuffisante pour la plus part des solutions de reprise des boues. De plus cela la rend plus facilement manipulable, diminue son volume et lui donne un meilleur aspect C'est pourquoi il est intéressant de connaître les

différents modes de séchage des boues. Il en existe plusieurs mais nous en traiterons seulement deux dans ce rapport.

4.2.1. Le séchage à l'air libre

C'est le mode de séchage le plus simple. Il s'agit seulement d'étaler la boue au soleil de manière à faire augmenter sa siccité. Dans ce cas, seul un terrain et une chargeuse sont nécessaires pour organiser le séchage.

Un séchage intéressant serait d'arriver à une siccité de 60%, car il s'agit de la limite où la boue commence à posséder tous les avantages d'une boue sèche au niveau de sa manipulation et de son apparence. Si on veut être le plus efficace possible, une siccité de 60% est donc idéale. Les expériences réalisées sur la vitesse de séchage des boues (3.2.2.4 p 19) peuvent servir à évaluer la taille du terrain nécessaire. D'après ces résultats, on peut dire qu'une siccité de 60% est obtenue approximativement en 3 semaines pour une épaisseur de boue de 20 cm, 4 semaines pour 30 et 40 cm d'épaisseur et environ 6 semaines pour 50 cm d'épaisseur de séchage. On peut établir une relation entre le temps de séjour des boues sur le terrain, la surface du terrain et l'épaisseur :

$$\text{Surface (ha)} = (\text{TMB} * \text{Ts}) / (\text{e} * 10\,000 * 1,05)$$

TMB = Tonne de matière brute par jour(t) (en moyenne 71t/j à la STEP de Marrakech)

Ts = Temps de séjour (en jours et défini par la figure 15 p 19 en fonction de l'épaisseur et de la siccité désirée)

e = épaisseur (m)

Par exemple, si on étale les boues avec une épaisseur de 50 cm, on atteint 60% de siccité en 6 semaines environ. On peut donc établir un roulement (Ts) de cette durée. Dans ce cas un terrain d'un hectare comme l'actuel est suffisant, en considérant qu'il ne s'agit que du terrain de séchage et non de stockage, c'est-à-dire que les boues sont évacuées dès qu'elles sont sèches.

Les avantages et les inconvénients de ce séchage sont répertoriés dans le tableau qui suit.

Avantages	Inconvénients
Peu d'investissements financiers à faire	Demande une surface importante
Frais d'entretien et d'exploitation très limités	Boue non chaulée => fermentation qui se poursuit et provoque la combustion +CH ₄ (gaz à effet de serre)
Rapide et facile à mettre en place	Boue exposée aux intempéries => aucunes certitudes sur la vitesse de séchage
	Gestion de l'évacuation à mettre en place (chargement des boues après séchage)
	Technique qui pourrait être interdite ou devenir très règlementé dans l'avenir comme l'est le stockage des boues en Europe

Tableau 6 : Avantages et inconvénients du séchage solaire de boues de STEP

Ce séchage étant le plus facile et rapide à mettre en place et le moins coûteux, et compte tenu de la situation plutôt urgente concernant le stockage des boues, cette technique est la plus appropriée pour sécher les boues de la station.

4.2.2. Le séchage avec sécheur thermique

Ce séchage est une méthode qui permet à la fois, une réduction de volume, et une amélioration de la qualité des boues urbaines. Il existe différents types de séchages (direct, indirect ou mixte). Nous allons ici détailler l'exemple du sécheur thermique Degrémont INNOPLANA 2E (9) qui est un sécheur mixte qui associe donc le séchage direct et indirect en deux phases. La première utilise un évaporateur à couche mince, il s'agit d'un cylindre à l'intérieur duquel la boue est étalée en fine couche sous l'effet de la vitesse de rotation du rotor central. Des ailettes font avancer la boue d'un côté à l'autre du cylindre et les parois sont chauffées avec de l'huile ou de la vapeur. A la sortie, la boue d'une siccité de 60% est compressée contre une grille perforée qui va la transformer en spaghettis avant la deuxième étape du sécheur à bande. Les granulés moulés par l'extrudeurs sont alors répartis sur la bande d'un sécheur à bande de 80°C. La vitesse d'avancement est réglée de manière à ce que les granulés atteignent la siccité souhaitée. Le produit final est stable et hygiénisé.

Avantages	Inconvénients
Pas de transport des boues humides à l'extérieur du site	Investissement
Réutilisation du biogaz produit par la STEP	Doit être prévu sur le site de l'usine (alimentation en boues humides, alimentation en biogaz)
La boue est hygiénisée/ stabilisée	Poste de séchage = nouvelle usine en plus de la STEP
Facilité de stockage des boues séchées en granulés	
Facilité d'évacuation des boues séchées en granulés	

Tableau 7 : Avantages et inconvénients du séchage thermique de boues de STEP

Malgré tous les avantages présentés dans le tableau 7, le séchage thermique n'est pas envisagé aujourd'hui à la STEP de Marrakech. Cette solution requiert en effet de lourds investissements, mais il s'agit surtout d'une unité de production à part entière, avec ses propres problèmes et dangers. C'est un métier différent du traitement de l'eau que la station ne peut assumer telle qu'elle est à l'heure actuelle.

4.3. La mise en décharge

Lors de l'appel d'offre pour la conception et la construction de la STEP de Marrakech, la RADEEMA avait prévu de mettre les boues en décharge. Mais comme nous l'avons expliqué précédemment, cela n'a pas été si simple. Ainsi, la mise en décharge est actuellement impossible à Marrakech pour des raisons pratiques (enlèvement des camions poubelles....). L'interdiction de déposer les boues dans la décharge publique est donc due à la consistance pâteuse et humide des boues et au fait que la décharge ne soit pas correctement entretenue.

On peut donc supposer que si les boues étaient sèches, le problème pratique ne se poserait plus et il serait à nouveau possible de poser les boues à la décharge publique avec les ordures ménagères. On voit donc là toute l'importance du séchage des boues, qui semble nécessaire même pour la mise en décharge.

De plus, il semble que la mairie de Marrakech souhaite faire des efforts concernant la décharge publique, des travaux, ou bien la création d'une nouvelle décharge publique seront donc probablement mis en place dans les années à venir. Le seul problème est que la date à laquelle Marrakech possèdera une décharge correctement gérée est encore inconnue. Lorsque ce sera le cas, il devrait être possible de remettre les boues en décharge. La seule question est « à quel prix ? ». A titre d'exemple, la décharge publique d'Agadir (gérée par un prestataire privé) demande 100 dh par tonne pour prendre les boues de la STEP de la ville. Il existe enfin une dernière solution, en effet, une telle décharge nécessite des matériaux pour enfouir périodiquement les déchets. Il serait probablement envisageable de proposer les boues, à condition qu'elles soient sèches, comme matériaux de remblaiement. Dans ce cas-là, la mise en décharge ne devrait rien coûter, et cette solution profiterait autant à la décharge qu'à la STEP et à la RADEEMA.

Dans cette partie sur la mise en décharge, il ne s'agit que d'hypothèses puisque aucuns travaux n'ont été fait sur le site.

Avantages	Inconvénients
Pratique la plus simple	Pas une solution d'avenir (l'Europe abandonne cette pratique, le Maroc en fera probablement de même d'ici quelques années)
Aucune organisation supplémentaire	
Site de la décharge proche de la STEP	Nécessité d'avoir une décharge capable de réceptionner les boues
Situation envisagée à l'appel d'offre pour la réhabilitation de la décharge publique	Nécessité d'avoir un accord entre gestionnaire de la décharge et gestionnaire de l'assainissement
	Boue non chaulée => fermentation qui se poursuit et provoque la combustion +CH ₄ (gaz à effet de serre)

Tableau 8 : Avantages et inconvénients de la mise en décharge de boues de STEP

4.4. L'utilisation des boues pour de l'épandage agricole et pour les espaces verts

4.4.1. Généralités

Les boues de STEP contiennent des nutriments et de la matière organique. C'est pourquoi elles peuvent servir d'amendement organique permettant d'améliorer les qualités physiques et chimiques du sol. Les nombreux micro-organismes présents dans le sol digèrent la matière organique des boues et la transforme en éléments minéraux disponibles pour les plantes. Une autre partie de la matière organique est incorporée au sol et contribue à créer une structure favorable au développement des racines. D'après le paragraphe 3.2.2.2 p 13 traitant de la qualité agronomique des boues, il semble qu'elles contiennent des concentrations tout à fait honorables en éléments fertilisants et leur effet bénéfique sur les cultures devrait être facilement observable.

Les boues contiennent également des éléments qui peuvent constituer des dangers pour la santé humaine et la qualité des sols à long terme. Ces éléments sont principalement les ETM, les composés traces organiques et les organismes pathogènes. Du fait de leur statut d'éléments potentiellement dangereux, des normes ont été créées en Europe et en France de manière à limiter l'impact de l'apport de boue, et éviter tout accident. Comme nous avons pu le voir dans le paragraphe 3.2.2.2 traitant de la qualité des boues de la STEP de Marrakech, il apparaît que d'après la législation française, ces boues ne présentent pas de concentrations trop élevées en ETM et en Composé trace organique et peuvent donc être utilisées à des fins agricoles. La qualité des sols est également importante dans le choix de la quantité de boue à épandre sur un terrain. Ainsi, lors de la réalisation d'un plan d'épandage, des analyses de sol doivent être réalisées de manière à s'assurer que le sol ne contient pas une concentration trop élevée en métaux lourds (valeurs limites données par la directive 86/278/CEE). Dans le cas de Marrakech, il ne devrait pas y avoir de problème car le pH des sols de la région est plutôt basique, ce qui réduit la mobilité des métaux lourds et leur absorption par les plantes.

Ces normes définissent également la quantité maximum de métaux lourds pouvant être apporté en moyenne par hectare et par an. On calcule ainsi, d'après les concentrations en métaux lourds des boues de la STEP, qu'il est possible d'apporter au maximum, par ha et par an, **141 tonnes** de boues brute ou **44 tonnes de matière sèche** de boue.

Pour terminer, D'après la littérature Lyonnaise des eaux (10), La surface nécessaire pour épandre les boues d'une STEP peut se calculer comme suit :

$$S \text{ (ha)} = \frac{\text{TMS} * N \text{ de la boue (kg/t)} * \text{fréquence de retour (min 3 ans)} * 1,2 \text{ (coefficient de sécurité)}}{200 \text{ (= N épandable en kg/ha)}}$$

Le résultat pour la station de Marrakech est qu'environ 1500 ha serait nécessaires si on décidait de valoriser toute la production de boue sous forme d'épandage agricole.

4.4.2. Qualité des sols susceptibles de recevoir des boues de la STEP

Si les boues de la Station d'épuration de Marrakech devaient être épandues sur des terres agricoles, il serait nécessaire de réaliser des analyses de sol sur chaque parcelle pour connaître sa composition exacte et optimiser la fertilisation, tout en limitant tout risque de pollution. Mais avant cela, il est intéressant de se faire une idée générale du type de sol susceptible de recevoir les boues de la station. L'office régional de mise en valeur agricole de la région de Marrakech nous a transmis les analyses de deux échantillons de sols (prélevé sur les 20 premiers centimètres) représentatifs d'environ 70% des terres agricoles de la région (en particulier celles semées de céréales). Ces résultats sont répertoriés dans le tableau 9.

		échantillon 1	échantillon 2	moyenne
granulométrie	gravier	1,6	0,2	0,9
	SG (0,2-2mm)	10,4	4,6	7,5
	SF (50-200µm)	38,9	26,5	32,7
	LG (20-50µm)	10,7	18,4	14,55
	LF (2-50µm)	15,9	24,2	20,05
	A (<2µm)	24,9	24,7	24,8
Chimie	pH	8,4	8,6	8,5
	CaCO ₃ (%)	5,7	2,4	4,05
	MO (%)	1,86	1,73	1,795
	N (%)	0,111	0,123	0,117
	C/N	9,7	8,2	8,95
	Ca (m.e/100g)	11,2	16	13,6
	Mg (m.e/100g)	2,4	0,8	1,6
	Na (m.e/100g)	0,4	0,2	0,3
	K (m.e/100g)	1,45	0,94	1,195
	CEC	14,5	17,5	16
	P ₂ O ₅ ass (‰)	0,192	0,22	0,206
	K ₂ O ass (‰)	0,675	0,443	0,559

Tableau 9 : Composition de deux échantillons de sol agricoles aux alentours de Marrakech.

D'après le triangle des textures (Annexe 4), il s'agit de sols limoneux à limono-argilo-sableux, mais dans les deux cas, ce sont des textures équilibrées. Ce sont des sols plutôt faciles à travailler qui possèdent une réserve utile (volume d'eau que le sol est susceptible d'absorber) correcte.

Le pH est en moyenne de 8,5 ce qui est très élevé. Ce pH est donc alcalin et se situe à la limite entre les sols cultivables et ceux trop alcalins pour la plus part des plantes. En effet, le pH optimal des sols pour les cultures se situe entre 5,5 et 7,5, car il s'agit du pH où la majorité des éléments nutritifs sont assimilables par les plantes. Dans la région de Marrakech, le but est donc d'éviter tout amendement qui augmenterait l'alcalinité du sol et de favoriser les amendements acide de type tourbe. La boue de la STEP peut donc être intéressante, surtout si elle est transformée en compost. De plus, un pH basique limite la mobilité des métaux lourds (qu'on peut trouver dans les boues) et leur absorption par les plantes.

La quantité de MO est en moyenne de 1,8%. Cette teneur est convenable mais il est tout de même conseillé de l'entretenir sérieusement car c'est un taux plutôt faible. Le pourcentage d'azote indique des terres moyennement pourvues en azote, et le rapport C/N est bon puisque proche de 10. La MO se décompose donc à un rythme correct. L'épandage des boues de la STEP direct ou après compostage améliorerait le stock de MO de manière significative.

La CEC est normale puisqu'elle est comprise entre 10 et 20 me/100g. Elle représente la quantité maximale de cations (H^+ , Ca^{++} , K^+ , Mg^{++} , NH_4^+ , Na^+ , etc) que le sol peut retenir sur le complexe absorbant en cations me/kg, cela reflète donc le « garde-manger du sol ». En l'occurrence, Il est ici tout à fait correct. Cela démontre également que si on apportait des amendements de type boue ou compost, ils seraient bien assimilés par le sol et donc bien transmis aux plantes.

En conclusion, la qualité des sols susceptibles de recevoir des boues de la STEP de Marrakech ne présente aucune particularité qui rendrait l'épandage des boues incohérent ou dangereux.

4.4.3. Effets des boues en Agriculture

Des tests ont été réalisés par la pépinière de Marrakech, en partenariat avec la faculté des sciences Semlalia de Marrakech. Ces expériences visaient à connaître les effets des boues sur les végétaux.

Ils ont ainsi réalisé des mélanges de boues avec de la terre et du sable dans différentes proportions et ont observé les effets sur la croissance de maïs et de fèves. Les mesures portaient sur la croissance foliaire, la croissance racinaire, la production de biomasse, la quantité de matière fraîche et ils ont également observé la couleur des plantes.

Nous n'avons malheureusement pas eu accès à des résultats précis et chiffrés des effets de la boue sur les plantes, car les travaux ne sont pas terminés. Cependant, M Abdilah, responsable de la pépinière et des tests nous a certifié que les premiers résultats étaient très positifs. En effet, la présence de boue a, à chaque fois eue des effets favorables sur les plantes. Elle a ainsi permis d'obtenir des plantes avec une hauteur aérienne et une longueur racinaire plus élevée que celle des plantes témoins, la couleur de celles ayant reçu un traitement à la boue était également plus verte, et la quantité de matière fraîche et de biomasse accrue.

4.4.4. Epandage des boues

L'épandage des boues est très pratiqué en Europe. Il s'agit de répandre les boues sur des parcelles agricoles pour les fertiliser comme on le ferait avec du fumier par exemple. Dans le cas des boues urbaines, cet épandage peut être réalisé directement après que les boues soient sorties de l'usine, après un séchage naturel en plein air, ou après un séchage thermique des boues (utilisation d'un sécheur thermique). Quelle que soit la possibilité retenue la principale difficulté de l'épandage agricole reste la gestion du transport des boues (tableau 10). En effet, il serait difficile pour la station de livrer la boue chez les clients du fait qu'elle ne possède qu'un camion. Il faudrait alors que les parcelles soient proches de la station, ou que les clients viennent récupérer eux même la boue.

Avantages	Inconvénients
Solution qui demande seulement la mise en place d'une plateforme de retrait des boues à la STEP. Possibilité d'ajout de fertilisants (KCl, K₂SO₄, urée, oligoéléments...) pour améliorer leur valeur agronomique avec le séchage thermique	Difficultés à épandre entre 30 et 50 % de siccité (épandage direct) Plateforme de reprise nécessaire pour l'épandage direct et après séchage naturel. Réalisation d'un plan d'épandage Suivi analytique à mettre en place. Pas de cadre réglementaire pour le Maroc, cadre contraignant dans les exemples européens. Coût du transport

Tableau 10 : Avantages et inconvénients de l'épandage des boues de STEP

4.4.4.1. *Epandage direct*

L'épandage direct ne requiert aucune transformation de la boue. C'est la plus simple des possibilités en termes de revalorisation agricole. Les boues sont récupérées dès la sortie de la STEP par les clients, pour être épandues. Un terrain de stockage est tout de même nécessaire pour faire face aux périodes où l'épandage est interdit (périodes de pluie...). L'inconvénient de cette pratique est bien évidemment l'aspect du produit mais également la praticité. En effet, à certaines siccité, notamment entre 30 % et 55 %, les boues sont pâteuses ce qui peut les rendre difficiles à manipuler et donc à épandre. Il faudrait donc tester si l'épandage est réellement faisable à 31% de siccité.

4.4.4.2. *Epandage après séchage en plein air*

Dans ce cas, les boues épandues ont été préalablement séchées en plein air. Cela permet d'avoir un produit qui a un meilleur aspect, qu'il diminue de volume ce qui diminue les frais de transport jusqu'aux parcelles agricoles et qui est plus facile à manipuler et donc à épandre, puisqu'il n'est pas pâteux. Un des inconvénients de ce système est que pour évacuer les boues du terrain de séchage, il va falloir les charger dans un camion avec une chargeuse, ce qui n'a rien de pratique.

Cette technique est utilisée par deux stations d'épuration de la société Degrémont au Mexique, à Puebla et Culiacan. Les boues issues d'une digestion anaérobie et déshydratées avec des filtres à bandes à une siccité de 25 à 27 % sont étalées sur un terrain, à une épaisseur comprise entre 15 et 20 cm et elles atteignent 60% de siccité en moins de 3 semaines. Le transport et la gestion des boues sont gérés par le client ce qui facilite les choses pour les stations.

4.4.4.3. *Epandage après séchage thermique*

Les boues séchées grâce à des sècheurs thermiques sont très intéressantes pour l'épandage agricole. En effet, elles se présentent sous forme de petits granulés très faciles à manipuler et à épandre (comme des engrais chimiques) de plus lorsqu'elles sont séchées avec cette méthode, on peut les enrichir en éléments fertilisants ce qui permet de les équilibrer en fonction de la

nature des sols de la région et donc des besoins. Elles sont facilement évacuées de la station puisqu'elles peuvent être mises en big bag par exemple, à la fin du processus de séchage.

4.4.5. Compostage

Les boues peuvent être compostées avant d'être utilisées en agriculture ou dans les espaces verts. Ce procédé permet de transformer le produit, de le rendre plus intéressant du point de vue agronomique, et de lui donner un aspect visuel plus agréable, ce qui est positif pour les consommateurs.

Le principe du compostage des boues urbaines réside en 4 étapes (11) :

- 1) **Mélange des boues avec un co-produit** (proportion : 1 volume de boue pour 2,5 volume de co-produit) le mélange est homogénéisé par retournement.
- 2) **Fermentation** (3 à 4 semaines), le mélange est placé en andains (ex : 4m de hauteur, 5 m de largeur, 10 m de long). Le but est de permettre une bonne aération (par retournement ou aspiration et ventilation) pour favoriser le développement des bactéries et champignons qui vont dégrader la matière organique. La température augmente du fait de l'activité de ces micro-organismes et peut atteindre 70°C.
- 3) **Maturation** (8 à 16 semaines), le mélange est placé en andains (ex : 4m de hauteur, 5 m de largeur, 10 m de long) et retourné bimensuellement. C'est la phase de stabilisation du produit.
- 4) **Tamissage** du compost. Cela permet de récupérer le co-produit excédentaire pour le mélanger de nouveau à de la boue qui doit être compostée.

Ce processus nécessite deux zones aménagées, une pour la fermentation (dalle bétonnée équipées de drains et ventilateurs pour aération forcée + hangar) et une pour la maturation (Dalle bétonnée). Il est également nécessaire de procéder à des opérations de manutention avec une chargeuse pour déplacer la boue d'une zone à une autre.

Cette solution de revalorisation est très séduisante et c'est pour cela qu'elle se développe beaucoup en Europe à l'heure actuelle. Cette option qui peut paraître un peu difficile à mettre en place au Maroc où le bois est rare, et donc le coproduit difficile à trouver, pourrait pourtant bien se concrétiser à Marrakech. En effet, cette ville est très touristique et elle accorde beaucoup d'importance aux espaces verts. La mairie entretient ainsi 280 ha d'espaces vert qui produisent chaque année près de 14 000 tonnes de déchets vert. Ces derniers qui partent actuellement en majorité à la décharge publique constitueraient un co-produit tout à fait approprié pour composter les boues. De plus la pépinière de la mairie de Marrakech a pour projet d'installer un détachement de 15 ha non loin de la station d'épuration dans le but de faire du compostage de ces déchets verts. Cela faciliterait fortement les échanges. Cette même pépinière teste en ce moment, en partenariat avec la faculté de sciences Semlalia de Marrakech, les possibilités de compostage des boues et les qualités du compost.

Cette possibilité est très intéressante, mais il ne faut tout de même pas oublier qu'une STEP de l'ampleur de celle de Marrakech, qui produit 71 tonnes de boues par jour, ne peut s'improviser composteur du jour au lendemain. Il faut en effet considérer le fait que créer une unité de compostage correspond à créer une usine à part entière (bâtiments, employés matériel...) avec

tous les investissements qui accompagnent. Certes, un partenariat avec la pépinière de Marrakech faciliterait beaucoup de choses puisqu'elle possède toutes les connaissances et les compétences permettant de mettre en place une unité de compostage. Il n'en reste pas moins qu'un tel projet se chiffrerait en plusieurs millions d'euros et qu'il faudrait convaincre certains investisseurs (Mairie, RADEEMA...).

Avantages	Inconvénients
Aspect du produit	Investissement
La boue devient un amendement : amélioration de la texture du sol	Nécessite l'ajout d'un co-produit (paille, sciure écorce, palettes broyées, déchets verts...)
Boue hygiénisée	Occupe beaucoup de place
Boue désodorisée	Plusieurs mois de transformation : entre 3,5 mois et 5 mois selon les sources
Produit commercialisable	Demande du temps (retourner, mélanger...)
Permet une double revalorisation : boues et déchets verts	⇒ L'exploitation

Tableau 11 : Avantages et inconvénients du compostage des boues de STEP

4.4.6. Conclusions de la filière agricole/espaces verts

La revalorisation agricole est très répandue en Europe et tend même à s'étendre de plus en plus avec la diminution de la mise en décharge des boues urbaines. Ce procédé plutôt rebutant et « inquiétant » (pollution, dangers pour la santé humaine...) au premier abord a réussi à se faire une place de choix dans la filière boue en Europe. Reste maintenant à savoir si le même développement du principe est possible au Maroc. En effet, l'agriculture au Maroc est relativement différente de l'agriculture Européenne, ainsi, seulement 4% des exploitations dans la région Marrakech-Tensift-El Haouz, ont une surface supérieure à 20 ha et 70% ont moins de 5 ha (12). Cette prédominance de la micropropriété ne facilite pas la mise en place d'un plan d'épandage sur plus de 1500 ha. Il est vrai cependant, que les exploitations de surface supérieure à 20 hectares ont souvent beaucoup plus de 20 hectares. On peut ainsi rencontrer des exploitations de plusieurs centaines d'hectares notamment dans le domaine de l'arboriculture (olivier et arganier).

Ce sont les grosses exploitations qui constitueraient des clients intéressants pour les boues. Il s'agit donc de trouver de grosses exploitations qui produisent des céréales ou fourrages destinés à l'alimentation animale (productions sur lesquelles il est autorisé d'épandre des boues) dans la région de Marrakech. Il se pourrait que cela se révèle difficile. Il semblerait en effet que les exploitations de grande taille ne s'intéressent pas à ces productions à faible valeur ajoutée.

Pour finir, l'absence de législation dans le domaine, à l'heure actuelle, ne va pas rassurer les utilisateurs potentiels quant à la fiabilité du produit. Il va falloir convaincre les exploitations que le produit n'a rien de néfaste. Le compost aurait l'avantage d'être plus facilement accepté par les utilisateurs, mais une filière compostage est plus longue à mettre en place du fait des

investissements nécessaires. Cependant, quelle que soit la revalorisation agronomique choisie, il faut trouver les clients, répertorier la qualité physique et chimique des sols des parcelles choisies et mettre en place un plan d'épandage. De plus il est compliqué d'organiser une réutilisation des boues sans avoir de réglementation appropriée.

La revalorisation agricole est donc tout à fait envisageable à Marrakech, mais pas évidente non plus. Elle nécessiterait de nombreuses réunions avec différents acteurs publics (office régional de mise en valeur agricole, mairie...) et privés (clients potentiels...), ce qui prendrait bien évidemment un certain temps. Elle reste tout de même une solution de revalorisation bon marché pour la STEP et donc très intéressante, si on fait abstraction de la difficulté que risque de constituer la mise en place d'un plan d'épandage sur 1500 hectares dans cette région.

4.5. La revalorisation énergétique

4.5.1. L'incinération en cimenterie (fabrication de chaleur)

Les boues peuvent être utilisées comme combustible par les cimenteries. En Europe, elles incinèrent un grand nombre de déchets dont les ordures ménagères et les boues de stations d'épuration. Cette valorisation des boues nécessite une certaine siccité car plus la siccité est basse et plus le pouvoir calorifique est diminué (l'évaporation de l'eau utilise une partie du pouvoir). C'est pourquoi un séchage des boues devrait être envisagé pour accompagner ce type de valorisation. Cependant, aucune siccité minimum n'est définie par les cimenteries. On peut seulement dire que plus la boue est sèche, plus elle sera énergétique et donc intéressante pour l'incinération. Bruler des boues permet de faire fonctionner les fours qui cuisent le calcaire qui composera ensuite le ciment.

La société « Ciments du Maroc » est une filiale d'Italcementi Group. Il s'agit du deuxième cimentier au Maroc, il y possède 3 usines dont une à 45 km de Marrakech. « Ciments du Maroc » manifeste actuellement un certain intérêt pour les boues de STEP. Le groupe Italcementi utilise déjà avantageusement ce type de déchets ainsi que des déchets ménagers dans d'autres filiales du monde (avantages financiers et bonne image vis-à-vis de l'environnement en réutilisant des déchets et en économisant les énergies fossiles) ce qui les incite à développer ce système.

Deux rencontres ont déjà été organisées entre les ciments du Maroc et la STEP de Marrakech. Elles ont été encourageantes, et un essai industriel devrait être réalisé. Il permettra d'observer le pouvoir calorifique des boues et donc les capacités de celles-ci à remplacer le combustible actuel qui est le charbon, mais également la praticité du produit (transport, manipulation...). Après cet essai il sera possible de dire si un partenariat est imaginable avec la cimenterie située à 45 km de Marrakech. A court terme, cette destination des boues semble être une des meilleures solutions puisqu'elle ne demande pas vraiment de changements d'organisation de la gestion des boues

Avantages	Inconvénients
Simple et rapide à mettre en place Double effet « développement durable » : recyclage d'un déchet et économie d'énergie fossile	La siccité des boues est insuffisante à la sortie de la STEP donc nécessite un séchage Cout du transport (90km aller-retour) Organisation pour livrer toute la boue à cette distance avec un seul camion

Tableau 12 : Avantages et inconvénients de l'incinération en cimenterie des boues de STEP

4.5.2. La carbonification (fabrication d'énergie)

Il s'agit d'un procédé proposé par une entreprise allemande du nom de « Terranova energy ». Il repose sur la carbonisation hydrothermale. La biomasse à modifier, en l'occurrence, la boue, est transformée en boue de charbon dans un autoclave. La boue est ensuite déshydratée puis séchée (13). Le produit final est un charbon biologiquement stable, stockable et de valeur énergétique plus importante qu'un charbon classique. Il peut ensuite être utilisé comme un charbon classique. Les clients potentiels de ce type de produit peuvent être des cimenteries.

Une rencontre avec un représentant de la société a déjà eu lieu, mais malgré la motivation de ce dernier, la carbonification ne semble pas très intéressante pour la STEP de Marrakech (tableau 13). En effet, la société n'a pas d'expérience, le dimensionnement des machines serait à revoir car il n'est pas approprié à une telle quantité de boue (prévu pour traiter 4 tonnes de boues par jours alors que la STEP en produit 71). Pour finir il faudrait trouver des clients, et il n'est pas évident que les cimenteries préfèrent ce combustible très énergétique mais payant, aux boues, moins efficaces mais gratuites.

Avantages	Inconvénients
Transforme le produit en charbon stable Facilite le stockage, et le transport Produit commercialisable Utilisation de l'énergie produite par le biogaz	Doit être prévu sur le site de l'usine (alimentation en boues humides, alimentation en biogaz) Société pas encore bien établie (pas d'expérience, seulement des projets) => process à sécuriser Dimensionnement de la machine déjà existante trop petit Trouver des clients pour ce produit payant

Tableau 13 : Avantages et inconvénients de la carbonification des boues de STEP

4.6. La transformation en matériaux de construction

Les boues peuvent être transformées en matériaux de construction. Le procédé (figure 17) consiste à mélanger des boues de plus de 60% de siccité avec des minéraux argileux. Le mélange est ensuite façonné en briques qui vont être séchées puis cuites à une température de 1000 à 1200°C selon la nature de l'argile employée. Durant la cuisson, la matière organique est minéralisée, ce qui crée de la porosité dans les briques et les allèges. Au final, on obtient un matériau de construction en céramique, inerte, dans lequel les métaux lourds sont piégés. Ces briques sont conformes aux normes NF EN 13055-1 et NF EN 13055-2. Ce procédé a été baptisé vbc3000 et l'entreprise qui l'exploite porte le même nom (14).

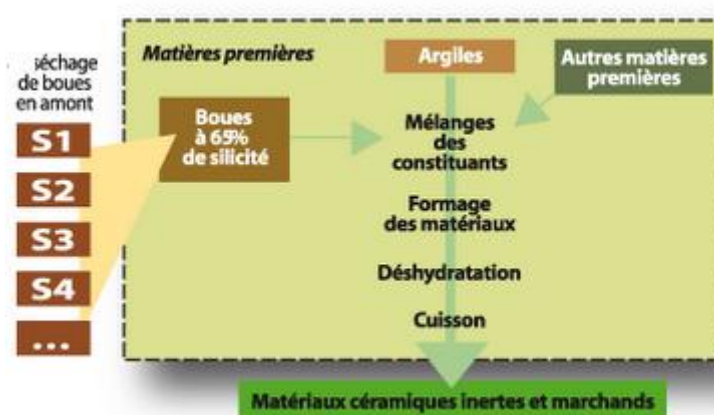


Figure 17 : Schéma du procédé vbc3000

Ce procédé original et innovant commence à être envisagé dans certaines régions Françaises, mais comme pour la carbonification, l'entreprise a peu d'expérience, et aucune à l'étranger. De plus, il s'agirait vraiment d'une usine de matériaux de construction à part entière, ce qui ne correspond pas exactement aux solutions d'évacuation des boues que recherche la STEP c'est-à-dire la plus simple, la plus rapide et la moins coûteuse à mettre en place.

Avantages	Inconvénients
Matériaux de construction stable	Doit être prévu sur le site de l'usine (alimentation en boues humides, alimentation en biogaz)
Métaux lourds piégés	
Produit commercialisable	
Utilisation de l'énergie produite par le biogaz	Société pas encore bien établie (pas d'expérience, seulement des projets)

Tableau 14 : Avantages et inconvénients de la carbonification des boues de STEP

4.7. Comparaison des différentes possibilités

4.7.1. L'investissement et les coûts d'exploitation

Il serait intéressant de connaître les coûts d'investissement et d'exploitation des différentes solutions permettant de se débarrasser des boues. Il est malheureusement très difficile de récolter des données comparables. En effet, les documents trouvés ne prennent pas en compte les mêmes dépenses (certaines considérant le transport des boues, d'autres pas...), et la plus part du temps, ces frais ne sont pas explicités, ce qui ne permet pas de comparer correctement les différentes possibilités. Dans le tableau 15, on a tout de même tenté de comparer la mise en décharge, l'épandage, le compostage et l'incinération en cimenterie, qui sont les quatre possibilités les plus intéressantes pour la STEP de Marrakech (8). Le tableau ne tient pas compte du séchage des boues qui peut être pratiqué ou non dans chaque cas.

	Coût d'investissement	Coût d'exploitation
Mise en décharge	Quasi nul	10 euros/ TMB pour la mise en décharge + Transport
Epandage de la boue brute ou séchée naturellement	Quasi nul	Dépend du transport et donc de la distance des parcelles
Compostage	160 euros/TMS	95 euros/TMS
Incinération en cimenterie	Quasi nul	Dépend des accords entre la cimenterie et la STEP au niveau du transport des boues de la STEP à la cimenterie

Tableau 15 : Notion sur les coûts d'investissement et d'exploitation de quatre filières boue

On observe très nettement que seul le compostage nécessite un réel investissement au départ. Les coûts des trois autres possibilités sont plutôt liés au transport des boues.

4.7.2. Bilan des possibilités

Il existe de nombreuses solutions permettant de revaloriser les boues de station d'épuration (figure 18) ou du moins de les évacuer de la STEP. Certaines sont très intéressantes et en pleine expansion en Europe, mais coûteuses et donc plus difficiles à mettre en place du moins à court terme. Il s'agit notamment du compostage. D'autres telles que la carbonification et la fabrication de matériaux de construction sont difficiles à envisager du fait du manque d'exemples. Enfin trois solutions apparaissent plus évidentes pour la STEP de Marrakech. Il s'agit de la mise en décharge, de l'épandage agricole et de l'incinération en cimenterie. C'est trois techniques ne nécessitent en effet que très peu d'investissements puisque la boue n'est pas transformée ou bien seulement séchée (cela est déjà plus ou moins le cas à l'heure actuelle sur le terrain jouxtant la décharge). Ces trois possibilités demandent principalement de l'organisation pour gérer l'évacuation des boues et leur livraison en cimenterie, sur des parcelles agricoles ou à la décharge publique. Pour chaque cas, Il faudrait ainsi négocier les modalités de transport qui

pourraient tout à fait être prises en charge par les clients ce qui faciliterait encore la mise en place de ces filières.

Si on doit ensuite préciser laquelle de ces possibilités est la plus appropriée à la STEP de Marrakech, il faut avouer qu'il est difficile de se prononcer de manière certaine. La meilleure solution pourrait d'ailleurs être une combinaison de deux ou trois filières. En effet, il est plus facile de s'organiser avec moins de boue, et cela permet de prévenir une défaillance de filière (par exemple, interdiction d'épandre ou de mettre en décharge).

La mise en décharge serait la solution la plus pratique du fait de la proximité de la décharge, et donc du peu de transport. Cependant, elle est actuellement interdite, il faudrait pouvoir négocier la mise en décharge de boue sèche.

L'épandage et l'incinération ne sont quant à eux pas interdits mais ils nécessiteraient obligatoirement beaucoup plus de transport et donc une organisation plus complexe, à moins que le transport soit géré par les clients. L'épandage demanderait également la mise en place d'un plan d'épandage et donc un travail préalable.

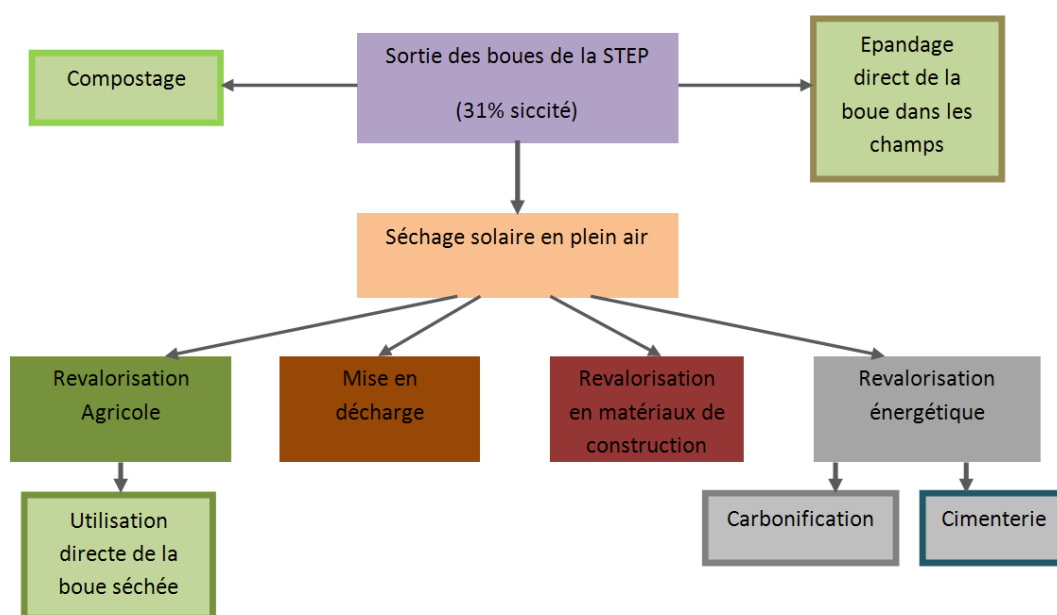


Figure 18 : Schéma récapitulatif des possibilités de la filière boue de la STEP de Marrakech

Conclusion

Durant ces douze semaines de stage, j'ai pu observer et comprendre beaucoup sur l'épuration de l'eau et plus précisément sur les boues résultant du traitement des eaux usées. Le but de mon stage était de faire un bilan de l'état actuel des choses au Maroc et à la STEP de Marrakech, ainsi que d'analyser et de commenter les possibilités qui s'offraient à la station en matière de « filière boue ». J'ai ainsi pu voir que cette station était la seule du pays, actuellement dans son cas, mais également que cela allait beaucoup changer dans les années avenir du fait des nombreux projets d'épuration de grandes villes marocaines. En attendant ces nouvelles STEP, Marrakech est seule pour faire face à ce problème de taille : trouver une destination à 71 tonnes de boue brute par jour.

Les qualités physiques, chimiques et biologique de cette boue permettent à la STEP d'envisager de nombreuses solutions de revalorisation ou d'élimination très différentes les unes des autres. Pour autant, ces possibilités ne répondent pas toutes aux critères de coût et d'organisation imaginés par la STEP. Cette filière boue doit en effet pouvoir être très rapidement mise en place du fait de l'urgence de la situation (saturation du terrain de stockage) et ne pas être trop coûteuse à mettre en place puisque la RADEEMA n'a pas manifestée de volonté d'investir d'argent dans la filière boue de la STEP.

Trois solutions s'offrent alors à la station de Marrakech. Il s'agit de la mise en décharge de boue sèche, de l'incinération en cimenterie et de l'épandage agricole des boues (sèches ou non). Elles sont à mon sens toutes appropriées et intéressantes pour la STEP. La mise en place d'une ou plusieurs de ces solutions, nécessiterait de nombreuses réunions, discussions et des accords avec les organismes concernés. Cela demandera certes du temps à tous les acteurs de ce projet de revalorisation, mais il permettra certainement à la société Degremont d'exploiter plus sereinement cette station en réglant définitivement le problème d'évacuation des boues. La STEP de Marrakech servira probablement d'exemple aux futures stations du pays en mettant en place une filière appropriée pour ses boues qui s'inscrit en plus dans la politique actuelle du gouvernement en termes de durabilité et d'environnement.

Conclusion sur l'expérience personnelle

J'ai eu la chance de faire mon stage de deuxième année d'école d'ingénieur à la STEP de Marrakech exploitée par la société Degremont. Cette expérience a constitué une triple opportunité. En effet, j'ai été accueillie au sein d'un grand groupe, j'ai travaillé dans un domaine qui m'intéressait et dans lequel je me spécialise cette année en suivant les cours de « Génie de l'environnement », et pour finir, tout cela s'est déroulé dans le cadre magnifique de la ville de Marrakech.

Ce stage fut très intéressant à plusieurs titres. Je citerais d'abord l'équipe accueillante et compétente qui m'a encadrée, m'a appris à connaître l'entreprise, son fonctionnement et ses problèmes. De plus, le sujet de mon stage, « la revalorisation des boues », répondait à une réelle problématique de la STEP de Marrakech. Ce thème m'a d'ailleurs permis de travailler dans le domaine technique (fonctionnement de la STEP), chimique (analyses), juridique (étude de la législation) et j'ai pu réaliser des expériences. J'ai rencontré et collaboré avec les différents services de la station, mais j'ai également été en contact avec de nombreux autres organismes par téléphone et par mail (régies autonomes, ONEP, STEP au Mexique...). J'ai aussi pu visiter la station d'épuration d'Agadir et la pépinière de Marrakech et rencontrer des représentants des « Ciments du Maroc » ainsi que de « TeraNova énergie ».

J'ai travaillé de manière assez autonome sur mon sujet de stage, même si toute l'équipe s'est montrée très disponible. Je pense même si le temps m'a parfois un peu fait défaut avoir apporté une contribution positive et avoir fait avancer le projet d'étude qui m'avait été confié, ce qui est très enrichissant.



Figure 19 : Une partie de l'équipe et moi-même, le dernier jour de mon stage

Bibliographie

- (1) Société Degremont, <http://www.degremont.com/en/about-us/profile/story/water-treatment/> (30/09/10)
- (2) 2006, Soutien à la DG Environnement pour la mise au point de l'Initiative de Dépollution de la Méditerranée «Horizon 2020», Page 154
- (3) Wikipédia, http://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_de_villes_du_Maroc (30/09/10)
- (4) Régie autonome d'Agadir, www.ramsa.ma/ (30/09/10)
- (5) Frédéric GORSE, Département de la Recherche Division Évaluation et capitalisation Agence Française de Développement, 2008, La filière assainissement n°8 mars 2008, p 7-11
- (6) Secrétariat d'état auprès du ministère de l'énergie, des mines de l'eau et de l'environnement, chargé de l'eau et de l'environnement, <http://www.minenv.gov.ma/index.asp> (30/09/10)
- (7) Portail de l'union européenne, http://europa.eu/documentation/legislation/index_fr.htm (30/09/10)
- (8) Bureau d'étude phenixa, 2010, Etude pour l'Elaboration de la Stratégie Nationale de Gestion des Boues des Stations d'Epuración des Eaux au Maroc, Rapport Phase 1, pages 142, 54, 66
- (9) Degremont Technologies, 2008, Innodry 2^E
- (10) La lyonnaise des eaux, le Gite, fiche technique sur la revalorisation agricole des boues
- (11) Communauté des communes du pays fouesnantais (exemple de compostage), http://www.cc-paysfouesnantais.fr/environnement/assainissement/une_station_de_compostage_de_boues_de_station_d_puration (30/09/10)
- (12) Ministère de l'agriculture, plaquette d'information : Région Marrakech Tensift el Haouz, 2008
- (13) Terranova (carbonification), www.terranova-energy.com (30/09/10)
- (14) Vbc 3000 (transformation des boues en matériaux de construction), <http://www.vbc3000.fr/> (30/09/10)

Annexe 1

	Siccité	MV (%)	Boue évacuée (m3)	Boue évacuée (t)	Nombre de bennes levées
24-avr-09	33,2				5
25-avr-09					0
26-avr-09					6
27-avr-09	33,1				5
28-avr-09	32,2				5
29-avr-09	32,8		57,1	60	5
30-avr-09	32,8		42,9	45	3
01-mai-09			57,1	60	4
02-mai-09			0,0		0
03-mai-09			42,9	45	3
04-mai-09			85,7	90	6
05-mai-09	34,6				6
06-mai-09	34,1				5
07-mai-09	31,4				3
08-mai-09	31,0				4
09-mai-09					0
10-mai-09					5
11-mai-09	52,2				6
12-mai-09	31,0				4
13-mai-09	35,0				2
14-mai-09					4
15-mai-09	33,6				5
16-mai-09					3
17-mai-09					3
18-mai-09					5
19-mai-09	31,8				5
20-mai-09	32,5				5
21-mai-09	32,5				5
22-mai-09	33,5		57,1	60	4
23-mai-09			0,0		0
24-mai-09			71,4	75	5
25-mai-09	34,0		57,1	60	4
26-mai-09	32,1		42,9	45	3
27-mai-09			71,4	75	5
28-mai-09	32,0		57,1	60	4
29-mai-09	32,2		57,1	60	4
30-mai-09			71,4	75	5
01-juin-09	31,4		57,1	60	4
02-juin-09	30,9		57,1	60	4
03-juin-09	33,1		71,4	75	5
04-juin-09	30,7		42,9	45	3
05-juin-09	30,5		85,7	90	6
06-juin-09			85,7	90	6
07-juin-09			71,4	75	5
08-juin-09	31,3		85,7	90	6
09-juin-09	31,0		71,4	75	5

10-juin-09	33,0		85,7	90	6
11-juin-09	31,9		57,1	60	4
12-juin-09	34,0		71,4	75	5
13-juin-09			71,4	75	5
14-juin-09			57,1	60	4
15-juin-09	32,2		71,4	75	5
16-juin-09	32,8		71,4	75	5
17-juin-09	31,8		71,4	75	5
18-juin-09	33,0		71,4	75	5
19-juin-09	32,8		85,7	90	6
20-juin-09	31,9		85,7	90	6
21-juin-09			85,7	90	6
22-juin-09	31,9		85,7	90	6
23-juin-09	32,9		85,7	90	6
24-juin-09	32,9		85,7	90	6
25-juin-09			85,7	90	6
26-juin-09			71,4	75	5
27-juin-09			57,1	60	4
28-juin-09			57,1	60	4
29-juin-09	32,7		28,6	30	2
30-juin-09			100,0	105	7
01-juil-09	31,2		71,4	75	5
02-juil-09	31,1		85,7	90	6
03-juil-09	31,1		85,7	90	6
04-juil-09			85,7	90	6
05-juil-09			71,4	75	5
06-juil-09	29,2		100,0	105	7
07-juil-09	32,0		85,7	90	6
08-juil-09	30,3		71,4	75	5
09-juil-09	30,2		100,0	105	7
10-juil-09	31,9		85,7	90	6
11-juil-09			114,3	120	8
12-juil-09			42,9	45	3
13-juil-09	31,2		71,4	75	5
14-juil-09	29,9		85,7	90	6
15-juil-09	30,5		114,3	120	8
16-juil-09	31,6		85,7	90	6
17-juil-09	31,2		100,0	105	7
18-juil-09			0,0		0
19-juil-09			14,3	15	1
20-juil-09			57,1	60	4
21-juil-09	32,2		114,3	120	8
22-juil-09	30,9		57,1	60	4
23-juil-09	31,3		114,3	120	8
24-juil-09	28,7		85,7	90	6
25-juil-09			85,7	90	6
26-juil-09			0,0		0
27-juil-09			85,7	90	6
28-juil-09	32,7		71,4	75	5
29-juil-09	32,0		100,0	105	7
30-juil-09			57,1	60	4
31-juil-09	29,2		85,7	90	6
01-août-09			1,0	1	1

02-août-09			1,0	1	1
03-août-09			28,6	30	2
04-août-09	33,9		85,7	90	6
05-août-09			85,7	90	6
06-août-09	34,8		100,0	105	7
07-août-09	36,0		100,0	105	7
08-août-09			57,1	60	4
09-août-09			100,0	105	7
10-août-09	31,8		71,4	75	5
11-août-09	30,3		85,7	90	6
12-août-09	29,9		85,7	90	6
13-août-09	33,6		114,3	120	8
14-août-09			100,0	105	7
15-août-09			100,0	105	7
16-août-09			71,4	75	5
17-août-09	31,5		100,0	105	7
18-août-09	34,3		100,0	105	7
19-août-09			42,9	45	3
20-août-09			85,7	90	6
21-août-09			85,7	90	6
22-août-09			80,0	84	6
23-août-09			53,3	56	4
24-août-09	31,9		40,0	42	3
25-août-09	31,4		40,0	42	3
26-août-09	37,0		53,3	56	4
27-août-09	33,9				5
28-août-09	32,9				6
29-août-09					7
30-août-09					4
31-août-09	32,2		80,0	84	6
01-sept-09	30,6		80,0	84	6
02-sept-09	32,0		80,0	84	6
03-sept-09	31,6		66,7	70	5
04-sept-09	33,7		80,0	84	6
05-sept-09					4
06-sept-09					4
07-sept-09	29,2				7
08-sept-09	32,5				5
09-sept-09	29,1				6
10-sept-09	30,1				6
11-sept-09	34,3				6
12-sept-09					4
13-sept-09					0
14-sept-09					0
15-sept-09	31,2				1
16-sept-09					2
17-sept-09	26,3		53,3	56	4
18-sept-09	30,2				6
19-sept-09					5
20-sept-09					6
21-sept-09					4
22-sept-09	30,1				4
23-sept-09	32,8				6

24-sept-09	31,5				5
25-sept-09	30,6				5
26-sept-09					6
27-sept-09					4
28-sept-09	30,6				6
29-sept-09	30,7				8
30-sept-09	30,2		148,6	156	9
01-oct-09	32,0		106,7	112	8
02-oct-09	30,5		80,0	84	6
03-oct-09			106,7	112	8
04-oct-09			40,0	42	3
05-oct-09	30,6		93,3	98	7
06-oct-09	30,6		66,7	70	5
07-oct-09	31,1		66,7	70	5
08-oct-09	30,1		53,3	56	4
09-oct-09	31,5		93,3	98	7
10-oct-09			80,0	84	6
11-oct-09			53,3	56	4
12-oct-09	29,6		66,7	70	5
13-oct-09	29,4		0,0		5
14-oct-09	28,6		66,7	70	5
15-oct-09	31,4		66,7	70	5
16-oct-09	30,2		80,0	84	6
17-oct-09			66,7	70	5
18-oct-09			40,0	42	3
19-oct-09	30,3		53,3	56	4
20-oct-09	30,8		66,7	70	5
21-oct-09	31,4		80,0	84	6
22-oct-09	32,0		93,3	98	7
23-oct-09	31,8		93,3	98	7
24-oct-09			80,0	84	6
25-oct-09			66,7	70	5
26-oct-09	32,2		0,0		7
27-oct-09	32,7		0,0		6
28-oct-09	32,0		0,0		6
29-oct-09	30,0		0,0		7
30-oct-09	30,7		0,0		6
31-oct-09			0,0		5
01-nov-09			50,0	52,5	5
02-nov-09	31,0		70,0	73,5	7
03-nov-09			60,0	63	6
04-nov-09	30,5		60,0	63	6
05-nov-09	31,5		50,0	52,5	5
06-nov-09			60,0	63	6
07-nov-09			20,0	21	2
08-nov-09			30,0	31,5	3
09-nov-09	29,0		50,0	52,5	5
10-nov-09	30,4		60,0	63	6
11-nov-09	27,7		50,0	52,5	5
12-nov-09	30,3		60,0	63	6
13-nov-09	30,8		70,0	73,5	7
14-nov-09			60,0	63	6
15-nov-09			40,0	42	4

16-nov-09	26,9		70,0	73,5	7
17-nov-09	29,9		50,0	52,5	5
18-nov-09			50,0	52,5	5
19-nov-09			60,0	63	6
20-nov-09	30,4		50,0	52,5	5
21-nov-09			50,0	52,5	5
22-nov-09			30,0	31,5	3
23-nov-09	30,9		30,0	31,5	3
24-nov-09	30,4				4
25-nov-09	30,5				5
26-nov-09	30,6				6
27-nov-09	29,2				0
30-nov-09			80,0	84	7
01-déc-09	30,9		102,9	108	9
02-déc-09	28,6	59,2	68,6	72	6
03-déc-09	30,3		80,0	84	7
04-déc-09	29,6	60,9	57,1	60	5
05-déc-09			57,1	60	5
06-déc-09			80,0	84	7
07-déc-09	29,9	59,1	68,6	72	6
08-déc-09	29,4	59,3	80,0	84	7
09-déc-09	27,4		80,0	84	7
10-déc-09	30,0	59,7	120,0	126	9
11-déc-09	29,6		106,7	112	8
12-déc-09			93,3	98	7
13-déc-09			106,7	112	8
14-déc-09	30,3	57,0	106,7	112	8
15-déc-09	32,4		106,7	112	8
16-déc-09	33,5	50,0	93,3	98	7
17-déc-09	30,2		80,0	84	6
18-déc-09			66,7	70	5
19-déc-09			80,0	84	6
20-déc-09			93,3	98	7
21-déc-09	33,4		53,3	56	4
22-déc-09	30,2	55,4	66,7	70	5
23-déc-09	31,5	64,0	66,7	70	5
24-déc-09	30,7	59,3	53,3	56	4
25-déc-09	30,0	42,6	80,0	84	6
26-déc-09			53,3	56	4
27-déc-09			80,0	84	6
28-déc-09	29,2	49,9	66,7		5
29-déc-09	31,4		40,0		3
30-déc-09			13,3		1
03-janv-10			22,9	24	2
04-janv-10	30,5	58,8	80,0	84	7
05-janv-10	28,8	57,2	57,1	60	5
06-janv-10	28,6		57,1	60	5
07-janv-10	28,3	55,6	68,6	72	6
08-janv-10	28,5		68,6	72	6
09-janv-10			80,0	84	7
10-janv-10			80,0	84	7
11-janv-10	29,0		34,3		3
12-janv-10	28,1		68,6		6

13-janv-10	28,6	54,7	45,7		4
14-janv-10			34,3		3
15-janv-10			57,1		5
16-janv-10			57,1		5
17-janv-10	30,9		57,1		5
18-janv-10	30,3	54,4	57,1		5
19-janv-10	30,4		45,7		4
20-janv-10	29,9	53,8	45,7		4
21-janv-10	30,6	53,3	68,6		6
22-janv-10			57,1		5
23-janv-10			57,1		5
24-janv-10	30,9		57,1		5
25-janv-10	30,6		34,3		3
26-janv-10	30,6	51,1	68,6		6
27-janv-10	28,7		68,6		6
28-janv-10	29,2	55,9	57,1		5
29-janv-10	28,9		57,1		5
30-janv-10			34,3		3
31-janv-10	31,1				5
01-févr-10	30,3	54,3	57	60	5
02-févr-10	30,9		57	60	5
03-févr-10	30,7	54,6	57	60	5
04-févr-10	30,5		57	60	3
05-févr-10	31,2	53,5	34	36	5
06-févr-10	30,7		57	60	5
07-févr-10	30,3		57	60	3
08-févr-10	30,8	53,7	34	36	5
09-févr-10	31,2		57	60	5
10-févr-10	29,4	53,6	57	60	4
11-févr-10	30,4		46	48	2
12-févr-10	30,5	54,4	23	24	3
13-févr-10	30,0		34	36	5
14-févr-10	31,0		57	60	5
15-févr-10	29,3	54,4	57	60	5
16-févr-10	29,8		57	60	5
17-févr-10	30,0	48,8	57	60	3
18-févr-10	28,0		34	36	2
19-févr-10	29,0	56,6	23	24	1
20-févr-10	29,1		11	12	4
21-févr-10	29,9		46	48	4
22-févr-10	30,6		46	48	3
23-févr-10	29,8	52,8	34	36	3
24-févr-10	31,4		34	36	4
25-févr-10	31,6	51,3	46	48	3
26-févr-10	32,1		34	36	4
27-févr-10	31,3		46	48	2
28-févr-10	31,4		23	24	4
01-mars-10	31,7	50,4	57	60	5
02-mars-10	32,3		57	60	4
03-mars-10	31,6	51,9	57	60	5
04-mars-10	31,7		57	60	5
05-mars-10	30,1		57	60	4
06-mars-10	29,5		57	60	3

07-mars-10	28,9		34	36	5
08-mars-10	29,9		57	60	7
09-mars-10	33,7	52,9	80	84	3
10-mars-10			34	36	0
11-mars-10	30,9		0	0	0
12-mars-10	30,5		0	0	6
13-mars-10	30,5		74	78	5
14-mars-10	30,2		62	65	2
15-mars-10	31,0		37	39	5
16-mars-10			62	65	0
17-mars-10			0	0	0
18-mars-10	30,8		0	0	3
19-mars-10	30,1		37	39	6
20-mars-10	31,2		74	78	6
21-mars-10	30,3		74	78	3
22-mars-10	30,0		37	39	3
23-mars-10			37	39	
24-mars-10	30,5		0	0	
25-mars-10	30,5	53,4	25	26	
26-mars-10			62	65	
27-mars-10			62	65	
28-mars-10	30,2		0	0	
29-mars-10	30,6	52,7	50	52	
30-mars-10	30,2		74	78	
31-mars-10	30,0		91	91	7
01-avr-10	30,4	54,7	87	91	7
02-avr-10			74	78	6
03-avr-10			74	78	6
04-avr-10	30,0		50	52	4
05-avr-10	30,5		87	91	7
06-avr-10	31,4	56,9	87	91	7
07-avr-10	31,9		50	52	4
08-avr-10	31,4	55,2	62	65	5
09-avr-10			50	52	4
10-avr-10			62	65	5
11-avr-10	30,3		62	65	5
12-avr-10	30,9		87	91	7
13-avr-10	30,2		74	78	6
14-avr-10	30,0		99	104	8
15-avr-10	30,7		87	91	7
16-avr-10			74	78	6
17-avr-10			74	78	6
18-avr-10	30,5		62	65	5
19-avr-10	30,0		62	65	5
20-avr-10	30,0		87	91	7
21-avr-10	31,3		87	91	7
22-avr-10	30,5		87	91	7
23-avr-10			62	65	5
24-avr-10			62	65	5
25-avr-10	31,0	59,6	50	52	4
26-avr-10	31,2		87	91	7
27-avr-10	30,6		74	78	6
28-avr-10	30,7		74	78	6

29-avr-10	31,2		87	91	7
30-avr-10			74	78	6
01-mai-10			50	52	4
02-mai-10	31,3		62	65	5
03-mai-10	30,1		99	104	8
04-mai-10	30,7	58,4	111	117	9
05-mai-10	30,5		87	91	7
06-mai-10	31,0	58,5	124	130	10
07-mai-10			99	104	8
08-mai-10			62	65	5
09-mai-10	30,5		62	65	5
10-mai-10	30,7	58,5	99	104	8
11-mai-10	30,2		62	65	5
12-mai-10	30,8	59,4	74	78	6
13-mai-10	30,2		62	65	5
14-mai-10			74	78	6
15-mai-10			37	39	3
16-mai-10	31,7		62	65	5
17-mai-10	30,2		25	26	2
18-mai-10	30,0		74	78	6
19-mai-10	30,5		62	65	5
20-mai-10	31,5	58,2	62	65	5
21-mai-10			50	52	4
22-mai-10			87	91	7
23-mai-10	31,1		62	65	5
24-mai-10	31,1	58,2	62	65	5
25-mai-10	30,1		87	91	7
26-mai-10	30,0		99	104	8
27-mai-10	30,0		87	91	7
28-mai-10			87	91	7
29-mai-10	30,0	61,9	62	65	5
30-mai-10	30,7		74	78	6
31-mai-10	30,3		87	91	7
01-juin-10	30,0		87	91	7
02-juin-10	30,5		74	78	6
03-juin-10	30,0	58,7	87	91	7
04-juin-10			87	91	7
05-juin-10			74	78	6
06-juin-10	30,7		62	65	5
07-juin-10			74	78	6
08-juin-10	30,1	59,8	74	78	6
09-juin-10	30,5		74	78	6
10-juin-10	29,4	60,1	74	78	6
11-juin-10	31,5	58,7	74	78	6
12-juin-10			50	52	4
13-juin-10	30,0		50	52	4
14-juin-10	30,1		87	91	7
15-juin-10	31,0	56,9	74	78	6
16-juin-10	31,9		74	78	6
17-juin-10	30,3	57,9	37	39	3
18-juin-10			62	65	5
19-juin-10			62	65	5
20-juin-10	30,0		62	65	5

21-juin-10	30,0	60,6	74	78	6
22-juin-10	30,5		87	91	7
23-juin-10	30,4	59,6	74	78	6
24-juin-10	30,0		74	78	6
25-juin-10	30,7	60,3	62	65	5
26-juin-10	30,5		62	65	5
27-juin-10	30,2		62	65	5
28-juin-10	30,0		74	78	6
29-juin-10	30,8	63,7	87	91	7
30-juin-10	30,3		87	91	7
01-juil-10	30,3	63,3	87	91	
02-juil-10	31,8		74	78	
03-juil-10	32,2		62	65	
04-juil-10	31,4		62	65	
05-juil-10	31,9	64,1	87	91	
06-juil-10	33,0		99	104	
07-juil-10	30,3	63,2	99	104	
08-juil-10	30,6		37	39	
09-juil-10	30,2	65,4	111	117	
10-juil-10	30,4		74	78	
11-juil-10	30,0		74	78	
12-juil-10	30,3		62	65	
13-juil-10	31,4	63,6	62	65	
14-juil-10	31,4		111	117	
15-juil-10	33,1		99	104	
16-juil-10	33,9	59,3	99	104	
17-juil-10	30,8		62	65	
18-juil-10	30,2		62	65	
19-juil-10	32,8		87	91	
20-juil-10	32,2	58,4	74	78	
21-juil-10	31,5		99	104	
22-juil-10	32,2	56,6	87	91	
23-juil-10	32,0		74	78	
24-juil-10	31,9		111	117	
25-juil-10	31,8		62	65	
26-juil-10	31,7		74	78	
27-juil-10	31,2	58,2	62	65	
28-juil-10	30,0		50	52	
29-juil-10	32,2	57	37	39	
30-juil-10	31,5		37	39	
31-juil-10	32,09		62	65	
Moyenne	31,0	56,84	65,23	71,43	5,107

Récapitulatif des données quotidiennes sur les boues de la STEP de Marrakech (siccité, MV, volume, masse et nombre de bennes levées) depuis le début de l'exploitation

Annexe 2

	...J/g	...Kcal/kg	...KWh/tonne
J/g =	1	0.24	0.278
Kcal/kg =	4.18	1	1.161
kWh/tonne =	3.6	0.86	1

Tableau de correspondance entre les différentes unités du pouvoir calorifique

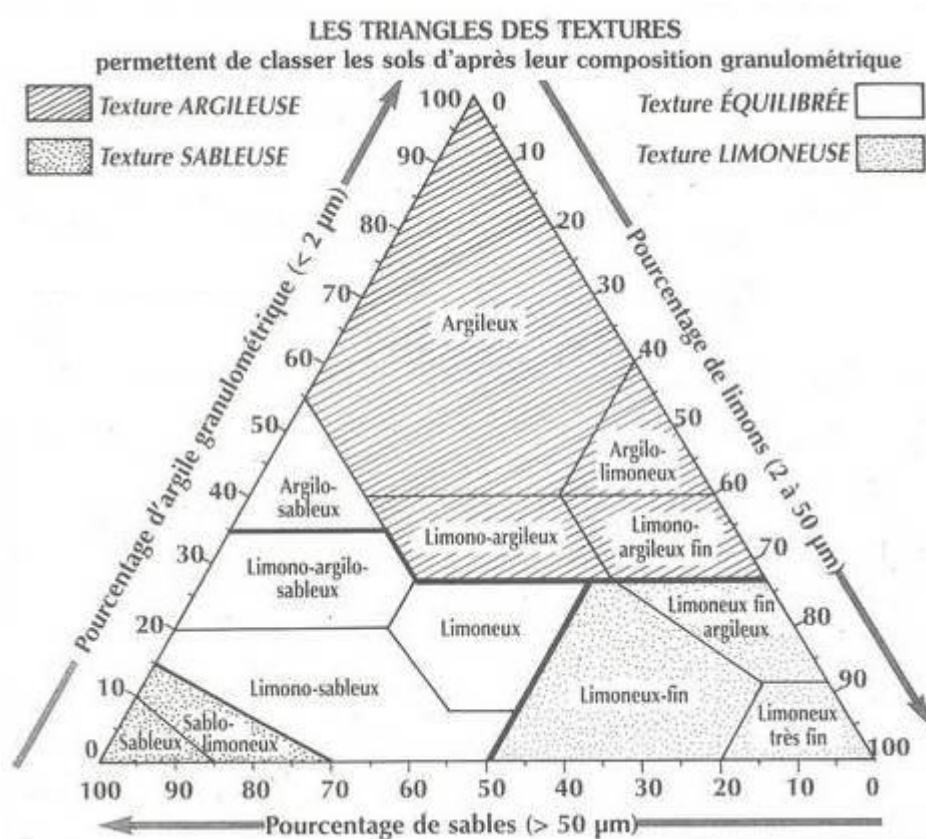
Annexe 3

	Température max (°C)	Température min (°C)	Température moyenne	Lever du soleil	Coucher du soleil	Durée du jour	Humidité relative (%)	Vent (km/h)
05/07/2010	31	19	25,00	5:32	19:41	14:09	46	11
06/07/2010	37	19	28,00	05:33	19:41	14:08	30	5
07/07/2010	38	21	29,50	05:33	19:41	14:08	47	13
08/07/2010	40	23	31,50	05:34	19:41	14:07	26	11
09/07/2010	42	24	33,00	05:34	19:40	14:06	54	11
10/07/2010	43	24	33,50	05:35	19:40	14:05	34	11
11/07/2010	43	25	34,00	05:35	19:40	14:05	27	10
12/07/2010	41	21	31,00	05:36	19:40	14:04	30	13
13/07/2010	38	20	29,00	05:36	19:39	14:03	34	14
14/07/2010	36	18	27,00	05:37	19:39	14:02	30	16
15/07/2010	36	19	27,50	05:38	19:39	14:01	27	16
16/07/2010	37	21	29,00	05:38	19:38	14:00	47	14
17/07/2010	40	23	31,50	05:39	19:38	13:59	34	13
18/07/2010	43	24	33,50	05:39	19:37	13:58	27	14
19/07/2010	45	25	35,00	05:40	19:37	13:57	20	13
20/07/2010	37	18	27,50	05:41	19:36	13:55	30	13
21/07/2010	37	18	27,50	05:41	19:36	13:55	32	13
22/07/2010	37	19	28,00	05:42	19:35	13:53	30	14
23/07/2010	37	22	29,50	05:42	19:35	13:53	27	13
24/07/2010	39	24	31,50	05:43	19:34	13:51	26	13
25/07/2010	41	25	33,00	05:44	19:34	13:50	26	13
26/07/2010	40	23	31,50	05:44	19:33	13:49	30	13
27/07/2010	37	24	30,50	05:45	19:32	13:47	36	11
28/07/2010	37	23	30,00	05:46	19:32	13:46	30	11
29/07/2010	38	23	30,50	05:46	19:31	13:45	33	13
30/07/2010	38	24	31,00	05:47	19:31	13:44	40	13
31/07/2010	39	24	31,50	05:48	19:30	13:42	36	11
01/08/2010	41	23	32,00	05:48	19:29	13:41	38	11
02/08/2010	43	23	33,00	05:49	19:28	13:39	28	13
03/08/2010	43	21	32,00	05:49	19:27	13:38	30	13
04/08/2010	41	19	30,00	05:50	19:26	13:36	33	14
05/08/2010	39	22	30,50	05:51	19:25	13:34	33	14
06/08/2010	37	20	28,50	05:51	19:25	13:34	43	14
07/08/2010	37	25	31,00	05:52	19:24	13:32	38	13
08/08/2010	39	25	32,00	05:52	19:23	13:31	40	11
09/08/2010	40	24	32,00	05:53	19:22	13:29	29	14
10/08/2010	41	25	33,00	05:54	19:21	13:27	30	13
11/08/2010	42	26	34,00	05:54	19:20	13:26	25	16
12/08/2010	42	22	32,00	05:55	19:19	13:24	24	16

13/08/2010	41	23	32,00	05:56	19:18	13:22	26	13
14/08/2010	37	23	30,00	05:57	19:17	13:20	35	11
15/08/2010	37	23	30,00	05:57	19:16	13:19	49	13
16/08/2010	27	18	22,50	05:58	19:15	13:17	75	14
17/08/2010	31	19	25,00	05:58	19:14	13:16	59	16
18/08/2010	32	17	24,50	05:59	19:14	13:15	58	16
19/08/2010	36	19	27,50	06:00	19:11	13:11	47	14
20/08/2010	39	21	30,00	06:00	19:10	13:10	38	14
21/08/2010	41	21	31,00	06:01	19:09	13:08	35	14
22/08/2010	41	23	32,00	06:01	19:08	13:07	31	13
23/08/2010	42	23	32,50	06:02	19:07	13:05	32	13
24/08/2010	41	23	32,00	06:03	19:06	13:03	32	10
25/08/2010	43	24	33,50	06:03	19:05	13:02	21	13
moyenne	38,8	22,0	30,4				35,0	12,9

Données climatiques du 5 juillet 2010 au 25 aout 2010 à Marrakech

Annexe 4



Triangle des textures