



UNIVERSITE CADI AYYAD  
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES  
MARRAKECH



*DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE*

*LST Eau & Environnement*

**Mémoire de fin d'études**

*Optimisation du traitement des boues par  
procédé de la digestion anaérobie au niveau  
de la station d'épuration des eaux usées de la  
ville de Marrakech*

**Réalisé par : DOUMALI Kaoutar & El ADNANI Imane**

**Soutenu : Le 20 Février 2013 devant le jury :**

**Pr. Yamina BOURGEOINI** : Faculté des Sciences et Techniques – Marrakech( Encadrante)

**Pr. Ibrahim IGMOLLAN**: Faculté des Sciences et Techniques – Marrakech(Examinateur)

**Pr. ABDELLATIF. SAIDI** : Faculté des Sciences et Techniques – Marrakech (Examinateur)

*2012-2013*

LST Eau & Environnement.

## *Dédicace*

*Nous dédions ce travail :*

*A nos chers parents*

*Pour leur soutien, leur patience, leur sacrifice et leur amour,  
vous méritez tout éloge,  
vous qui avez fait de nous ce que nous sommes aujourd'hui.*

*Nous espérons être l'image que vous vous êtes fait de nous,  
Que Dieu vous garde et vous bénisse.*

*A nos chers frères et sœurs,*

*pour leur affection et leur encouragement qui ont toujours  
été pour nous des plus précieux.*

*Que ce travail soit pour vous le gage de notre profond amour*

*A tous nos amis*

*A tous ceux qui nous ont aidés.*

*A tous ceux que nous aimons, nous dédions ce travail ...*

## **Remerciements**

*Nous rendons grâce à ALLAH, le tout Puissant, de nous avoir donné la vie et la santé pour la réalisation de cette étude.*

*Nous tenons à exprimer notre gratitude et nos remerciements aux membres de jury. Veuillez accepter dans ce travail notre sincère respect et notre profonde reconnaissance.*

*Nous voudrions remercier du fond du cœur toutes celles et ceux qui ont bien voulu apporter leur contribution à la réalisation de ce travail et particulièrement:*

*Notre encadrante **Yamina Bourgoini** pour sa réactivité, sa grande disponibilité, ses conseils concernant les orientations de notre mémoire et aussi son soutien tout au long de notre projet.*

*Nos professeurs du département des Sciences de la terre de la Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech, qui nous ont apportés du soutien durant nos études et envers tous nos amis qui ont été toujours près de nous avec leurs encouragements, critiques et conseils, ainsi tous ceux qui ont, d'une manière ou d'une autre, contribué à la réalisation de ce travail*

*Nous remercions l'équipe de la station d'épuration des eaux usées de la ville de Marrakech, en particulier **Mr Yassine Bissi** : Chef de la station d'épuration des eaux usées de Marrakech, pour son encadrement, sa présence, ses remarques constructives et ses encouragements et **Mr. TARIK**, ingénieur a la station d'épuration des eaux usées de Marrakech, pour nous avoir permis d'intégrer la station et de découvrir le fonctionnement des étapes de traitements. Nous remercions chaleureusement nos parents et nos proches pour leur aide, leur patience et leur dévouement, et qui nous a aidée tout au long de notre stage et de la réalisation de notre mémoire.*

## *Sommaire*

<b>Nomenclature</b> .....	6
<b>Résumé</b> .....	7
<b>Introduction</b> .....	10
<b><i>Chapitre I : Généralités</i></b>	
Présentation de la zone d'étude.....	12
Le réseau assainissement à Marrakech.....	12
Les ressources et qualité d'eau de surface.....	16
Les ressources et qualité d'eau souterraines.....	17
<b><i>Chapitre II : STEP de Marrakech Traitement des eaux usées et étude des boues</i></b>	
I-Présentation de la station d'épuration de Marrakech (STEP).....	20
1-La situation géographique .....	20
2-Objectifs de la mise en place de la station.....	21
3-Objectifs de la station d'épuration des eaux usées (la STEP).....	21
4- Description du fonctionnement de la STEP de Marrakech.....	21
a- Fil eau.....	22
b- Fil boue.....	24
c- Fil gaz.....	26
5- L'impact de la station sur l'environnement .....	28
6- Généralités sur les boues.....	29
II- La digestion anaérobie.....	34
1-Historique sur la digestion anaérobie.....	34
2- Intérêts et limites de la digestion anaérobie.....	34
3- Mécanisme de la digestion anaérobie.....	35
4- Paramètres de la digestion anaérobie.....	37
<b><i>Chapitre III : Analyses, données et interprétations</i></b>	
I-Analyses et interprétations du mois d'Avril.....	40
II-Discussion des résultats.....	50
III-Analyses et interprétations des moyennes des mois.....	52
<b><i>Chapitre IV : Discussion des résultats et solutions proposées</i></b>	
I-Problèmes rencontrés.....	60
1-Impact sur l'environnement.....	64
2- Impact de la boue sur la production du biogaz.....	66
II-Les solutions adoptées.....	66

III- Les solutions proposées.....	70
<b>Conclusion générale</b> .....	77
<b>Bibliographie</b> .....	78
<b>Liste des figures</b> .....	80
<b>Liste des tableaux</b> .....	81
<b>Liste des photos</b> .....	81
<b>Annexes</b>	

## *Nomenclatures*

**RADEEMA** : Régie Autonome de Distribution de l'Eau et de l'Electricité de Marrakech

**STEP** : Station d'épuration des eaux usées

**DBO5** : Demande Biochimique en Oxygène pendant 5 jours

**DCO** : Demande Chimique en Oxygène

**MES** : Matière En Suspension

**FAB** : Filtre à Bande

**MS** : Matière sèche

**MSV** : Matière sèche volatile

**AGV** : Acide gras volatile

**TAC** : Titre d'alcalinité

**MO** : Matière organique

**CH<sub>3</sub>** : Méthane

**BP** : Boue primaire

**BS** : Boue secondaire

**D1** : Digesteur 1

## *Résumé*

Dans le cadre de notre étude, nous nous intéresserons à un procédé du traitement de la boue qui s'agit de la digestion anaérobie. Une synthèse bibliographique ainsi que la réalisation des analyses nous a permis de montrer son fonctionnement, son dimensionnement, ses performances et ses paramètres à contrôler.

La digestion anaérobie est un procédé nécessaire pour le traitement de la boue, l'utilisation de ce procédé comme outil de dépollution présente de nombreux intérêts. La méconnaissance du processus a conduit à des incidents de fonctionnement qui ont induit une méfiance vis-à-vis du processus et par conséquent une influence sur la production du biogaz et un impact sur la stabilité et la qualité de la boue digérée ainsi que celle rejetée dans le milieu naturel.

Les connaissances acquises sur la digestion anaérobie ont permis de définir la nature des paramètres à contrôler et leurs plages de valeurs à respecter pour que le processus fonctionne bien.

Les paramètres sont de deux types : ceux qui vérifient que les conditions de fonctionnement imposées soient bien réalisées (comme la température, la concentration en DCO, l'homogénéité de la boue...) et ceux qui permettent de contrôler l'état de la boue au sein du digesteur (le pH, les concentrations en AGV, l'alcalinité...).

Les variations de certains de ces paramètres sont directement couplées à un dysfonctionnement du digesteur et par conséquent à une déstabilisation de la boue traitée.

Lorsque les paramètres de contrôle atteignent des valeurs critiques, il est nécessaire d'engager des actions pour ramener le système anaérobie vers un fonctionnement normal. Celles-ci sont principalement, la diminution ou l'arrêt du débit d'alimentation, contrôle du pH (par addition d'une base par exemple), homogénéisation de la boue par brassage (nous avons proposé comme solution la mise en place d'une fosse de mixage), régulation de la température (par chauffage de la boue par injection du biogaz ou par une chaudière).

## *Description de la RADEEMA*

*Le premier janvier 1998, la RADEEMA a pris en charge la gestion du service de l'assainissement liquide suite aux délibérations de la communauté urbaine de Marrakech.*

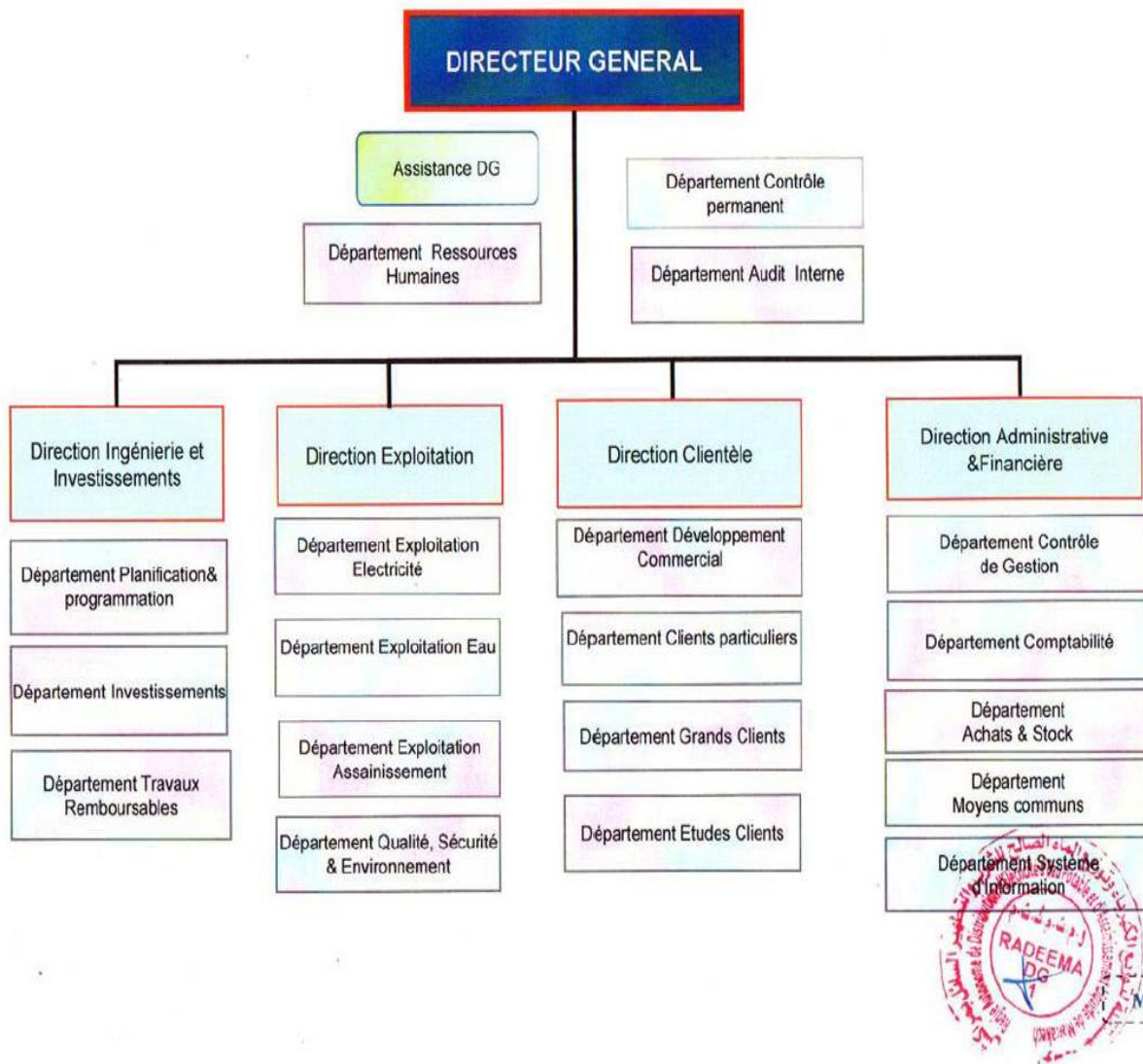
*Activités et mission de la RADEEMA : La RADEEMA assure la distribution d'eau et d'électricité et la gestion du service d'assainissement liquide au sein de la ville de Marrakech.*

*La mission de la RADEEMA et sa préoccupation majeure est d'accompagner le développement important que connait la ville de Marrakech*

*C'est ainsi que la RADEEMA a focalisé ses efforts dès la prise en charge du secteur d'assainissement liquide en 1998, sur la mise à niveau et la rentabilisation de ce secteur par le déploiement d'efforts considérables ciblant principalement les trois axes prioritaires à savoir :*

- Restructuration du réseau d'assainissement liquide de Marrakech.*
- Suppression des points de rejets des eaux usées brutes dans la nature.*
- Traitement des eaux usées avant leur rejet.*





**Fig.1 : Organigramme de la RADEEMA**

## *Introduction*

Le traitement des boues représente actuellement un enjeu majeur dans les stratégies à mettre en place pour la sauvegarde de l'environnement.

Les boues représentent la majorité des rejets de la station d'épuration, il est donc primordial de les retraiter avant qu'elles ne se dispersent dans la nature.

Nous avons choisi comme phase essentielle de traitement : **la méthanisation ou la digestion anaérobie** : C'est un procédé naturel de transformation de la matière organique en énergie par des bactéries méthanogènes en l'absence d'oxygène.

La boue est conduite dans des enceintes confinées appelées 'digesteurs', à l'intérieur desquelles les réactions de fermentation sont optimisées et contrôlées. Ces digesteurs produisent du biogaz, composé majoritairement de méthane ( $\text{CH}_4$ ), tout en réduisant de moitié le taux de matières organiques représentées par de nombreux déchets ou sous-produits biodégradables. Le résidu d'une meilleure digestion (ou digestat) obtenu est stable, désodorisé, débarrassé en majeure partie des germes pathogènes.

Plusieurs paramètres régissent le bon déroulement d'une digestion anaérobie, tels que le pH, la température, les concentrations et la qualité de la boue entrante aux digesteurs, les AGV ainsi que l'alcalinité.

Les variations de l'un de ces paramètres impliquent inévitablement une inhibition significative des phases de méthanisation. Cette dernière comporte généralement quatre phases successives: l'hydrolyse et l'acidogénèse qui se traduisent par la formation des acides gras volatils, l'acétogénèse responsable de la formation d'acide acétique, d'hydrogène et de gaz carbonique et enfin la méthanogène qui exige des conditions bien précises pour son déclenchement.

Dans ce travail, nous avons proposé quelques solutions pour assurer le bon fonctionnement des digesteurs, le traitement complet d'une boue stable, ainsi la production optimale du biogaz.

*Chapitre I*

*Généralités*

## **I- Présentation de la zone d'étude:**

### **1-Le réseau assainissement à Marrakech :**

Le réseau d'assainissement est, dans la majorité des cas, de type unitaire collectant les eaux pluviales, les eaux usées et les rejets industriels et hospitaliers évacués, sans traitement vers un champ d'épandage situé sur la route de Safi, qui constitue aujourd'hui une limite importante de l'urbanisation.

Le réseau n'est pas généralisé. Les zones de M'hamid, de l'aéroport et de Sidi Ghanem sont équipées en réseau séparatif.

Une proportion de ménages estimée à 15% n'est pas raccordée au réseau et a recours à des fosses septiques dont l'usage est également fréquent, notamment à l'Est de l'oued Issil dans le territoire de la commune Annakhil, où des khattaras abandonnées sont utilisées pour l'évacuation des eaux usées.

20% de la population de la commune de Ménara-Guéliz n'est pas reliée au réseau dont 60 douars périphériques qui utilisent des puits perdus et des fosses.

Le réseau présente par ailleurs un état vétuste, qui se traduit par des pertes d'eaux usées estimées à 6%. La dégradation des regards, les difficultés d'entretien provoquent des saturations du réseau qui sont à l'origine d'inondations ou d'écroulements des constructions.

De nombreuses études ont été menées dont le Schéma Directeur d'Assainissement liquide (SDAL) qui a arrêté les principales orientations portant sur la réhabilitation du réseau et son extension, la protection de la ville des inondations, la réalisation de grands collecteurs à l'aval, le traitement des eaux usées.

La régie est engagée dans la mise en œuvre de ce programme dont le financement est assuré, mais la question du traitement constitue l'enjeu essentiel de l'assainissement liquide de la ville.

- Contexte géographique :



Fig.2 : Carte géographique du Maroc localisant Marrakech-Tensift-Al Haouz (Source: Encarta)

La Région Marrakech Tensift Al Haouz se situe au centre Ouest du Royaume s'étendant sur une superficie globale de 31 160 km<sup>2</sup> soit 4.4% de la superficie du Maroc. Elle englobe une population totale de 3.102 millions d'habitants soit 10% de la population nationale. Cette population représente une densité moyenne de 99.57 habitants/km<sup>2</sup> (42.05 au niveau national).

Ce domaine continental est situé entre la latitude 32° 10' et 30° 50' Nord et la longitude 9° 25' et 7° 12' Ouest. Il est limité au Sud par la ligne de crête de la chaîne du Haut Atlas, au Nord par le massif de petites montagne nommé « Jbilet » avec des altitudes < 1000 mètres, à l'Est par la ligne de partage des eaux séparant le bassin du Tensift de celui de Tessaout, affluent d'Oum Er R'bia et à l'ouest par l'océan Atlantique ou se situe son exutoire.

- **Contexte climatologique :**

Le climat à l'intérieure de la région est continental ; la ville bénéficie d'un ensoleillement moyen annuel supérieur à 8 heures par jour et la température moyenne annuelle dépasse les 17°C.

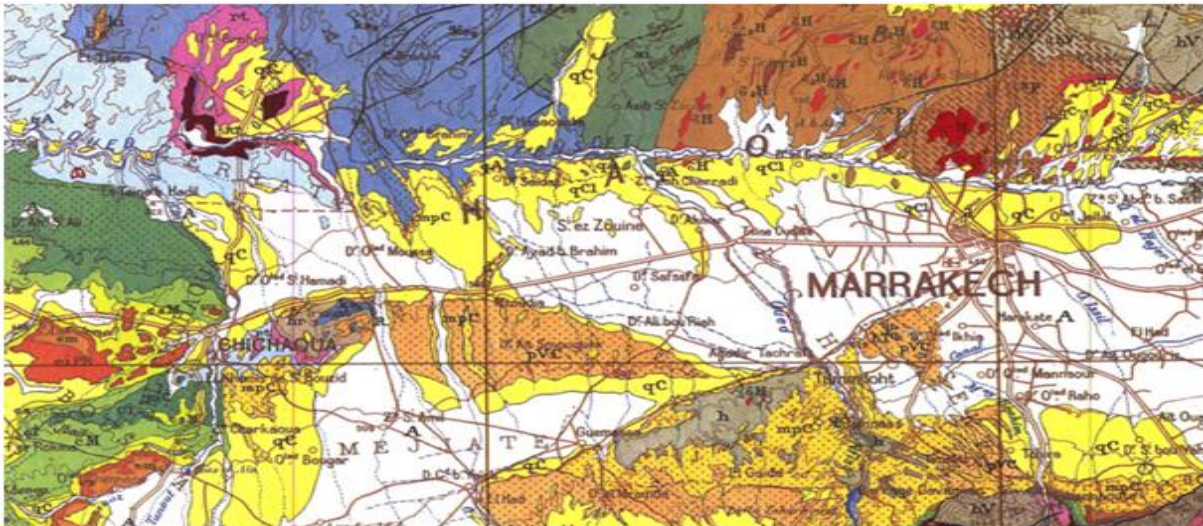
De point de vue pluviométrie généralement faible et irrégulière. Il reste soumis aux influences de l'Océan Atlantique et aux altitudes très élevées du Haut Atlas. La moitié de la superficie régionale présente des précipitations inférieures à 300mm/an en moyenne. Dans la chaîne atlasique les basses températures permettent des précipitations de flocon de neige à partir de 2500m.

Le caractère aride et semi aride domine dans toute la région, le sub humide apparaît seulement dans le Haut Atlas à une altitude comprise entre 1500 et 2000m.

- **Contexte géologique :**

Le cadre géologique du bassin du Tensift s'articule sur l'organisation du socle primaire, affleurant dans le Haut Atlas, les Jbilet et les Rehamna, qui se sont structurés au cours des temps géologiques sous l'effet de l'évolution des champs de contraintes, des phases de surrections et d'effondrements, et des époques d'érosion et de sédimentation.

Le Haouz de Marrakech est considéré comme un bassin de sédimentation modérément subsident, d'origine tectonique, dans le quelle se sont accumulés des dépôts continentaux, d'âge tertiaire et quaternaire, issus principalement des produits de démantèlement de la chaîne atlasique. (*voir carte suivante*)



*Fig.3 : carte géologique de la région de Marrakech échelle 1/500000 (Ministère de l'énergie et des mines, direction de la géologie 1957)*

- **Contexte démographique :**

Marrakech, constitue une grande agglomération à croissance démographique, économique et touristique, elle comporte environ 909000 habitants répartis sur une superficie de 230 km<sup>2</sup>.

- **Contexte hydrologique :**

La région de Marrakech Tensift Al Haouz est caractérisée par le bassin hydraulique du Tensift qui est un espace qui s'étend sur une superficie de l'ordre de 19800 Km<sup>2</sup> s'alimente essentiellement dans le domaine atlasique.

Les ressources hydriques de cette région, vu la présence de l'Atlas, sont relativement importantes. Mais malgré cet atout, ces ressources connaissent une raréfaction de plus en plus accrue en raison d'une gestion peu rationnelle, d'une surexploitation du potentiel hydraulique due essentiellement aux deux plus grands pôles économiques de Marrakech « l'agriculture et le tourisme », et qui constituent les plus grands consommateurs de l'eau.

Cependant cette ville connaît un stress hydrique qui est considéré comme facteur limitant le développement urbain et touristique qui englobe également l'irrigation des golfs.

## **2- Les ressources et qualité d'eau de surface :**

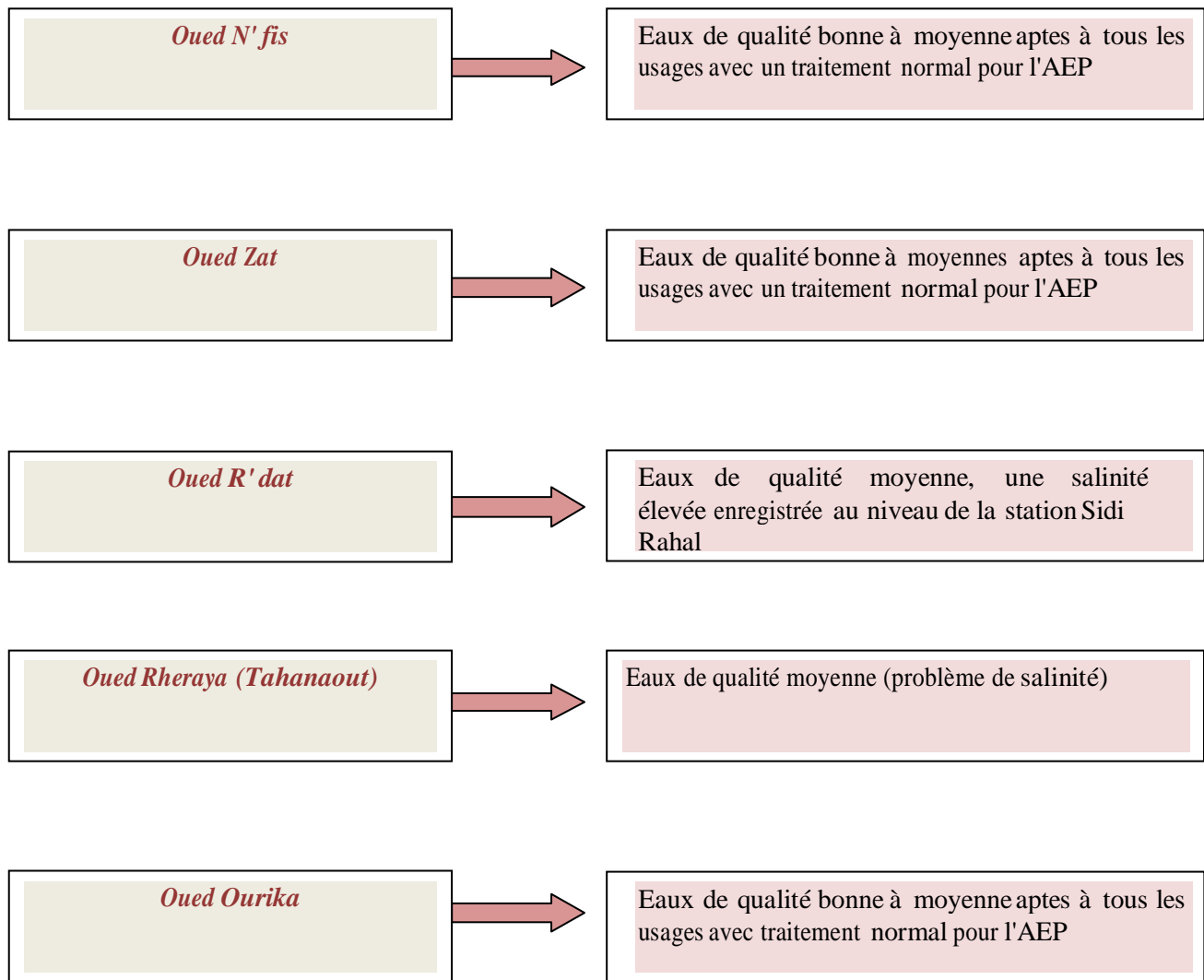
Les ressources en eau de surface sont très irrégulières et inégalement réparties. Le Haut Atlas constitue le château d'eau des écoulements de surface, puisque les oueds les plus importants y prennent naissance, alors que la plaine est une zone de transition et d'utilisation de l'eau. Cependant, les ruissellements à caractère torrentiel, qui se produisent suite aux orages ou aux précipitations intenses, sont collectés par le réseau hydrographique du Tensift qui les évacue vers l'Océan.

Le réseau hydrographique traversant la ville de Marrakech est composé de :

- Oued Tensift au Nord
- Oued Issil qui se jette au Nord dans Oued Tensift
- Oued Taroumit limitant l'arrondissement d'Annakhil à l'Est avant de se jeter dans Oued Tensift .
- Chaaba Ali Bali traversant les arrondissements de Ménara Guéliz avant de rejoindre Oued Tensift au nord de la ville.

En raison de sa forte minéralisation et de la pollution organique et bactériologique importante à l'aval des rejets urbains de la ville de Marrakech, l'eau issue de l'oued Tensift est considérée mauvaise à moyennement mauvaise, et ce degré de pollution augmente en allant du Tensift haut vers Tensift bas.





*Fig.4: Les qualités d'eau des principaux effluents d'Oued Tensift.*

### **3- Les ressources et qualité d'eau souterraines :**

L'inégale répartition de la pluviométrie et des eaux de surface d'une part, et la géologie caractérisée par la présence de structures très diversifiées d'autre part, sont à l'origine de l'inégale répartition géographique des eaux souterraines sur toute la région du Haouz-Tensift.

Pour la région de Marrakech la principale nappe est celle du Haouz-Mejjate d'âge plio-quaternaire et néogène. C'est la nappe la plus productive de la région mais également la plus exploitée.

La nappe du Haouz et sa bordure occidentale sont limitées par la chaîne atlasique au Sud et les chaînons des Jbilet au Nord, elle s'étend d'Est en Ouest entre les reliefs des Jbilet et l'oued Chichoua.

Du point de vue géologique, la nappe du Haouz est un bassin de sédimentation d'origine tectonique, dans lequel se sont accumulés au Néogène et au quaternaire d'importantes formations détritiques issues du démantèlement de la chaîne atlasique au cours de son soulèvement.

Les écoulements s'établissent dans les alluvions plio-quaternaires et les formations du Néogène. La surface libre de la nappe s'établit en moyenne à 30 m sous le niveau du sol, mais se situe entre 5 à 10 m le long de l'oued Tensift et peut descendre jusqu'à 80 m le long du piémont de l'Atlas. Dans la zone où l'eau souterraine fait l'objet de l'exploitation intensive elle s'établit aux environs de 40 à 50 m.

Les productivités de la nappe sont généralement bonnes. Elles sont de quelques litres par seconde et peuvent atteindre par endroit 50 l/s ; mais en se rapprochant de la zone piémontaise, elles deviennent de plus en plus faibles.

En ce qui concerne le bilan de la nappe, la recharge de la nappe se fait principalement par infiltration des eaux d'irrigation et des eaux de crues le long des oueds atlasiques traversant la plaine, principalement les oueds de N'fis, de Rhéraya, d'Ourika, du Zat, et du R'dat. L'écoulement général de la nappe se fait du sud vers le Nord.

L'exploitation de la nappe se fait par puits à mains, Khettaras et par pompage. Le développement hydro-agricole que connaît la plaine du Haouz et l'exploitation intensive des eaux souterraines qui s'en suivent, conjugués aux effets de la sécheresse qui sévit sur la zone depuis les années 1970, ont engendré une baisse du niveau de la nappe.

La nappe du Haouz-Mejjate présente une qualité moyenne à mauvaise. Mais au niveau du secteur de la nappe du Haouz situé en aval de Marrakech, les eaux deviennent de très mauvaise qualité, vu leur teneur élevée en nitrates et leur salinité qui dépasse généralement 4g/l

*Chapitre II*

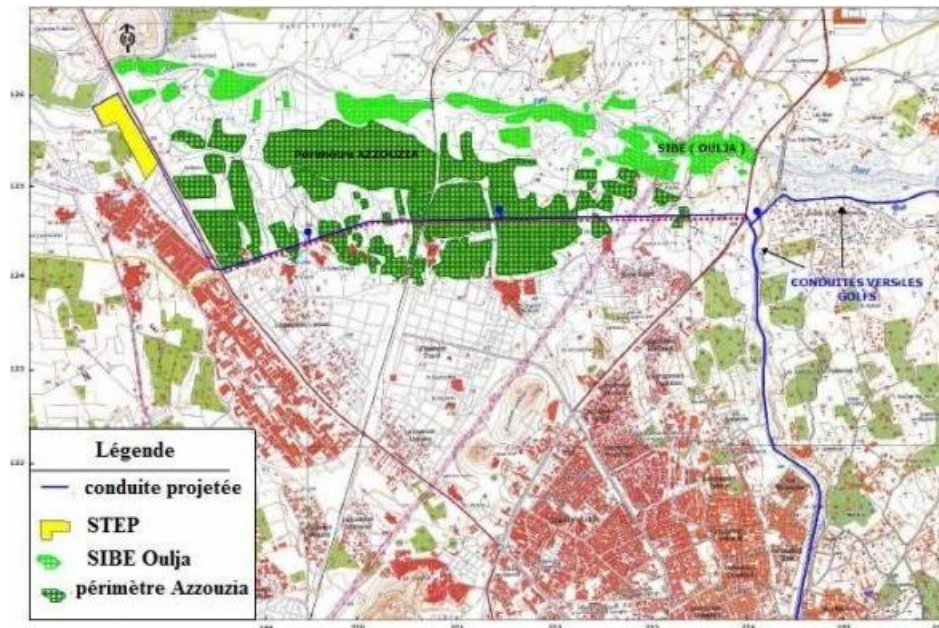
*STEP de Marrakech  
Traitement des eaux  
usées et étude des  
boues*

## **I- Présentation de la station d'épuration de Marrakech (STEP):**

### **1- La situation géographique :**

La station d'épuration de Marrakech est située au Nord de la ville de Marrakech, en rive de l'oued Tensift à environ 13 km sur la route nationale n°7 axe Marrakech-Safi.

Le site présente une superficie totale d'environ 18 ha.



*Fig.5 : Carte de localisation de la STEP de Marrakech ( RADEEMA)*



**Photo.1 : station d'épuration de la ville de Marrakech**

## **2- Objectifs de la mise en place de la station :**

Le choix du site est motivé, d'une part, par sa côte la plus basse qui permet la collecte et le transport gravitaire des eaux usées, et d'autre part, par sa situation très proche de la décharge contrôlée et aménagée pour l'évacuation des sous produits du traitement, à savoir, les boues déshydratées, le sable et les refus de grilles, et aussi suivant la direction des vents afin d'éviter la propagation des mauvaises odeurs vers le milieu urbain.

## **3- Objectifs de la station d'épuration des eaux usées (la STEP) :**

Le projet d'extension de la station d'épuration envisage un dédoublement des files boues et biogaz, un traitement secondaire, tertiaire et une désinfection qui vont s'ajouter au traitement primaire de la 1ère tranche. Les eaux issues du traitement tertiaire répondront aux normes marocaines pour l'irrigation de plusieurs cultures et pour l'arrosage des espaces verts. La réutilisation des eaux usées traitées aura donc pour objectif :

- De soulager les ressources en eau potable
- Bon développement des cultures vu le faciès chimique des eaux
- Protection des nappes souterraines du danger de contamination par les constituants d'une eau usée non traitée.

Ainsi que la protection de l'environnement, l'amélioration des conditions sanitaires et la participation au développement touristique.

## **4- Description de fonctionnement de la STEP de Marrakech :**

La station de traitement et d'épuration des eaux usées elle est conçue pour épurer la totalité des eaux résiduaires (urbaines et industrielles) de la ville, afin de les rejeter une autre fois dans le milieu naturel ou destinée à l'irrigation des terrains de golf ; et qui permet d'avoir une ressource d'eau qui répond aux normes et qui va permettre de soulager les ressources en eau potable, cette eau épurée pourra garantir un volume annuel de 33 Mm<sup>3</sup>.

→ Les étapes de traitement de la station sont décrites selon trois fils présentés comme suite (*voir annexes*) :

### **a- File Eau :**

Les eaux usées sont collectées au niveau d'un déversoir d'orage situé en amont et à 2 Km de la station, l'eau est acheminé gravitairement par la suite à l'aide d'un collecteur jusqu'à l'entrée de la station.

Le déversoir d'orage joue un rôle de gestion du débit d'eau entrant, il est équipé d'une vanne murale pour la régulation des débits d'entré et particulièrement pendant les périodes de pluies ou de crues, vu qu'un excès de débit contribue au dysfonctionnement des matériaux de la station en aval et diminue l'efficacité du traitement.

Cet excès est donc délesté vers oued Tensift par le déversoir d'orage.

Le débit total alimentant le traitement primaire devient :

- Débit journalier moyen : 90,720 m<sup>3</sup>/j
- Débit de pointe de temps sec: 184 ,896m<sup>3</sup>/j
- Débit de pointe de temps de pluie : 9,828 m<sup>3</sup>/h

- **Prétraitement :** (*voir annexes*)

L'ouvrage de prétraitement comprendra, de l'amont vers l'aval:

- Une fosse à bâtards
- une grille de protection à nettoyage manuel à l'entrée de l'ouvrage,
- un dégrillage grossier entrefer de 80 mm.
- un dégrillage fin entrefer de 10 mm.
- un dessablage/dégraissage aéré avec extraction automatique des sables piégés.

Les refus de la grille de protection sont évacués directement dans une benne, alors que les refus des dégrilleurs sont compactés avant leur évacuation. Sables et graisses sont repris par 2 ponts racleurs suceurs indépendants. Les sables sont essorés avant leur évacuation à la décharge, alors que les graisses sont concentrées dans une fosse de stockage équipée d'un dispositif d'évacuation des eaux de fonds pour envoi en digestion sous une forme concentrée.



**Photo.2 : dégrillage grossier**

**Photo.3 : dégrillage fin.**

**Photo.4 : Dessablage-Dégraissage**

- **Traitement primaire :**

Le traitement primaire consiste à une séparation des matières en suspension non retenues par le prétraitement. Cette séparation est réalisée dans des décanteurs de forme circulaire (*voir annexes*). Les ouvrages sont équipés de ponts racleurs animés d'un mouvement de va et vient disposés transversalement, qui comportent les dispositifs de raclage des boues et des écumes de surface. Les différentes manœuvres et les inversions des sens de marche des ponts sont bien entendu entièrement automatiques. La structure et le mode d'entraînement des ponts et similaire à ceux prévus dans les dessableurs. Le raclage du fond s'opère de l'aval vers l'amont et les boues piégées dans l'ouvrage sont rassemblées dans des trémies construites en amont des ouvrages, sous l'arrivée des eaux brutes, d'où elles sont soutirées par pompage vers les ouvrages de leur traitement ultérieur. (*voir annexes*)



**Photos 5 : décanteur primaire.**

- **Traitement Secondaire :**

Le procédé à boues activées utilise l'épuration biologique dans le traitement des eaux usées. C'est un mode d'épuration par cultures libres. L'épuration par boues activées consiste à mettre en contact les eaux usées avec un mélange riche en bactéries par brassage pour dégrader la matière organique en suspension ou dissoute. Il y a une aération importante (Débit d'air injecté de 72 000 Nm<sup>3</sup>/h) pour permettre l'activité des bactéries et la dégradation de ces matières, suivie d'une décantation secondaire (Surface de clarification de 10 110m<sup>3</sup>) (*voir annexes*) à partir de laquelle on renvoie les boues riches en bactéries vers le bassin d'aération à volume total de 70800m<sup>3</sup>. Les boues quant à elles, produites dans le premier bassin, décantent naturellement et sont renvoyées en plus grande partie vers le bassin d'aération (*voir annexes*), la partie excédentaire est séparée pour subir une Flottation des boues afin de rejoindre la file boue.

- **Traitement Tertiaire :**

Les eaux épurées en sortie du traitement biologique ne peuvent être utilisées directement pour l'irrigation des espaces verts, il est donc impératif de compléter le traitement secondaire ou biologique par un traitement tertiaire comportant la Coagulation, la Flocculation et la Filtration a sable de surface de 550m<sup>2</sup>. Donc Le traitement tertiaire vise à éliminer les dernières MES et le phosphore (*voir annexes*).

- **Désinfection :**

Afin d'obtenir une eau destinée a l'irrigation de point de vue microbiologique, l'eau de traitement tertiaire subissent une désinfection par UV et/ou un traitement de chloration en cas de nécessité.

### **b- File Boue**

- **Épaississement gravitaire des boues :**

Les boues retenues par la décantation primaire doivent être traitées avant leur évacuation. Ces traitements consistent à les stabiliser tout en réduisant les quantités et en éliminant une partie de l'eau qu'elles contiennent. Les épaisseurs (*voir annexes*) sont alimentées par le haut et les boues sont reprises à l'herse et envoyées par pompage vers les digesteurs. Le surnageant des boues épaissies rejoint gravitairement la fosse toute eaux située en aval des dessableurs – déshuileurs.

- **Digestion anaérobie :**

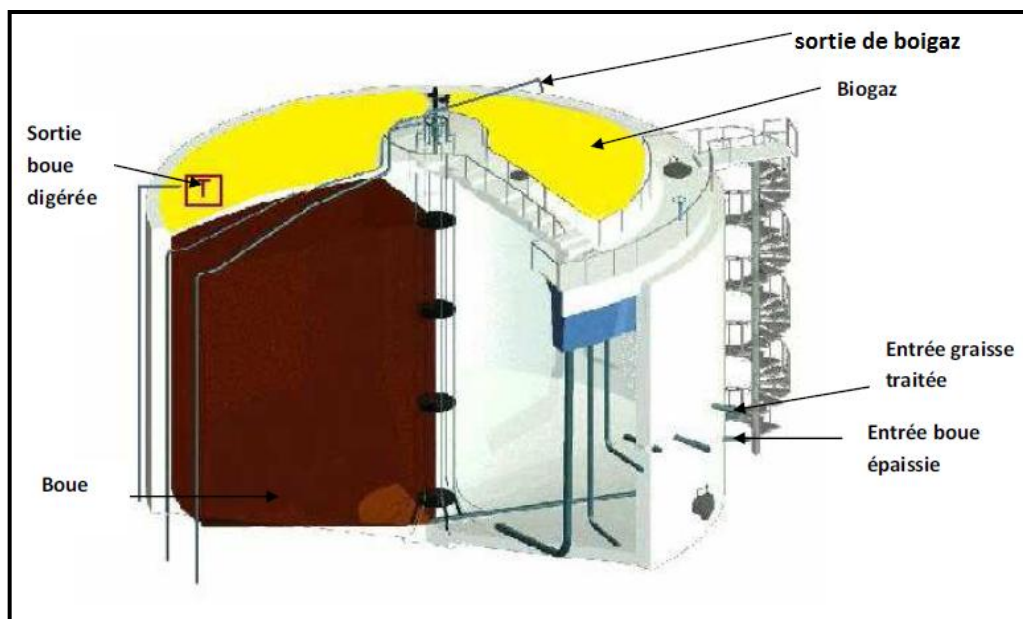


Les boues primaires sont stabilisées par digestion anaérobie (4 digesteurs soit 24 000m<sup>3</sup>) qui est une fermentation en absence d'oxygène qui engendre la fermentation méthanique, il en résulte l'élimination d'une quantité très importante de matière organique. Par ailleurs, la digestion anaérobie produit du biogaz (20 000 Nm<sup>3</sup>/j) qui peut être récupéré pour chauffage ou production d'énergie électrique. Les paramètres essentiels sont le temps du séjour et la température. Il est prévu une digestion mésophile (37°C) sous condition d'un brassage efficace, avec un temps de séjour de 21 jours.(voir annexes)



**Photo 6: Digesteur**

- **Les équipements annexes du digesteur** (voir annexes).



**Fig. 6 : Coupe longitudinale d'un digesteur anaérobie**

- **Stockage des boues digérées :**

Pour tamponner la production des boues et permettre une déshydratation des boues digérées, un stockeur de 1800 m<sup>3</sup> de capacité a été mis en disposition pour le stockage de ces boues digérées.

- **Déshydratation des boues :**

La déshydratation est assurée par des filtres à bande presseuse, ou les processus de filtration comportent les étapes suivantes : floculation avec des polyélectrolytes, drainage de la boue floculée, égouttage et pressage de la boue drainée.

- **Chargement et Stockage des boues déshydratées :**

Les boues déshydratées seront acheminées vers les bennes de stockage avant d'être évacuées vers leur destination finale.

### **c- File Gaz**

Dans le digesteur et sous l'action de bactéries anaérobies, une fraction du carbone contenu dans les boues est transformée en biogaz (20 000 Nm<sup>3</sup>/j), composé majoritairement de

méthane (CH<sub>4</sub>) et d'autre gaz comme le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) ainsi que l'hydrogène sulfuré (H<sub>2</sub>S). Ce biogaz est valorisé pour :

- le brassage des réacteurs (Digesteurs)
- le chauffage des réacteurs (réacteurs mésophiles / température de fonctionnement 37C)
- la cogénération (production combinée de chaleur et d'électricité). (*voir annexes*)

Le biogaz produit est tout d'abord désulfuré (*voir annexes*) avant d'être détendu pour alimenter l'unité de cogénération, L'énergie électrique produite (9 500 000 KW/h/an) (45% des besoin en électricité) sera donc directement utilisée sur le site et la chaleur récupérée servira, soit pour le réchauffage de digesteurs, soit pour les besoins du bâtiment d'exploitation.

L'excès de gaz est stocké dans un gazomètre d'un volume de 2000 m<sup>3</sup>, une fois le gazomètre saturé le gaz est brulé par le biais d'une torchère à flamme invisible.



**Photos 7 : Le gazomètre**

#### **d- Traitement des odeurs**

L'acheminement et le traitement des eaux usées conduit souvent à la production d'odeurs désagréables. L'absence d'air, et plus particulièrement d'oxygène, fait que les eaux usées, durant leur acheminement, deviennent septiques et donc malodorantes. Ceci apparaît parfois dans le réseau d'assainissement mais souvent à l'arrivée dans la station d'épuration. Dans la station d'épuration, le stockage et le traitement des sous produits, obtenus suite aux différents traitements réalisés sur les eaux usées (boues, flottants, refus de dégrillage...), peuvent aussi dégager de fortes odeurs. Dans les stations, les nuisances sont principalement dues à la

présence de composés sulfurés, déjà formés dans le réseau d'acheminement des eaux et à la présence de composés azotés. Les composés sulfurés, représentent la majorité de l'air vicié venant des étapes de prétraitement, épaisseur et déshydratation des boues, alors que les composés azotés sont principalement localisés au niveau du traitement des boues. Pour éviter la propagation des odeurs dans les ouvrages adjacents, et pour assurer un environnement de travail sain et sécurisé, tous les risques de dégagement de gaz malodorants seront minimisés par l'implantation de deux installations de traitement des odeurs (65 000m<sup>3</sup>/h), la première est une désodorisation Biologique et la deuxième est une désodorisation physicochimique.

### **5- L'impact de la station sur l'environnement :**

La station de traitement joue un rôle très important dans la protection de l'environnement et des ressources d'eaux, à la fin de chaque ligne, une production d'un sous produits est réalisé :

• **La ligne eau:** production des eaux traitées (épurées) pour l'irrigation des 13 golfs de Marrakech en plus de la palmeraie.

• **La ligne boue :** les boues déshydratées vont être utilisées comme des engrais dans le domaine agricole.

• **La ligne biogaz :** le biogaz produit est la source essentielle de l'alimentation énergétique de la STEP (presque 50% de sa demande en électricité) après sa combustion au niveau de la cogénération.

➔ **En plus de ces sous produits, la station joue également un rôle dans:**

- La protection de l'environnement de la pollution (pollution de la nappe, les eaux de surface, ...).
- Réduction des problématiques sanitaires (les maladies, les virus, ...)
- Elimination de la réutilisation des eaux usées non traitée dans l'irrigation (pour les douars qui sont proches des points des rejets des eaux usées).
- Réduction de la consommation abusive de la nappe phréatique pour l'irrigation (utilisation des eaux traitées).
- Assurée l'autonomie en énergie électrique pour l'exploitation de la STEP et l'électrification du milieu rural qui l'entour.

→ **En revanche la STEP à un aspect négatif qui se présente comme suite :**

- Le projet d'assainissement de la RADEEMA répond aux nouvelles demandes (les golfs) mais il néglige le domaine agriculture.

Dans le cas d'un sous-dimensionnement, la STEP est obligée de by-pass toutes les eaux brutes entrantes et donc elle ne répond pas à l'aspect réglementaire du rejet des eaux usées.

- La pollution de l'air : les odeurs liées à la fermentation des eaux usées.
- La pollution sonore : les bruits à l'intérieur des locaux, bruits des circulations,.....

## **6- Généralités sur les boues**

La boue est un mélange d'une grande variété de bactéries et autres micro-organismes (protozoaires, etc.) vivant sous des conditions aérobies, anoxiques ou anaérobies.

### **6-1 Facteurs de qualité des boues :**

Les analyses suivantes sont très importantes pour le suivi de la qualité d'une boue :

#### **6-1-1 MES (matières en suspension) (g/l) :**

Ceci est la mesure de la quantité de boue activée, solides en suspension dans un réacteur. La méthode d'analyses est exactement la même que celles pour les MES d'une eau. Dans un système de traitement aux boues activées traditionnel, la concentration en boue, MES, se situe entre 3 et 6 g/L. L'analyse MES est utilisée tant que la filtrabilité de l'échantillon reste bonne et principalement lorsque qu'on s'occupe de systèmes aérobies. Dans les autres cas (filtration difficile ou traitement anaérobie), la méthode MS est utilisée.

#### **6-1-2 MS (Matière Sèche) (% ou g/l) :**

La MS représente la concentration en boues après évaporation (à 105 °C) d'un échantillon de boue dans une boîte de pétri. La concentration en matière sèche est calculée comme suit:

$$\text{MS (\%)} = \text{Poids après séchage (g)} / \text{Poids initial (g)}$$

### **6-1-3 Volume de boue (ml/l) :**

Le volume de boue correspond à la mesure de la vitesse de sédimentation de cette boue. Ce paramètre est utilisé seulement lors de l'analyse d'une boue activée.

Pour la détermination du volume de boue, on prend 1 litre de boue que l'on laisse décanter 30 minutes dans un cône Imhoff. On peut voir ensuite une ligne de séparation entre le surnageant (eau claire) et la couche de boue au dessous. Après une demi-heure de sédimentation, on mesure le volume de boue présente dans l'éprouvette (en ml). Le résultat étant exprimé en ml/l.

Pour une STEP, la vitesse de sédimentation d'une boue est un paramètre critique, qui influence grandement la qualité de l'effluent. Une mauvaise décantation des boues débouche sur d'importants problèmes : la séparation entre l'eau traitée et les particules de boues est rendue difficile voire impossible. Une perte accidentelle de boues est généralement observée dans ce cas, ce qui résulte en des concentrations de matières en suspension dans l'effluent très élevées.

Pour assurer une bonne efficacité de la STEP, un volume de boue de 800 ml/l ou moins doit être atteint. Si le volume de boue est plus grand que 800 ml/l, la phase de sédimentation peut être prolongée (ou le bassin de sédimentation doit être dimensionné plus grand) afin de diminuer la charge de surface. L'effet direct est une réduction du temps d'aération (dans le cas d'un système à batch séquentiel (= diminution du volume actif) ou d'un coût d'investissement plus important.

## **6-2 Les différents types de boues :**

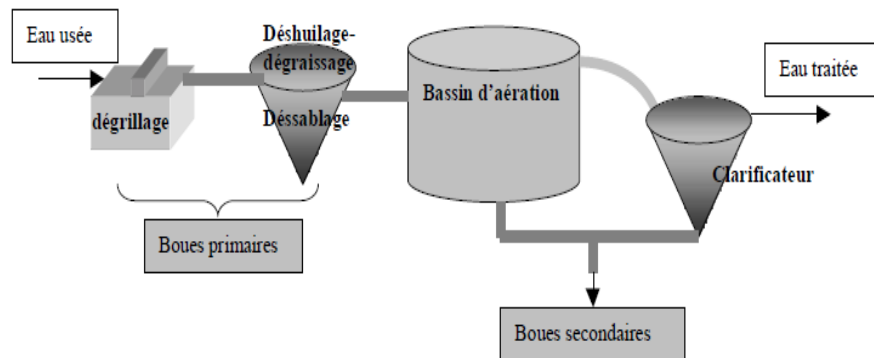
### **6-2-1 Boues primaires :**

Elles sont issues du traitement primaire et sont produites par simple décantation, en tête de station d'épuration. Ces boues sont fraîches, c'est-à-dire non stabilisées (forte teneur en matière organique) et fortement fermentescibles.

### **6-2-2 Boues secondaires :**

Ou boues activées issues d'un traitement secondaire, elles sont essentiellement composées de biomasse présente en excès dans le système et par la matière réfractaire à l'épuration biologique. Elles sont récupérées après la décantation secondaire (clarificateur), ce sont des

boues fraîches biologiques, sous forme de floccs de bactéries. Leur pouvoir fermentescible dépend du temps de séjour dans le système d'aération-décanteur secondaire.



*Fig.7 : Schéma descriptif de l'origine des boues primaires et secondaires*

### 6-2-3 Boues mixtes (boues anaérobies) :

Représente le mélange de boues primaires et secondaires, leur composition est dépendante de la quantité de boues primaires et secondaires produites. Très fermentescibles, ces boues subissent un traitement de stabilisation.

### 6-3 Procédés de traitement de la boue :

La gestion des boues produites lors de l'épuration des eaux usées est devenue un enjeu environnemental de premier ordre. Depuis plus de 10 ans, les recherches menées au Laboratoire de Génie Chimique concernent le développement et l'optimisation de procédés permettant le traitement des boues d'épuration. Les deux issues majeures pour les boues sont la valorisation énergétique et la valorisation agricole.

Trois thématiques principales sont abordées :

- La déshydratation mécanique
- Le séchage thermique convectif
- La production de matériaux adsorbants à partir de boues

### **6-3-1 La déshydratation mécanique :**

Dans les stations d'épuration, l'étape de traitement finale des boues est leur déshydratation mécanique afin d'éliminer un maximum d'eau. En fonction de la technologie utilisée (centrifugeuse, filtre presse, filtre à bandes).

Par exemple, si on obtient une teneur en matières sèches située entre 15 et 35%, signifie que les boues contiennent encore jusqu'à 85% d'eau. Il est donc impératif d'optimiser cette étape afin d'assurer la plus grande élimination possible d'eau. Pour ce faire, le Laboratoire de Génie Chimique dispose d'une cellule de filtration-compression normalisée ainsi que d'un filtre à plateaux. Ces équipements permettent de caractériser le comportement des boues lors de la déshydratation et d'essayer de l'optimiser, notamment par la sélection et le dosage de flocculant.

### **6-3-2 Le séchage thermique convectif :**

En aval de la déshydratation mécanique, le séchage thermique est utilisé pour atteindre des teneurs en matières sèches proches de 90 à 95%. Cette opération présente de nombreux avantages, tant en amont d'une valorisation énergétique que d'une valorisation agricole :

- Réduction de la masse et du volume, et par conséquent diminution des coûts de stockage, manutention et transport.
- Obtention d'un granulé facilement manipulable.
- Transformation de la boue en un combustible dont le pouvoir calorifique dépend du niveau de siccité.
- Stabilisation et hygiénisation du produit lorsque la température de séchage est suffisamment haute.

### **6-3-3 La production de matériaux adsorbants à partir de boues :**

Cette thématique s'inscrit dans la volonté de développer de nouvelles filières de valorisation pour les boues d'épuration. Les recherches menées au laboratoire consistent à produire un matériau adsorbant à partir de boues séchées et à caractériser ses performances pour l'élimination de polluants présents en phase liquide. L'intérêt est de produire, à partir d'un



résidu, une alternative bon marché aux charbons actifs couramment utilisés pour le traitement d'effluents liquides.

Dans le cadre de notre étude, nous nous intéresserons à un système de traitement de la boue et plus précisément au processus de la digestion anaérobie. Les paragraphes qui suivent nous renseignent sur tout ce qui doit être connu vis-à-vis de ce procédé :

## **II- La digestion anaérobie :**

La digestion anaérobie est un système extensif d'épuration des eaux usées domestiques, industrielles ou mixtes, plus favorable pour les pays chauds. En effet, l'élément essentiel qui permet sa réalisation est la température ainsi que d'autres paramètres.

### **1- Historique de la digestion anaérobie :**

La digestion anaérobie a été découverte il y a plus de trois siècles. C'est en 1630 que des scientifiques ont pour la première fois constaté qu'un gaz inflammable pouvait se dégager d'une matière organique en décomposition.

D'emblée on peut rappeler que les systèmes de traitement anaérobie sont réputés plus économiques que les systèmes aérobies du fait de l'économie d'énergie, de la faible production de boue, et la possibilité de réutiliser le biogaz produit, qui est converti parfois en énergie électrique ou mécanique.

### **2 - Intérêts et limites de la digestion anaérobie :**

La digestion anaérobie offre plusieurs avantages par rapport à la voie plus classique aérobie : capacité à dégrader des effluents complexes et concentrés, faible production de boues, faibles coûts de fonctionnement et qui ne demande pas une grande technicité pour sa maintenance et son suivi, voire la production d'énergie à partir du biogaz qui en résulte et, qui, du reste, pourrait être valorisé.

Mais ce procédé se montre instable, sensible aux variations des conditions opératoires et parfois plusieurs mois sont nécessaires pour ramener le réacteur à un point de fonctionnement normal.

Ce défaut majeur de la digestion anaérobie explique son faible emploi industriel et nécessite pour être franchi une amélioration des outils de diagnostic et de pilotage qui passe entre autre par une meilleure connaissance des phénomènes biologiques en jeux.

### **3- Mécanisme de la digestion anaérobie :**

La digestion anaérobie est un processus microbiologique de conversion de la matière organique, faisant intervenir essentiellement des populations bactériennes, ainsi que des protozoaires et quelques champignons anaérobies. On l'observe dans des biotopes variés, naturels ou artificiels, tels que les marais, les sédiments de lac, le rumen des herbivores ou encore les digesteurs de station d'épuration. Le principe de la digestion anaérobie est décrit comme la conversion de la matière organique en biomasse et en biogaz, composée essentiellement de méthane (CH<sub>4</sub>) et de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>).

La digestion anaérobie d'un produit organique complexe comporte quatre métabolismes différents à savoir : l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse.

#### **3-1 L'hydrolyse :**

Les polymères organiques sont convertis en molécules plus simples (monomères) solubles, sous l'action d'exoenzymes hydrolytiques (cellulases, protéases, lipases) produites par des bactéries fermentaires, anaérobies strictes ou facultatives. L'hydrolyse n'est pas un mécanisme obligatoire de la fermentation méthanique, mais une étape obligatoire pour la solubilisation des complexes organiques insolubles non disponibles pour les micro-organismes.

#### **3-2 L'acidogènes :**

Les produits de l'hydrolyse sont fermentés en composés organiques simples à courte chaîne (2 à 6 carbones) par des bactéries acidogènes, anaérobies strictes ou facultatives. Cette étape aboutit à un mélange d'acides gras volatils (A.G.V.) et de composés neutres (alcools).

#### **3-3 L'acétogénèse :**

Cette étape est réalisée par des bactéries acétogènes productrices d'hydrogène et conduit à la formation d'acétate, de CO<sub>2</sub> et d'hydrogène (H<sub>2</sub>). Ces réactions de déshydrogénation sont thermodynamiquement défavorables et ne sont possibles qu'à de très faibles pressions partielles en hydrogène. L'action des bactéries acétogènes dépend donc de l'activité des bactéries méthanogènes consommatrices d'hydrogène.

On peut noter également l'activité des bactéries homoacétogènes qui permettent la

formation d'acétate à partir du CO<sub>2</sub> et de l'H<sub>2</sub>.

### 3-4 La méthanogènes :

Les deux principales voies de la fermentation de CH<sub>4</sub> sont la réduction du CO<sub>2</sub> (méthanogénèse hydrogéntrophique) et la décarboxylation de l'acide acétique (méthanogénèse acétoclastique) qui représente environ 70% de la formation de méthane, elles peuvent être décrites par les réactions suivantes :

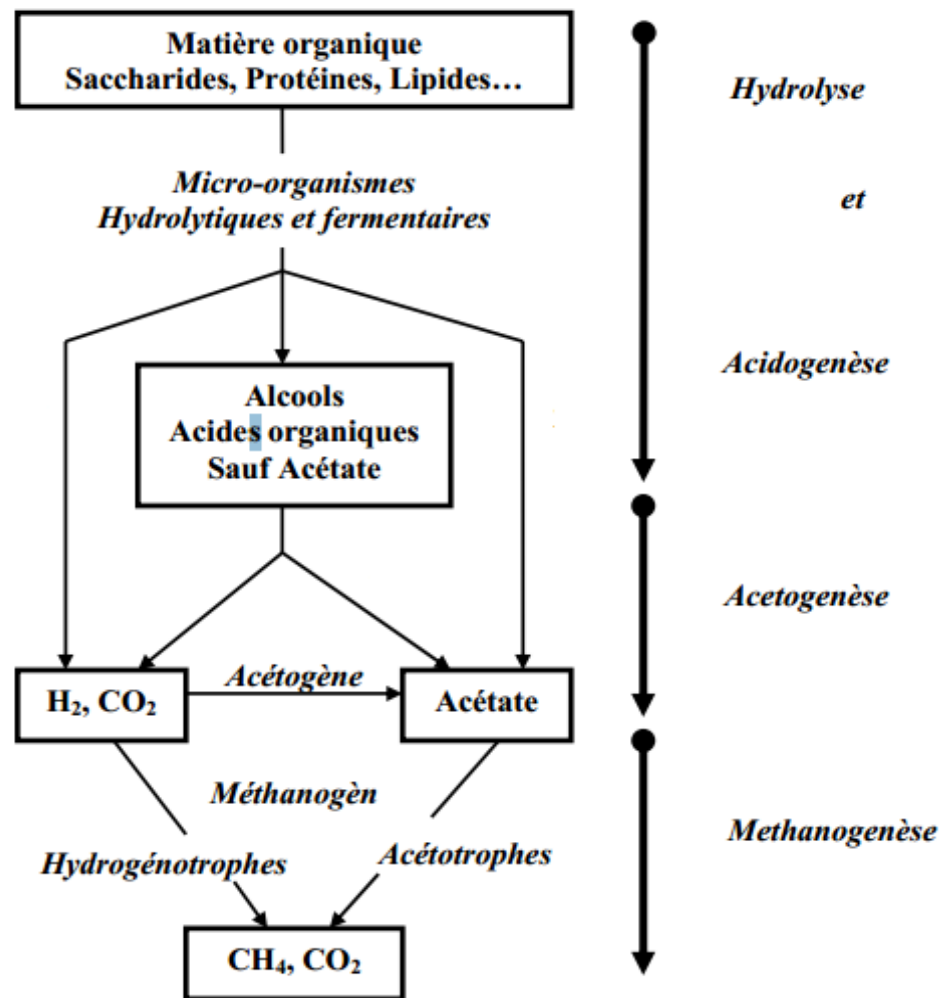
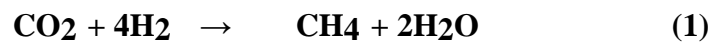


Fig.8: Schéma des différentes étapes de la digestion anaérobie.

#### **4- Les paramètres de la digestion anaérobie :**

##### ***1- Alimentation (quantité et composition)***

Chaque station d'épuration anaérobie est développée pour être capable de traiter une certaine quantité de matière organique. Cette quantité ou charge organique est généralement exprimée en kg DCO par jour ou en EH (Equivalent Habitant) ainsi en concentration de la boue qui est représentée par la matière sèche (MS).

Pour le traitement anaérobie des boues en excès, il s'agit des boues primaires et des boues secondaires.

Il est primordial de respecter la charge maximum et de ne pas la dépasser. Cette charge maximale est la charge prise en compte lors du dimensionnement du réacteur.

##### ***2- pH***

C'est un paramètre nécessaire pour le bon fonctionnement de la digestion anaérobie, ainsi pour la stabilisation du milieu microbien au sein du digesteur.

Pour les bactéries méthanogènes, le pH doit être entre 6.5 et 7.8. Les bactéries acidogènes et acétogènes peuvent supporter des pH plus bas (jusqu'à 4 – 5). Il est essentiel que les deux réactions (acidification/méthanisation) s'effectuent bien ensemble. Sinon, le réacteur s'acidifie et la méthanisation est inhibée.

Les bactéries méthanogènes sont très sensibles aux variations de pH en particulier dans l'étendue basse de pH ( $\text{pH} < 6.5$ ).

##### ***3- Alcalinité (capacité tampon) :***

La capacité tampon représente un paramètre encore plus important que le pH. Cette capacité tampon permet d'absorber le pH des acides gras volatiles formés durant la dégradation anaérobie.

##### ***4- Température :***

La méthanogénèse est une réaction essentielle de la digestion anaérobie très influencée par la température ; la température optimale pour un bon déroulement de la digestion anaérobie se situant autour de 37 °C.

### 5- Les AGV (mg/l):

La concentration en acides gras volatiles est un paramètre extrêmement important pour le suivi d'un traitement anaérobie. L'acidification constitue la première étape de la dégradation anaérobie, les polymères sont hydrolysés en monomères puis transformés en acides gras, dioxyde de carbone et hydrogène. La dernière étape, la plus sensible est la méthanisation qui transforme les acides gras (acétate) en méthane. Le fait de connaître la concentration en acides gras de l'effluent d'un traitement anaérobie nous permet de savoir si la dégradation est complète ou non.

Les acides gras les plus importants sont l'acide acétique ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), l'acide propionique ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$ ), et l'acide butyrique  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COOH}$ , etc. L'acide citrique fait aussi partie de la famille des acides gras volatiles.

*Chapitre III*

*Analyses, Données et  
interprétations*

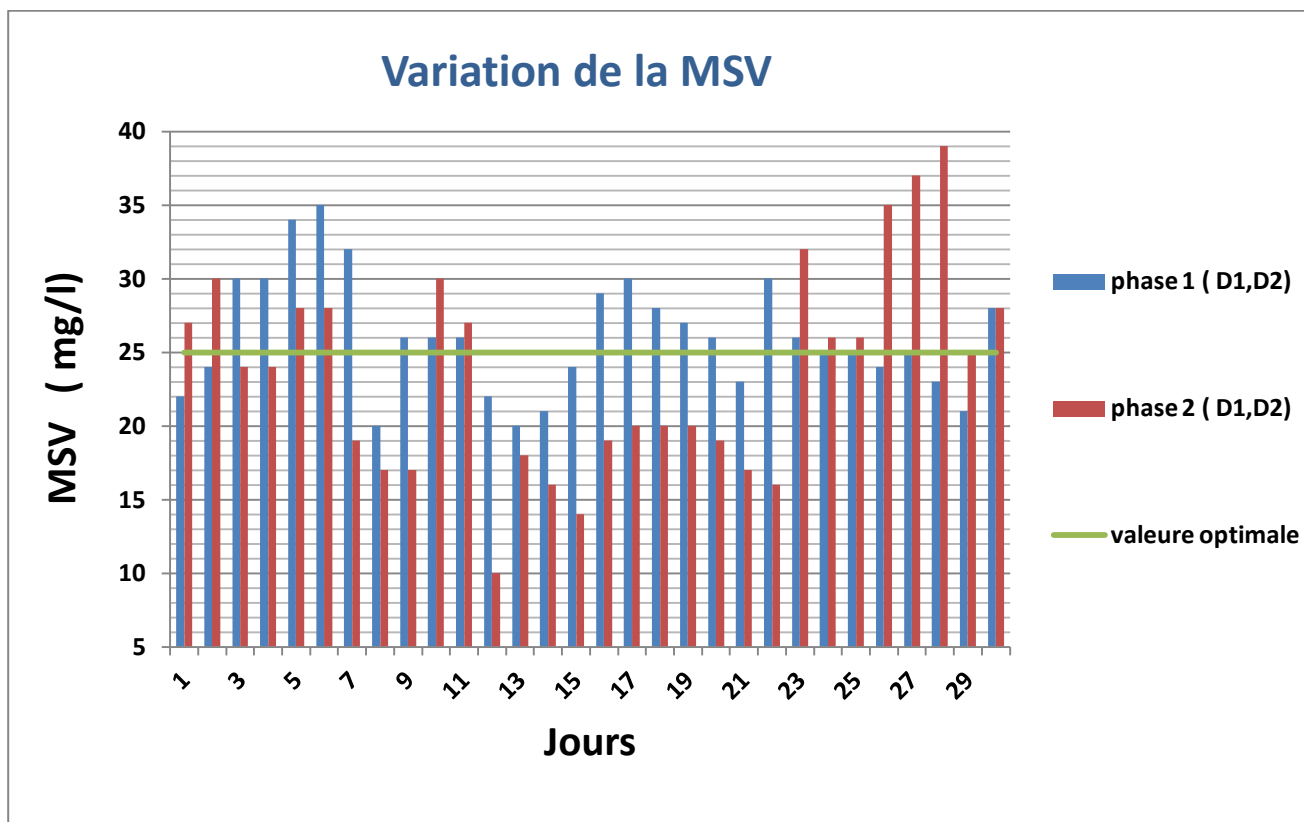
Durant cette étude, nous avons aussi suivi l'évolution des paramètres tels que la température, pH, les AGV, l'alcalinité, les concentrations des charges entrantes ainsi que le volume du biogaz produit.

Les résultats obtenus lors de ces analyses ont permis de démontrer la possibilité d'avoir plusieurs problèmes de déroulement de la digestion anaérobie, et qui sont plus marqués en mois d'Avril. C'est pour cette raison que les conditions de traitement de la boue par procédé de la digestion anaérobie doivent être particulièrement bien définies et entretenues afin de garantir son efficacité.

***I- Analyses et interprétation du mois d'Avril : (voir annexes)***

**1- La MSV :**

**a- La MSV à l'entrée du digesteur :**



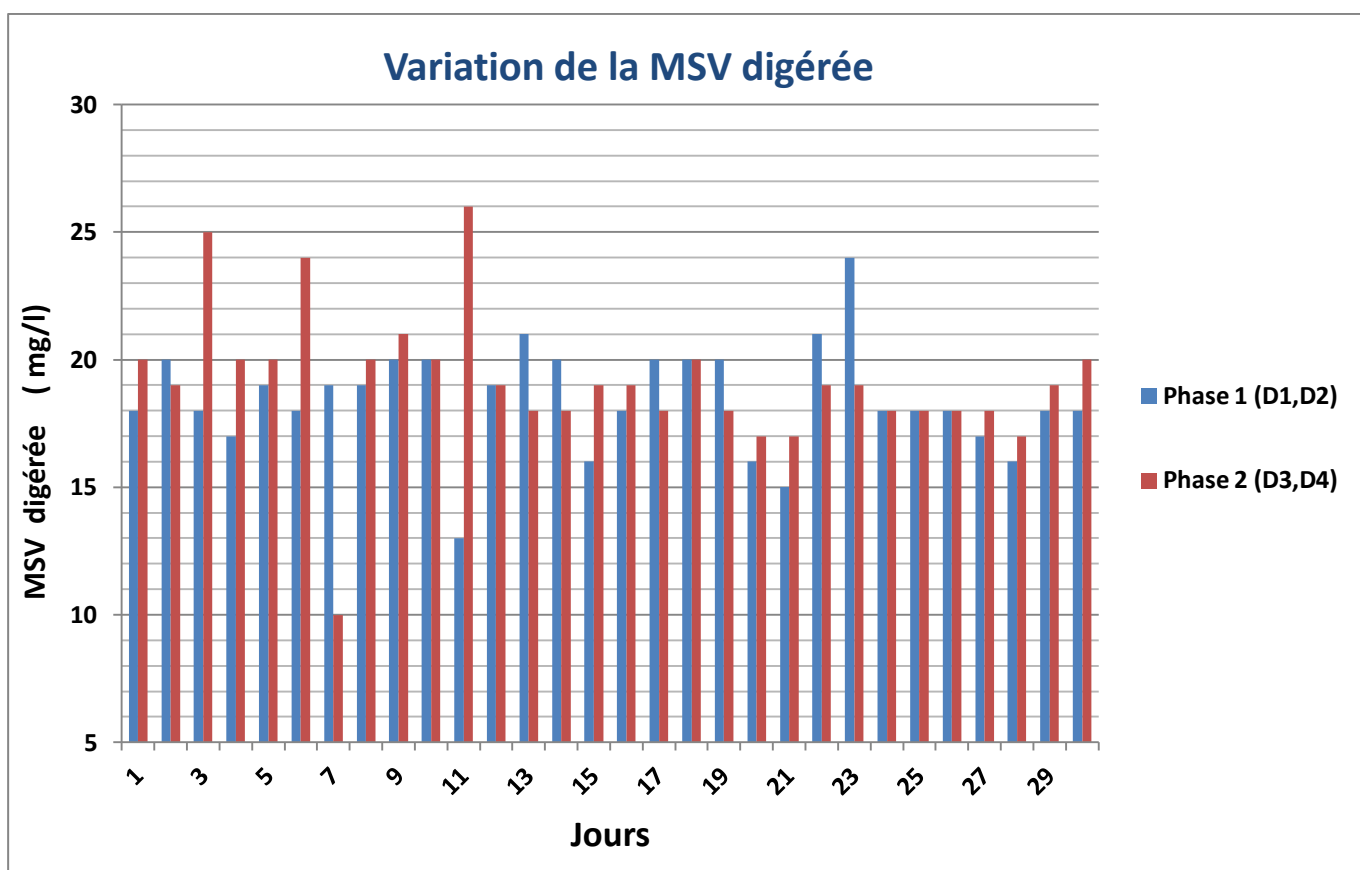
***Fig.9 : Variation de la concentration de la matière organique au cours de l'alimentation du digesteur***



A l'entrée de chaque digesteur parmi les paramètres d'alimentation nécessaires à observer c'est la matière sèche volatile qui représente la concentration en boue et plus précisément la partie organique de cette boue.

On remarque au niveau de la phase 1 des concentrations qui varient de 20 mg/l à 35mg/l, et au niveau de la phase 2 les concentrations enregistrées est de 10 à 39 mg/l. Donc la plupart des valeurs des concentrations sont inclut dans un intervalle qui dépasse souvent la valeur favorable permettant la bonne digestion (presque 25mg/l) et qui peut être expliqué par une surcharge importante de la matière organique enregistrés pendant le mois d'Avril.

**b- La MSV à la sortie du digesteur :**



*Fig.10 : Variation de la concentration de la boue digérée à la sortie du digesteur en mois d'Avril 2012.*

A la sortie de l'ouvrage la concentration de la boue digérée résultante a diminuée par rapport à celle de l'alimentation mais avec une proportion de réduction assez faible dans un intervalle de 10 à 26 mg/l, et qui peut être expliquée par : l'entrée d'une surcharge organique sévère, un mauvais brassage de la boue mixte conduit à un faible contact entre la boue et les bactéries ce qui induit à une mauvaise dégradation de la matière organique. Le résultat un dysfonctionnement du digesteur et une faible qualité de la boue.

## **2- La DCO :**

<b>DCO mg/l d'O<sub>2</sub></b>	<b>Entrée</b>	<b>Sortie</b>
<b>Boue mixte</b>	1150	945

**Tableau.1 : Valeurs moyenne de DCO en mois d'Avril à l'entrée et sortie du digesteur**

La mesure de la DCO d'entrée et de sortie permet de calculer la quantité de matière organique consommée par le digesteur.

La teneur moyenne de la DCO à la sortie des digesteurs est relativement importante en comparaison aux normes marocaines du rejet direct de la boue (500mg/l d'O<sub>2</sub>), suite à un procédé anaérobie très chargées avec une valeur de DCO à l'entrée de 1150mg/l d'O<sub>2</sub> ce qui entraine toute un danger dans le rejet directe de la boue dans le milieu naturel.

Cette évolution de la DCO en mois d'Avril, correspond à l'augmentation de la charge organique qui conduit à l'accumulation des acides gras volatils ce qui permet la diminution de la performance d'élimination des matières organiques dans le digesteur.

### 3- La température :

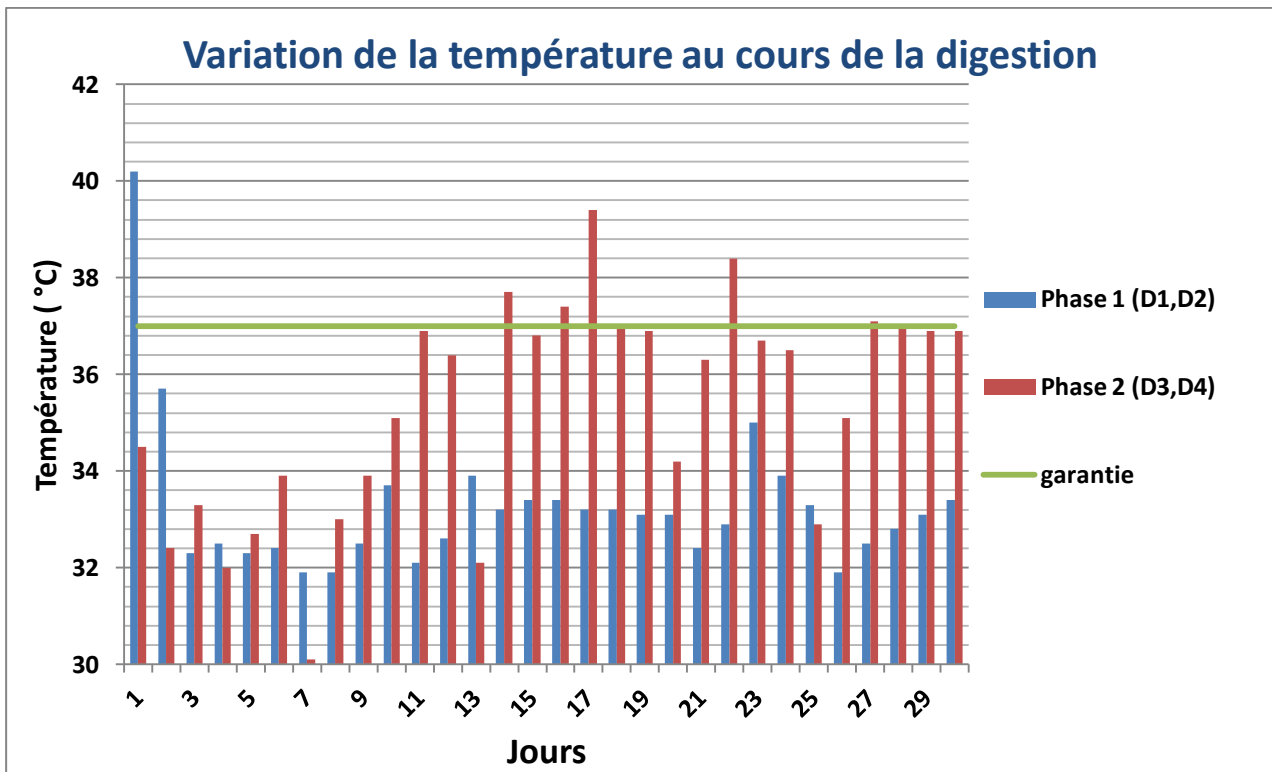


Fig.11 : Variation de la température d'Avril 2012 au cours de la digestion anaérobie des deux phases

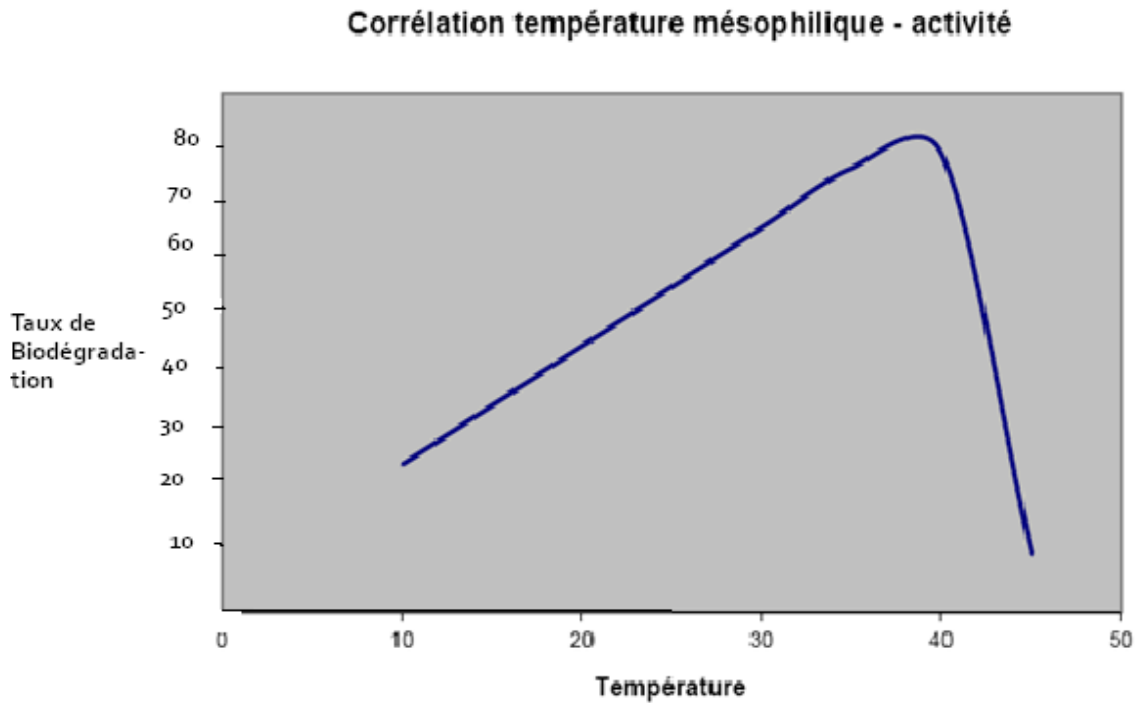
La figure (11) montre des différences dans la variation de la température au niveau des deux phases dans le mois d'Avril 2012, qui est marqué essentiellement par une montée importante avec un maximum de 40,2 °C dans la première phase (D1, D2) , qui dépasse la valeur optimale (37°C), et un minimum de 30,1 °C enregistré dans la deuxième phase (D3,D4).

Les gradients de température en Avril sont dues à des problèmes au niveau du réchauffage, un arrêt de l'installation et à un mixage insuffisant de la boue.

#### 3-1. Relation température-biodégradation de la boue:

L'activité des bactéries accroît graduellement avec la température. Le taux d'activité maximal se situe entre 30 °C et 40°C. Lorsque la température s'élève au dessus de cette valeur maximale de 40°C, la dégradation biologique est presque totalement stoppée. Une courbe température mésophile – activité de biodégradation est présentée dans Figure 12. Ce graphique montre clairement qu'une température trop haute ou trop basse a un impact très négatif sur l'efficacité de la digestion anaérobie ainsi la qualité de la boue résultante.

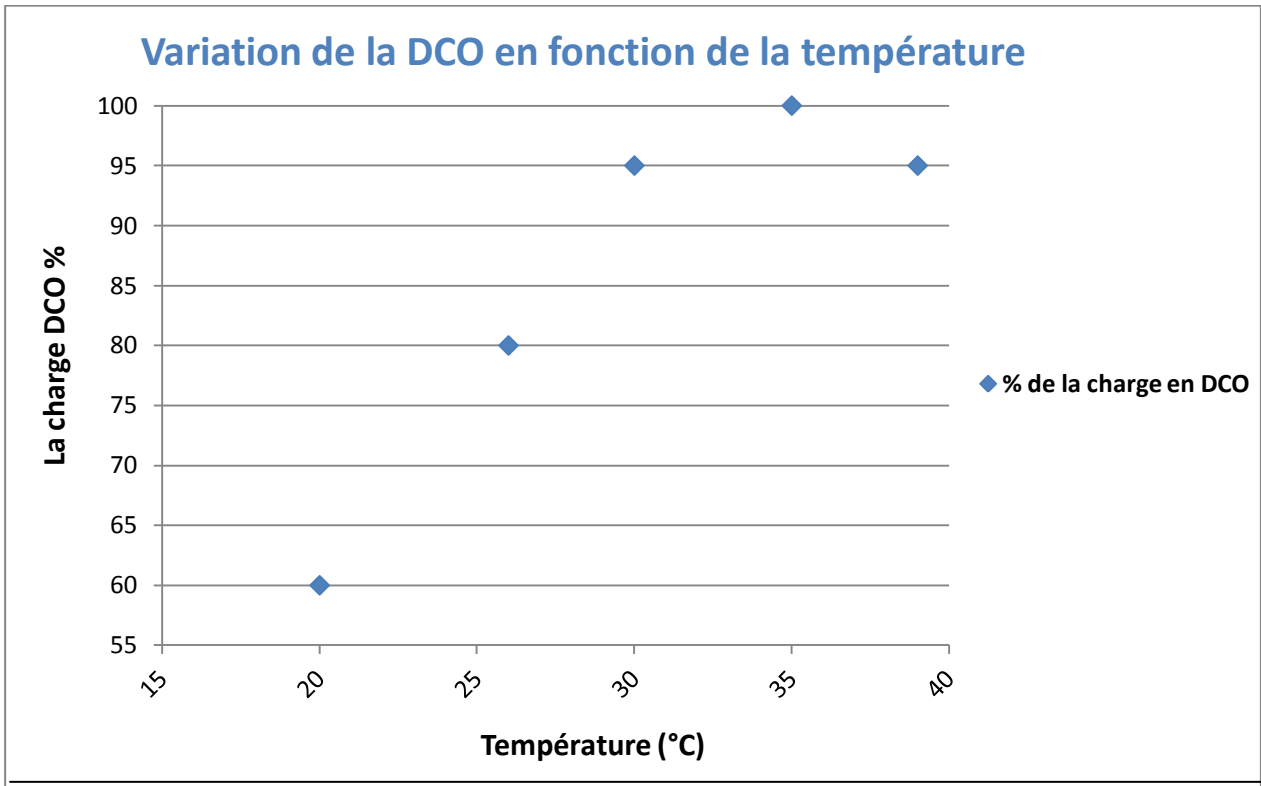
A ces hautes (> 40 °C) ou basses (<25 °C) températures, le taux de biodégradation des bactéries est trop bas pour suffisamment supprimer la matière organique polluante. À une température de moins de 15°C, les bactéries méthanogènes deviennent inactives.



*Fig.12: Variation du taux de biodégradation en fonction de la température (WATERLEAU)*

On remarque donc que plus la température est élevée, plus le processus de biodégradation est rapide (plus 10°C = vitesse de réaction x 2).

### 3-2. Relation température-charge en DCO :



*Fig.13: Variation de la charge DCO en fonction de la température (WATERLEAU)*

On remarque que lorsque la température augmente on aura une augmentation du pourcentage de la charge en DCO. Suite à une inhibition des bactéries et par conséquent une augmentation de la quantité de la matière organique traitée par le digesteur, et c'est le cas du mois d'Avril surtout au niveau de la première phase (D1, D2).

#### 4- Le pH :

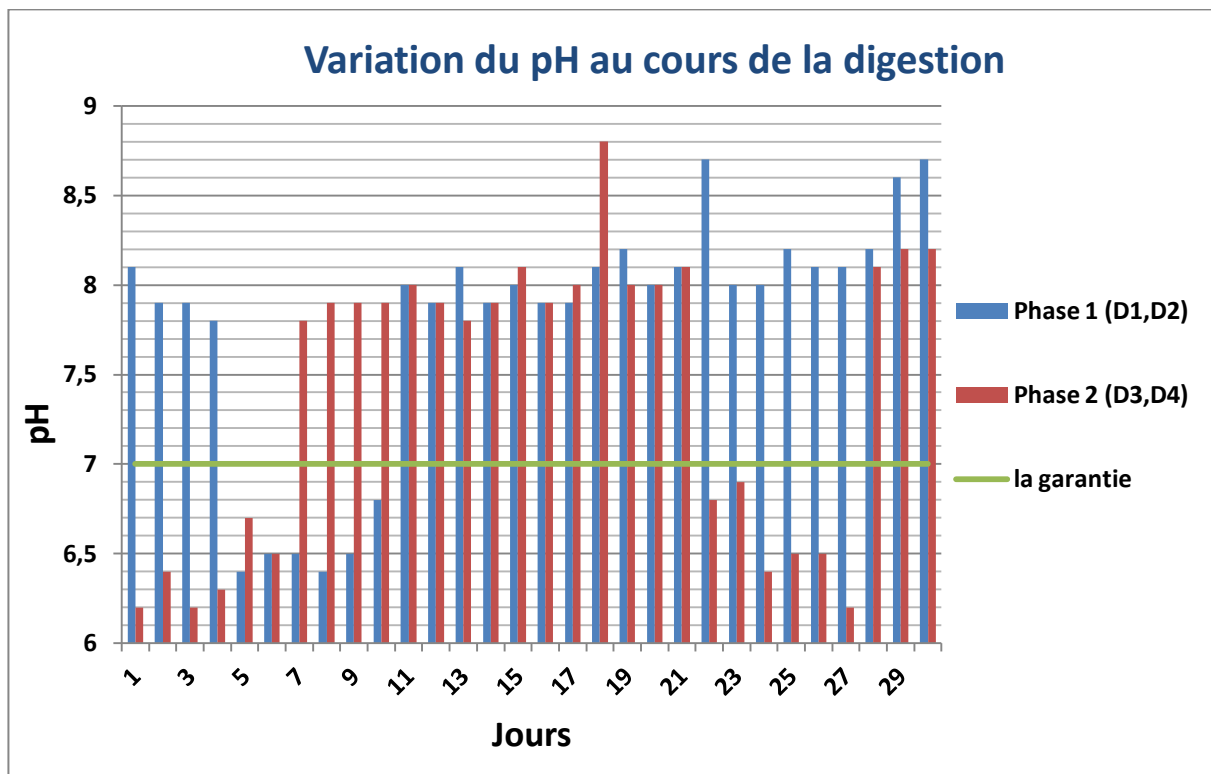


Fig.14 : variation du pH au cours de la digestion pour les deux phases

A partir de la figure 14, on remarque que chaque phase représente une variation du pH très importante, dont la valeur maximale est de 8,8 et la valeur minimale de 6,2.

Le mois d'Avril marqué par des valeurs de pH supérieures pour les jours (1-13-15-21-22-30), induites notamment par l'accumulation d'ammoniac et entraîne aussi une inhibition microbienne à l'intérieur du digesteur.

La figure suivante montre l'impact de la diminution du pH et d'augmenter le temps nécessaire au digesteur pour récupérer son activité (figure15).

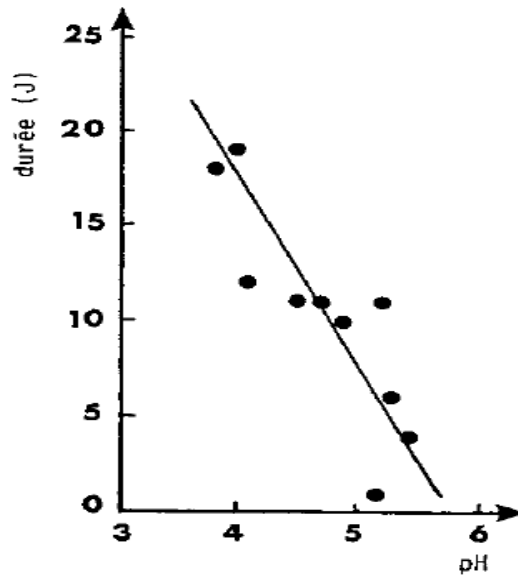


Fig.15: Influence d'une baisse du pH sur le temps nécessaire au digesteur pour récupérer 50% de son activité (CLARK et SPEECE ,1970)

### 5- Les AGV (Acides Gras Volatils) :

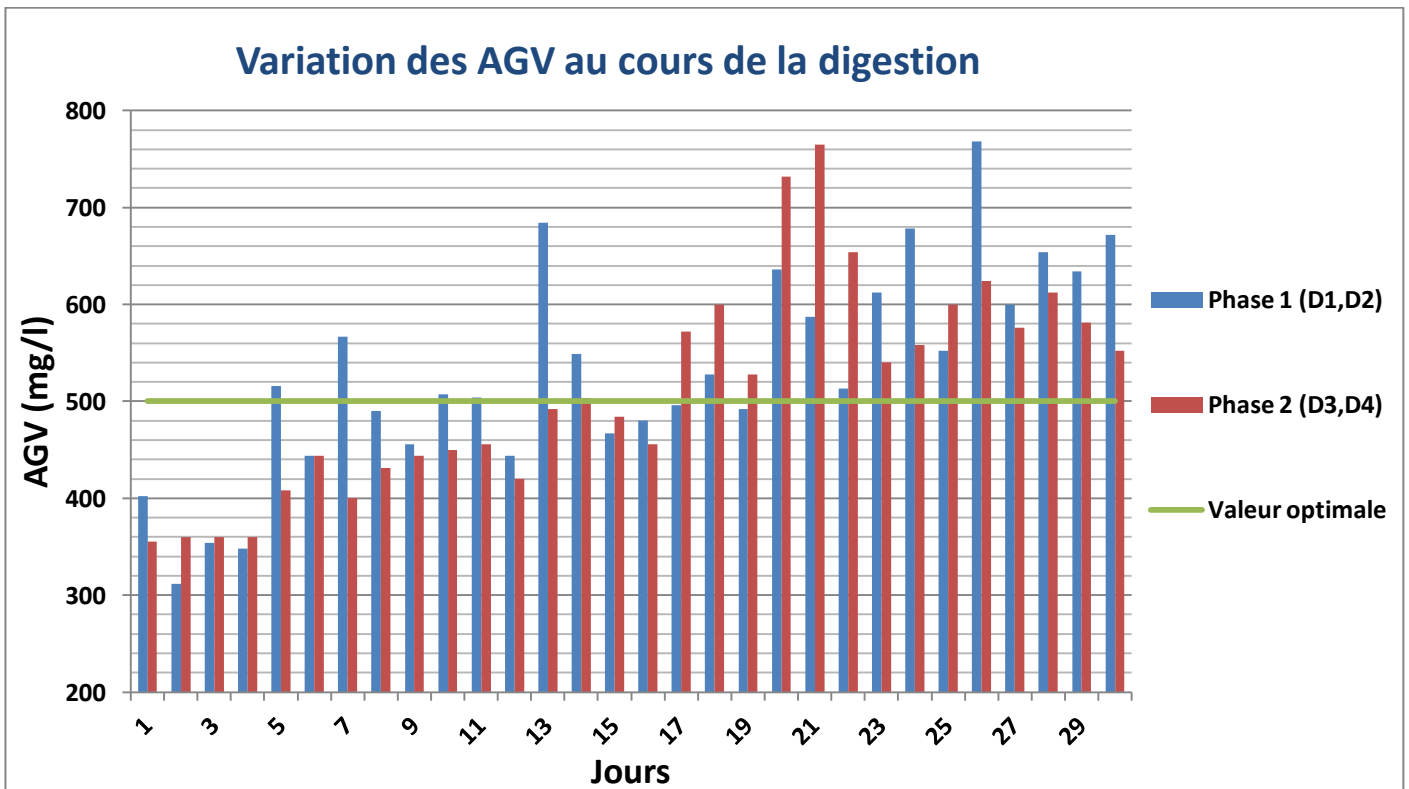
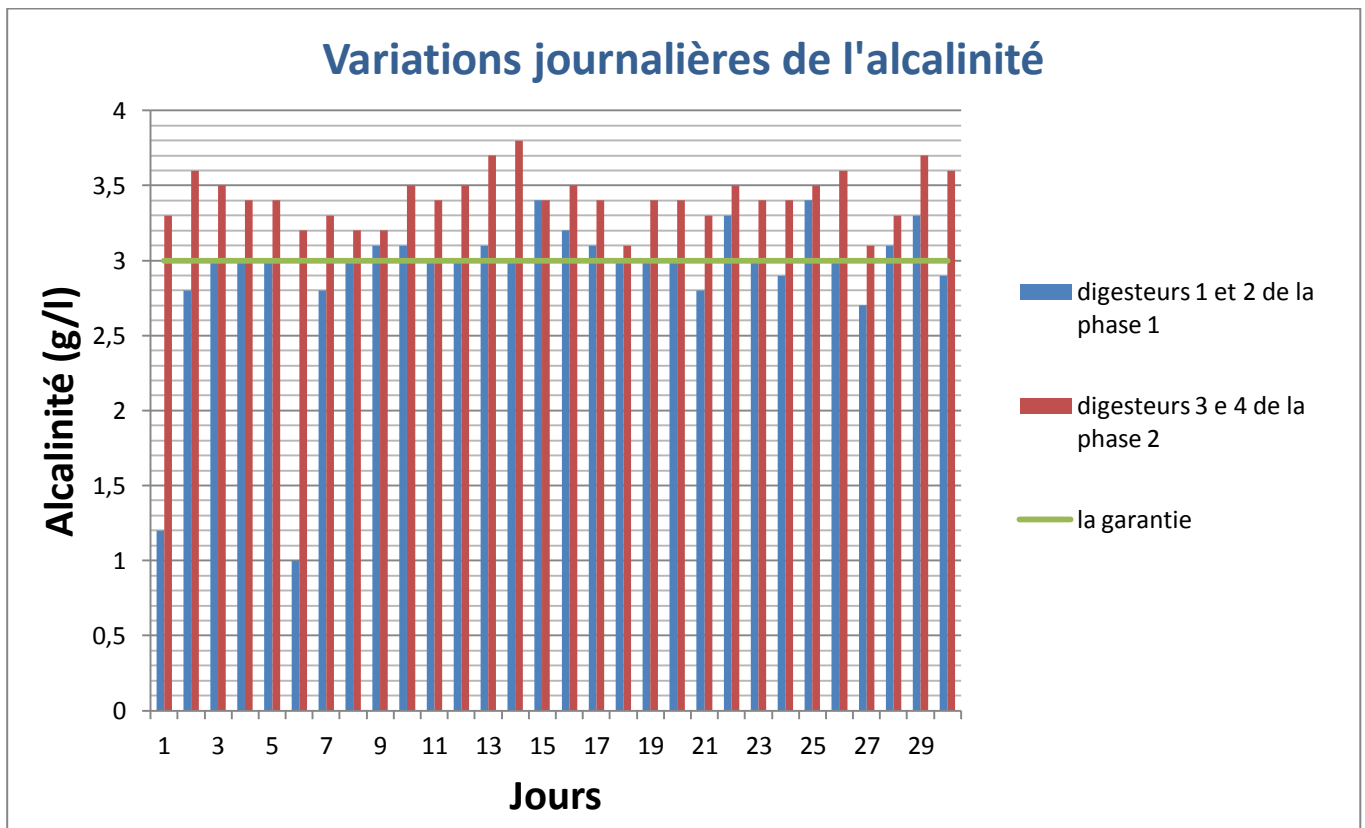


Fig.16: Variation des AGV au cours de la digestion des deux phases

Sur ce graphique les AGV arrivent à une concentration maximale de 765 mg/l enregistré au niveau de la deuxième phase et une concentration minimale de 312 mg/l dans la première phase, la plupart des jours observés en Avril représentent une accumulation d'acides gras volatils lors d'une surcharge organique du digesteur, et qui résulte une inhibition du processus de méthanisation.

## 6- L'alcalinité :



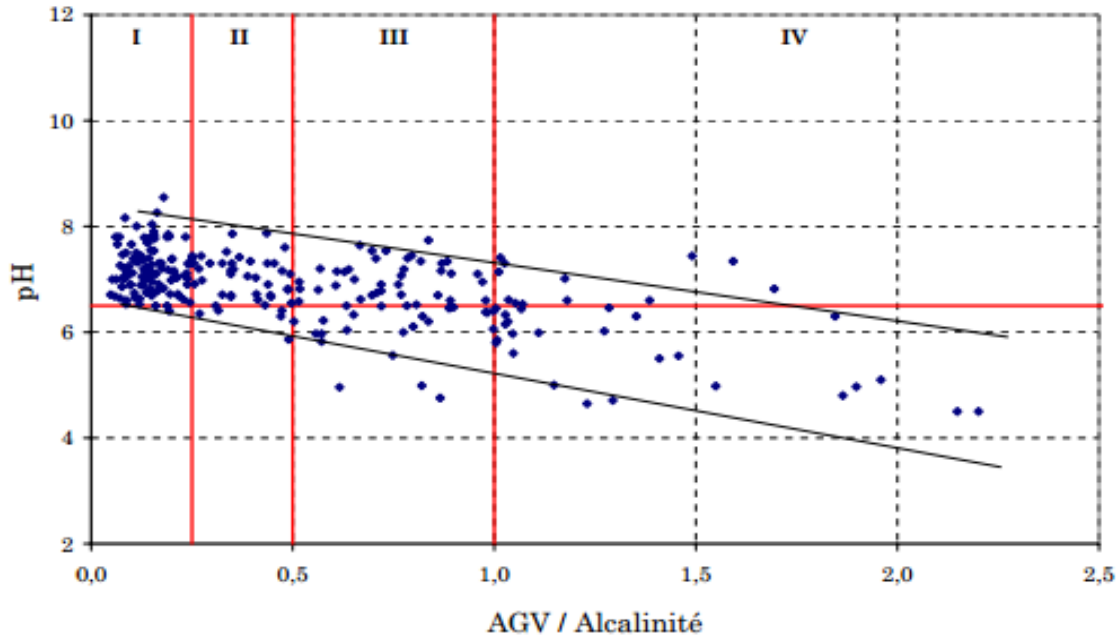
*Fig.17 : Variation de l'alcalinité du mois d'Avril pour les deux phases*

On remarque au niveau des deux phases de la digestion que la plus parts des valeurs d'alcalinité sont inférieurs à la norme (3 g/l) un maximum de 3,8 est enregistré dans la phase 2 (D3,D4) et un minimum de 1 g/l dans la phase 1 (D1,D2) .



→ **Le rapport AGV/Alcalinité et le pH :**

Le rapport AGV/Alcalinité a été suivi et finalement identifié comme le paramètre ayant la relation la plus claire avec le pH du système, comme il est possible de le voir dans la figure 17.



***Fig.18 : Variation de l'AGV/Alcalinité en fonction du pH,(Strohwald,1993)***

Sur ce graphique, il est possible de voir une tendance claire de diminution du pH en fonction du rapport AGV/Alcalinité du système. La ligne horizontale présente la limite optimale de pH (6,5-7), au-delà de laquelle la phase de méthanogénèse peut être inhibée.

Les zones II et III correspondent à des points avec des rapports AGV/Alcalinité compris respectivement entre 0,25 et 0,5, et entre 0,5 et 1,0. Dans ces zones les valeurs de pH sont surtout au-dessus de la valeur minimale de pH imposée pour garantir un bon fonctionnement de la digestion anaérobie. La possibilité d'avoir des conditions non favorables pour le développement du procédé est donc plus élevée dans ces zones, que dans la zone I.

Finalement dans la zone IV, où le rapport AGV/Alcalinité est supérieur à 1,0, la plupart des valeurs de pH sont bien inférieures aux valeurs optimales du procédé anaérobie.

## II- Discussion des résultats :

Si l'on s'intéresse aux spécificités du mois d'Avril, il a connu des défiances dans les étapes de traitement de boue, suite à des surcharges argileuses dues à des pluies, mais aussi suite à des événements exceptionnels au cours du déroulement du procédé de la digestion anaérobie.

Les résultats montrent que les instabilités du procédé sont principalement dues à :

- L'introduction élevée de la matière organique par rapport aux capacités réactionnelles du digesteur ou un brassage insuffisant de la boue et les microorganismes, induit à des concentrations élevées de la MSV (avec un maximum de 39mg/l), elle permet de savoir l'efficacité du système. Pour le mois d'Avril les concentrations varient entre 10mg/l et 26mg/l donc une faible diminution pour un temps de séjour des boues élevés de 20 jours. Ce résultat a été expliqué par la surcharge du digesteur en termes de matière organique qui conduit à un stress mécanique et par conséquent à des arrêts brutaux de l'installation. Ainsi que des variations de concentration en DCO dans l'effluent à traiter (1150 mg/l). La mesure de la DCO à la sortie du digesteur nous donne une idée sur le degré de l'élimination de la matière organique et dont la concentration enregistrée est de 945 mg/l, avec cette concentration assez élevée on peut conclure que le taux de biodégradation est faible et le rejet de la boue dans le milieu naturel représente plusieurs risques de toxicité...

Par ailleurs, le rapport des boues primaires (BP) par rapport aux boues secondaires (BS) est plus faible que la valeur nominale.

Boue mixte actuelle : 41g/l BP, 31,5 g/l BS

Boue mixte, valeurs nominales : 70g/l BP, 45 g/l BS

Les raisons les plus principales pour la différence des valeurs nominales pour la composition de boue mixte à digérer sont : La faible concentration des boues primaires épaissies (41 g/L au lieu de 70 g/L), suite à une surcharge des 2 épaisseurs existants, le manque de capacité de traitement des FAB de la Phase 1 et le taux de capture réduit pour des raisons d'arrêts trop nombreux et des défaillances techniques. Ceci induit un retour non-négligeable de boue digérée par le filtrat des FAB de la Phase 1 et le trop-plein du stockeur de boue Phase 1 vers le traitement primaire et par conséquent un taux d'épaississement limité donc on aura toute une perturbation des autres phases de traitement de la boue.

- Des changements brutaux des caractéristiques physico-chimiques de l'effluent à traiter caractérisent le mois d'Avril, tels que la température qui varient de 31,9°C à 40,2 °C, ceci induit à une mauvaise dégradation biologique, donc une forte diminution (50%) de l'élimination de la DCO dans le digesteur.

En ce qui concerne l'évolution du pH elle est marquée par des valeurs non optimales de 6 jusqu'à 8,3, avec des chutes relativement rapides ont été régulièrement observées. Chaque fois que le pH est passé sous la valeur limite de 6,5 on remarque des valeurs de concentration en AGV importantes qui arrivent jusqu'à 768 mg/l dépassant la valeur optimale de 500 mg/l.

A partir des analyses précédentes chaque diminution de pH est associée à une forte concentration en AGV dans le digesteur. Ce comportement est tout à fait prévisible, car une accumulation des AGV peut conduire à une chute significative du pH si la capacité tampon n'est pas suffisante. Cette augmentation des AGV et la diminution de pH peuvent produire une inhibition de l'activité des microorganismes méthanogènes.

Le paramètre d'alcalinité permette de vérifier l'état biologique du système, généralement, on considère qu'il faut une alcalinité en bicarbonate de 20 à 60 mg/l (1000 à 3000 mg/l exprimée en CaCO<sub>3</sub>) ; en dessous de ces valeurs, une action corrective doit être engagée.

### III- Interprétation des moyennes des mois Janvier, Février, Mars, Avril, Mai et Juin : (voir annexes)

#### 1- Les concentrations à l'intérieur du digesteur:

Les propriétés des boues digérées dépendent directement de la concentration en boue : plus la concentration en boue est importante, plus le potentiel de dégradation est élevé. Il est aussi très important que la concentration des boues soit homogène si l'on veut obtenir un effluent de qualité.

La concentration en boue est représentée par la matière sèche (MS). Ce paramètre est le plus imprécis pour observer un traitement anaérobie des boues en excès.

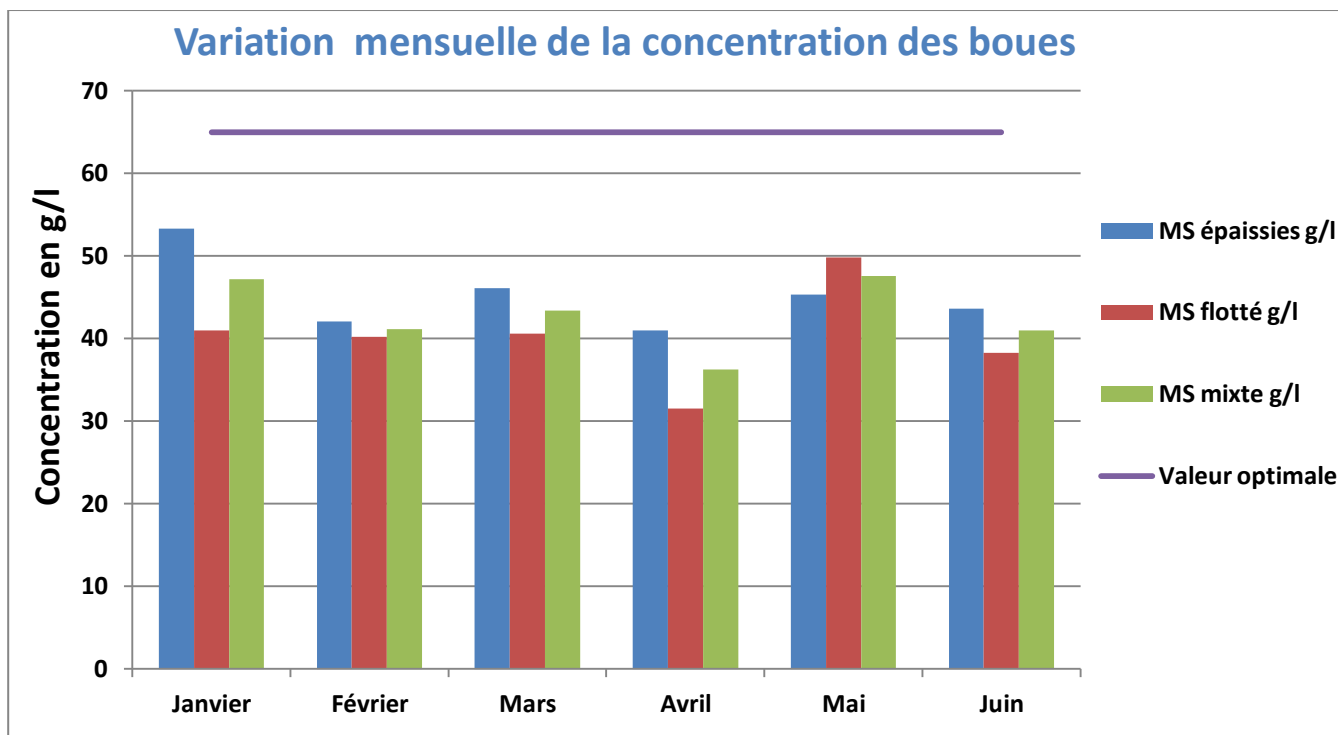


Fig.19 : Variations mensuelles de la MS des boues mixtes

→ On remarque que la concentration de la boue mixte varie entre un minimum de 36,25 et un maximum de 45,55 g/l respectivement pour les mois Avril et Mai sachant que la concentration favorable pour la digestion doit être de 65 g/l (valeur nominale).

Les variations mensuelles représentent une faible concentration des boues mixtes qui peut être expliquée par le mauvais brassage des deux boues (boue flottée-boue épaissie), l'entrée d'une surcharge ou par des pertes accidentelles de boue représentée suite à une panne de la recirculation.

On remarque d'après ce graphe durant les six mois la boue épaissie (primaire) est moins concentrés (<70mg/l) donc la boue sera plus légère ce qui va empêcher le bon brassage de la boue épaissie et flottée et par conséquent la formation d'une croûte à la surface du digesteur.

## 2- Les concentrations en DCO :

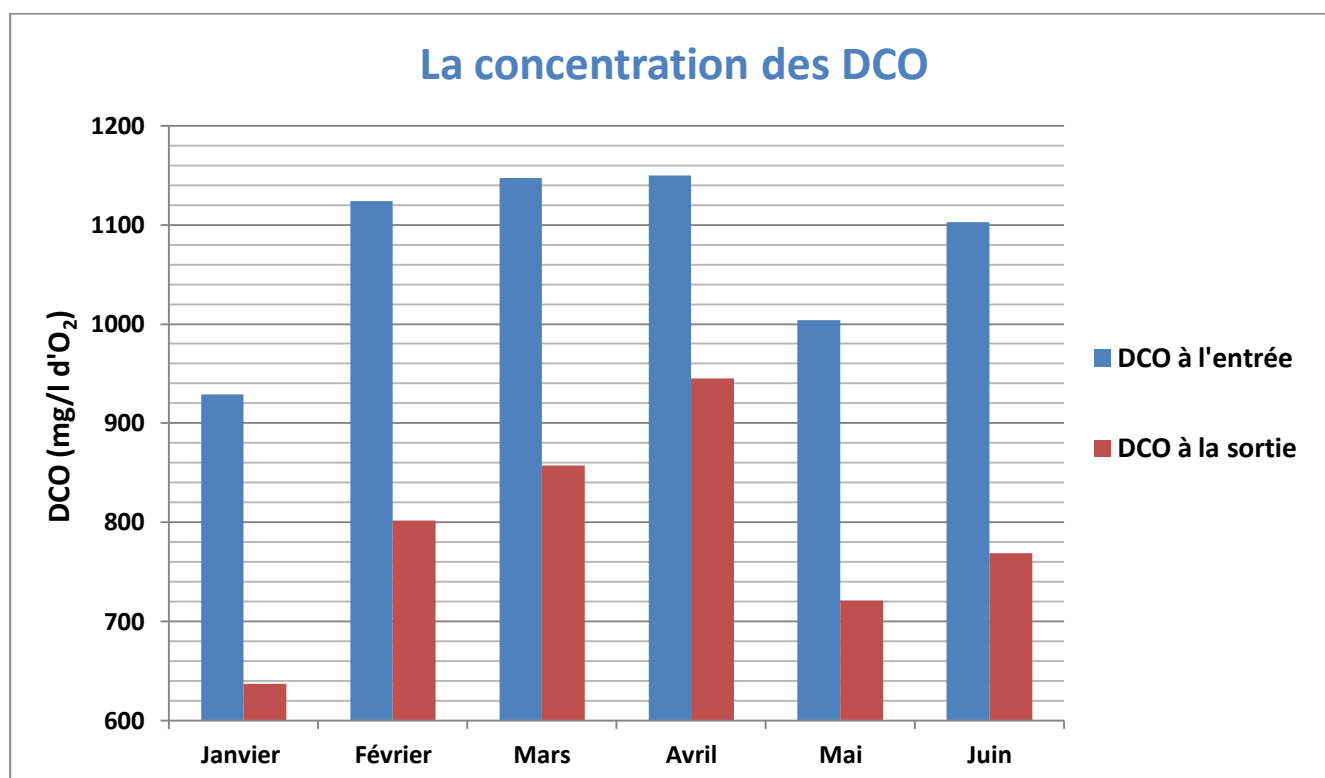
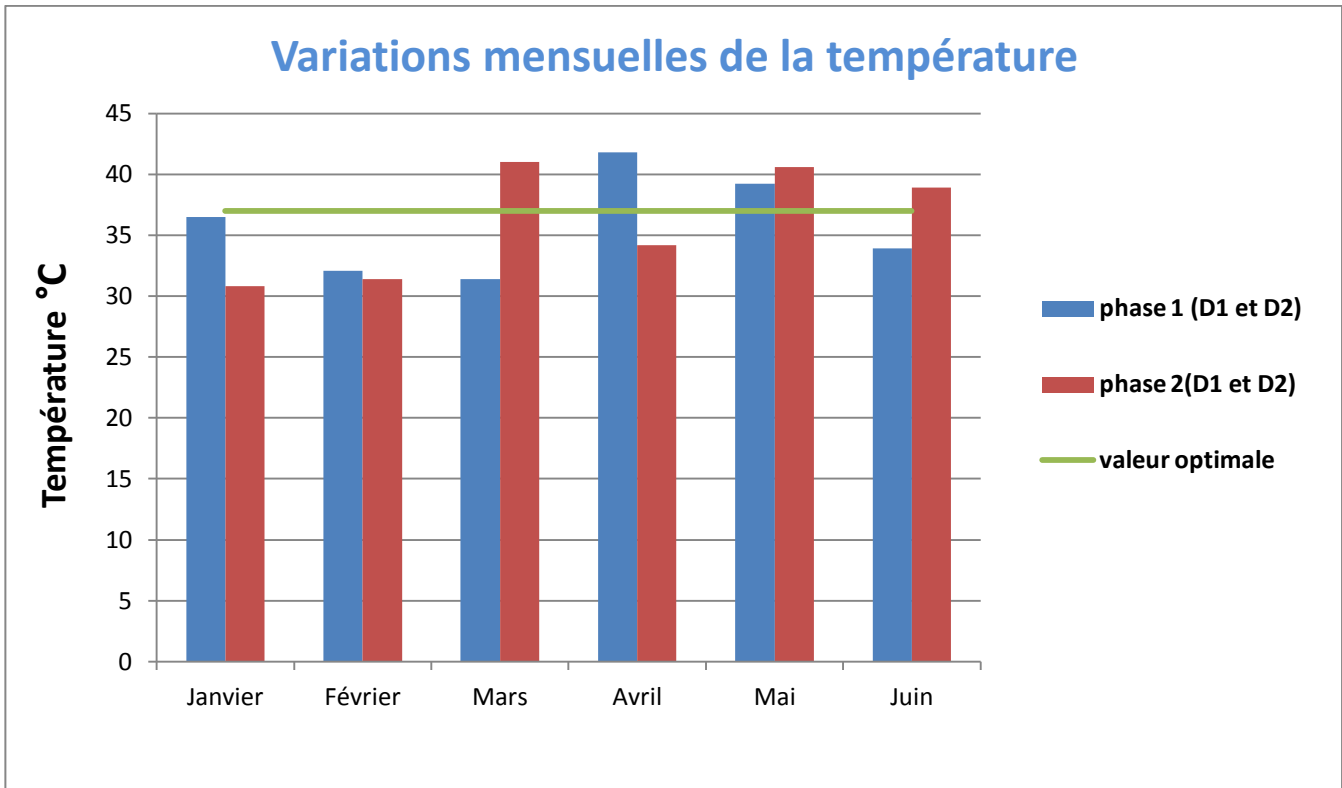


Fig.20 : Variation des concentrations en DCO à l'entrée et sortie des digesteurs

La mesure de la DCO d'entrée et de sortie permet de calculer la quantité de matière organique consommée par le digesteur.

On remarque que les moyennes des concentrations en DCO à l'entrée arrive jusqu'à 1150 mg/l d'O<sub>2</sub> pour le mois d'Avril et à 929 mg/l d'O<sub>2</sub> en Janvier, à la sortie on aura un maximum de concentrations de 945 mg/l d'O<sub>2</sub> et un minimum de 637, donc la variation des valeurs de DCO est marquée par une faible élimination de la matière organique ce qui résulte une boue digérée riche en terme de matière organique biodégradable qui ne permet pas son rejet dans le milieu naturel.

### 3- La température :

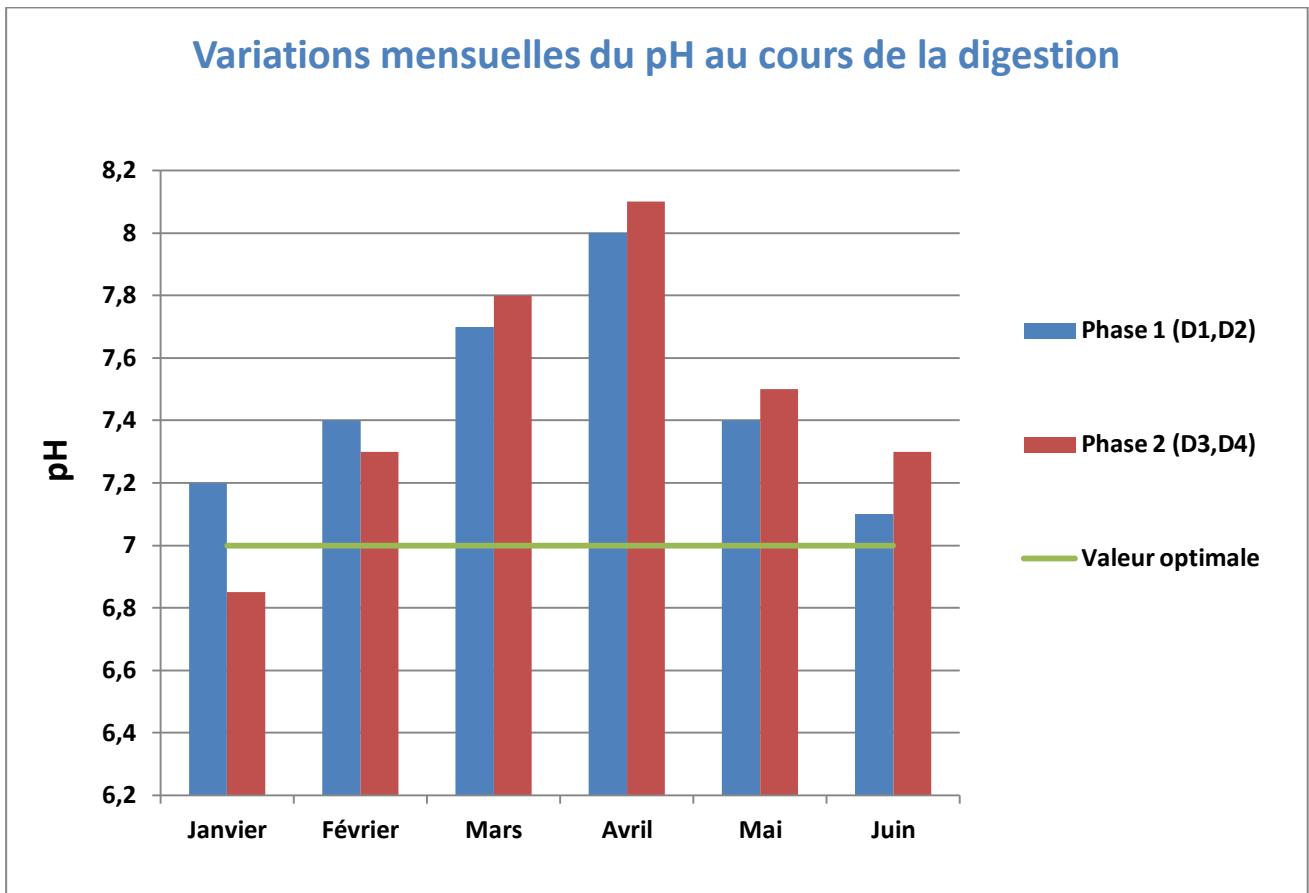


*Fig.21: Variations mensuelles de la température des digesteurs*

→ La température est un paramètre décisif dans la digestion des boues ; les études de température faites au niveau de ces digesteurs montrent qu'on a des variations considérables qui passent de 31,2°C comme valeur minimale, jusqu'à 41,8 °C comme valeur maximale, cette élévation de température va gêner le processus de biodégradation de la boue par les bactéries vu que la valeur optimale est de 37°C.

→ En effet, une montée de la température ou une chute brusque sont signes d'un mauvais fonctionnement du digesteur.

### 3 -pH :



*Fig.22 : Variations mensuelles du pH des digesteurs*

→ Le maximum du pH est enregistré est de 8,1 au niveau des deux digesteurs de la phase 2 pour le mois d'Avril qui était expliqué précédemment dans les analyses de ce mois (figure 13), tandis que la valeur minimum est de 6,8 au niveau du 2<sup>ème</sup> digesteur de la phase 2 pour le mois de Janvier. Le taux élevé du pH est due à une dégradation complète des composés acides (comme acides gras), ainsi à la présence d'azote organique dans l'influent. Beaucoup de  $\text{NH}_3$  (ammoniac) est relâché pendant la première étape de biodégradation. Cet ammoniac a des propriétés basiques : possibilité d'assimiler les protons ( $\text{H}^+$ ) et formation de  $\text{NH}_4^+$  (ammonium).

Pour les mois marqués par une moyenne faible du pH due à une accumulation des AGV donc les matières organiques sont partiellement dégradées en AGV donc la possibilité d'avoir une toxicité est très grande au niveau du digesteur.

#### 4- Alcalinité (capacité tampon) TAC :

La mesure du titre alcalimétrique complet (TAC) permet de matérialiser le pouvoir tampon du milieu, c'est-à-dire la capacité d'un milieu à accepter des apports acides ou basiques sans modification de son pH. Dans le contexte de la méthanisation, cette stabilité est essentiellement assurée par les ions bicarbonates  $\text{HCO}_3^-$  (en équilibre avec le dioxyde de carbone dissous) et les ions phosphates  $\text{HPO}_3^-$ .

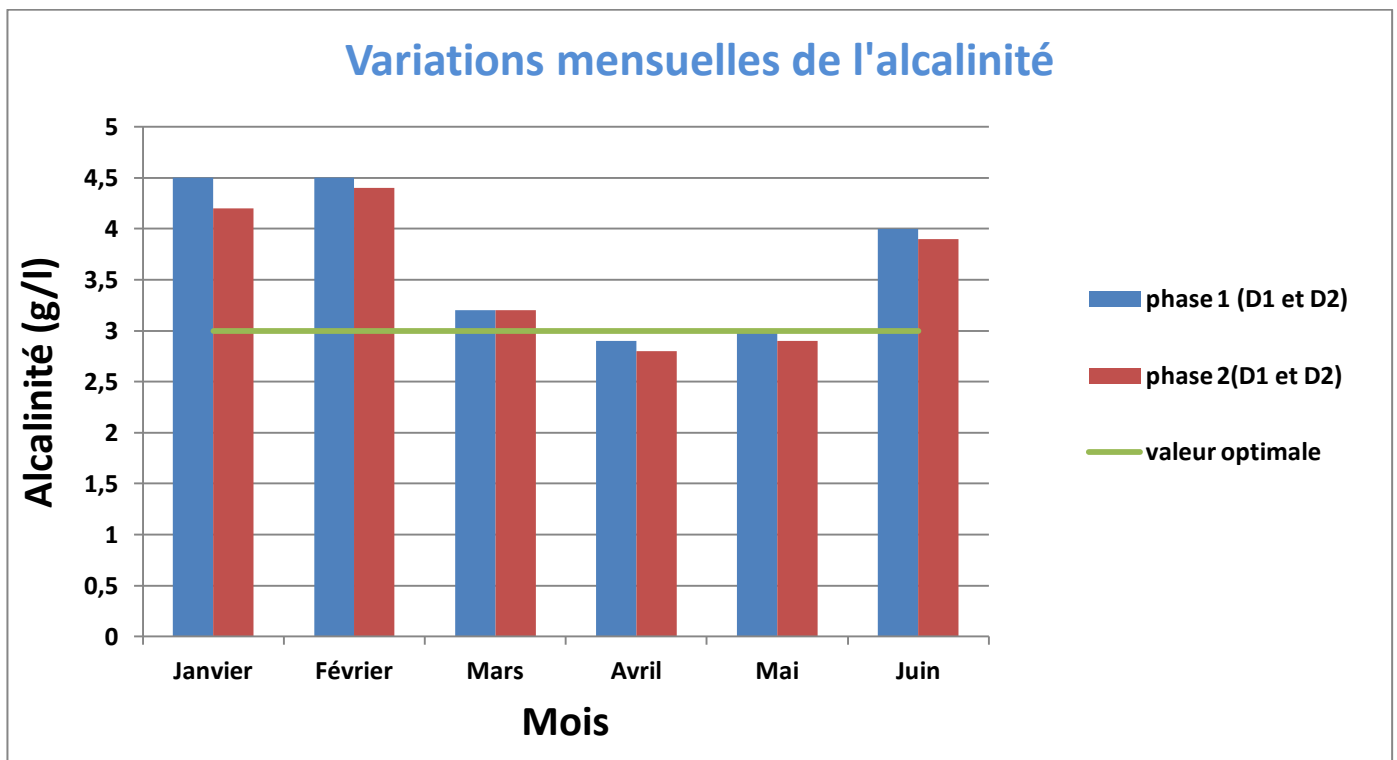


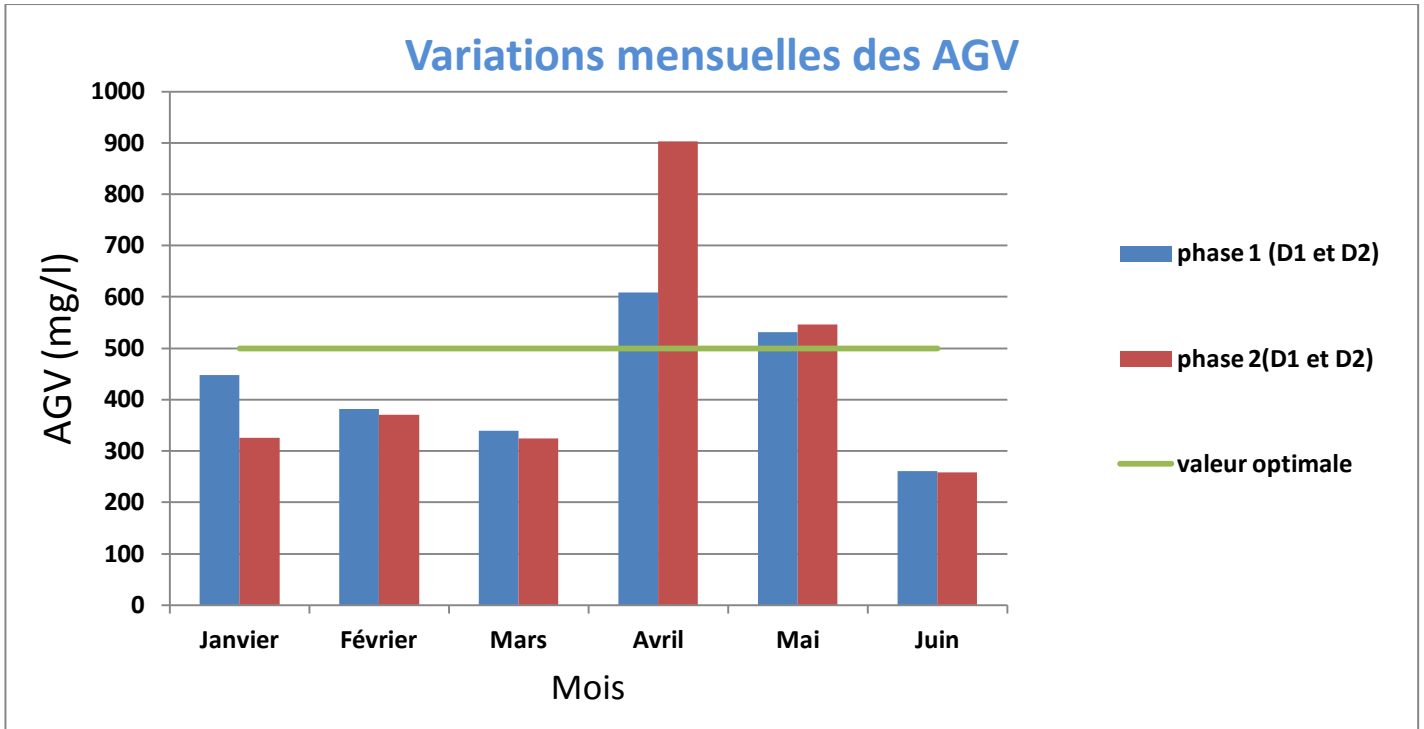
Fig.23 : Variations mensuelles de l'alcalinité des digesteurs

- Au niveau des quatre digesteurs l'alcalinité apparente, elle est enregistrée par une moyenne faible de 2,8 g/l et une moyenne qui dépasse la valeur nominale et qui arrive à 4,5 g/l
- L'augmentation de l'alcalinité peut être expliquée par l'entrée d'une quantité importante de la matière organique et qui contient des protéines ainsi d'autres composés riches en azote (urée), leur dégradation au niveau du digesteur produit de l'ammoniaque par hydrolyse, exemple le mois de Février on remarque une concentration élevée en matière organique (voir figure 20) et par conséquent un taux d'alcalinité élevé.



### 5- AGV (les acides gras volatils) :

Les AGV (en particulier les acétates) sont les produits intermédiaires des étapes de digestions. Ce paramètre permet de détecter une éventuelle surcharge du système.



*Fig.24 : Variations mensuelles des AGV des digesteurs*

→ Les moyennes des concentrations en AGV sont marquées par un maximum de 903mg/l enregistré en Avril qui dépasse la valeur limite (500 mg/l) ainsi un minimum de 254 mg/l enregistré en Juin.

L'augmentation des concentrations en AGV surtout pour Avril et Mai peut être expliquée par l'entrée d'une surcharge organique sévère ce qui conduit à une inhibition de la méthanogénèse et par conséquent à une perturbation au déroulement de la digestion anaérobie.

## 6- Débits du biogaz produit :

Le biogaz est un mélange contenant principalement du méthane (50 à 70%), du dioxyde de carbone (20 à 50%), de l'eau, de l'azote, de l'hydrogène sulfuré (0 à 0,5%) et de l'oxygène, la teneur de ces gaz dépend étroitement du déchet traité et du degré d'avancement de la méthanisation. Du fait d'une forte concentration en méthane, le biogaz est un bon fournisseur d'énergie (1m<sup>3</sup> de biogaz a un pouvoir calorifique de 6 kWh), il est conçu également à la production de chaleur sous forme d'eau chaude ou de vapeur. (Les différentes utilisations du biogaz voir annexe).

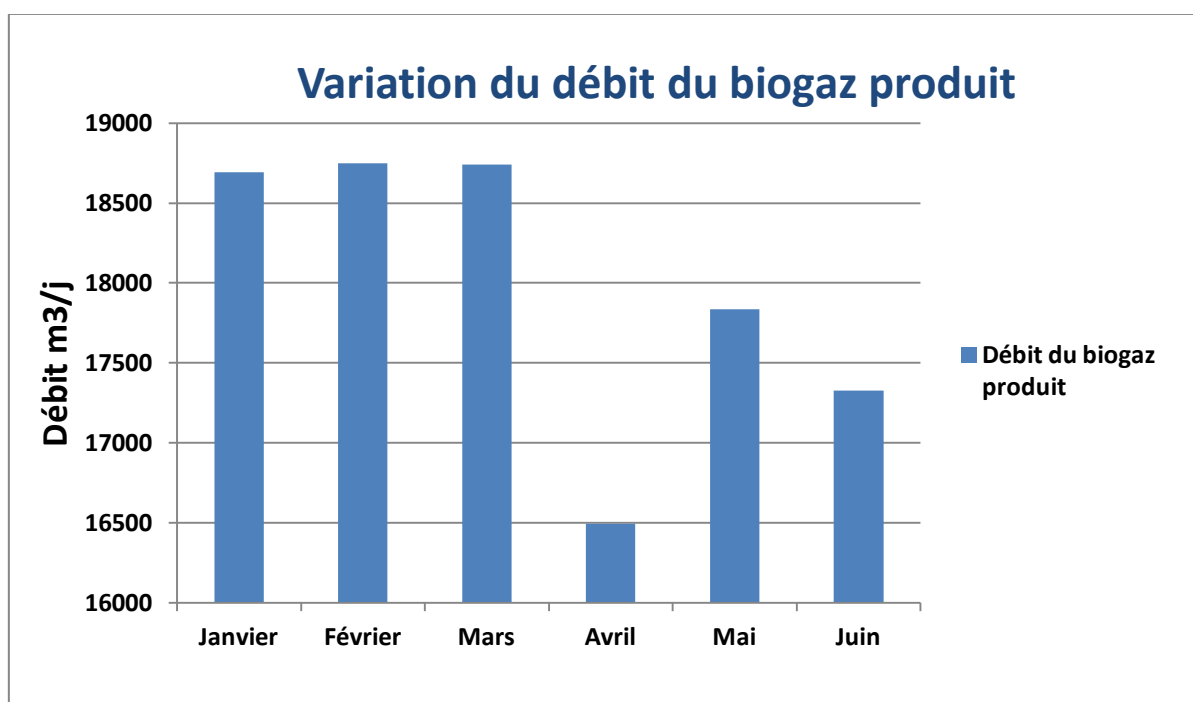


Fig. 25: Variation mensuelle du débit du biogaz produit m<sup>3</sup>/j

- Les mois Février et Mars sont marqués par une augmentation du débit du biogaz produit d'une valeur de 18748 m<sup>3</sup>/j qui traduit un excès en matière organique fermentée.
- Cependant le mois de Juin est marqué par une baisse considérable du débit de production du biogaz, arrivant jusqu'à 14732 m<sup>3</sup>/j, qui peut être expliqué par le pauvre apport de matière organique entrante au niveau du digesteur qui se caractérise par une faible concentration en AGV et par conséquent une augmentation du pH, donc l'évolution du débit du biogaz produit représente un indicateur de fonctionnement du digesteur (PODRUZYNY et VAN DEN BERG, 1984).

*Chapitre IV :*

*Discussion des  
résultats et solutions  
proposées*

## ***I- Les problèmes rencontrés :***

Au cours de tout traitement d'eau, les éléments polluants et leurs produits de transformation retirés de la phase liquide se trouvent rassemblés dans la majorité des cas dans des suspensions plus ou moins concentrées, dénommées « boues ». Il existe différents types de boues, on s'intéresse dans notre étude à la boue mixte.

Le traitement de la boue est devenu un corollaire inévitable du traitement de l'eau, et nécessite des conditions convenables pour sa réalisation.

L'utilisation de la digestion anaérobie comme traitement des boues et outil de dépollution présente de nombreux intérêts, néanmoins certains problèmes majeurs sont rencontrés, et qui sont essentiellement liée à des paramètres à contrôler pour surveiller l'écosystème à l'intérieur du digesteur et leurs plages de valeurs à respecter pour que le processus fonctionne bien et pour limiter l'impact de ces derniers sur l'environnement.

Les paramètres sont de deux types : ceux qui vérifient que les conditions de fonctionnement imposées soient bien réalisées (comme la concentration des boues, la température, la quantité en DCO de l'alimentation et le degré d'homogénéité de la boue...) et ceux qui permettent de contrôler l'état biologique de l'écosystème (le pH, l'alcalinité, la concentration en acides gras volatils...).

Les variations de certains de ces paramètres sont directement couplées à la modification du fonctionnement du digesteur et par conséquent au déroulement du procédé ainsi à la modification de la qualité de la boue digérée et sa stabilité dans le milieu naturel.

Ces variations sont marquées à deux niveaux :

### **Au niveau des concentrations de la boue :**

#### **a- Les concentrations à l'intérieur du digesteur:**

##### **→ La Matière Sèche (MS) :**

Le problème rencontré pour les concentrations des boues mixtes (épaissies et flottées) est marqué essentiellement par des faibles valeurs qui varient entre 36,25 g/l et 45,44 g/l surtout pour les mois d'Avril et Mai sachant que la valeur nominale est de 65 g/l.

La concentration en boue est particulièrement importante puisqu'elle influence le degré d'activité dans le digesteur.

Les propriétés des boues dépendent directement de la concentration en boue : plus la concentration en boue est importante, plus le volume de boue est grand ce qui conduit immédiatement à une chute de l'efficacité du système.

### → **Les quantités de DCO :**

La quantité de la DCO à l'entrée et à la sortie du digesteur permet de comparer le degré de l'élimination de la matière organique et d'autres micropolluants.

- **A l'entrée :**

Les moyennes des quantités en DCO à l'entrée arrivent à un maximal de 1150 mg/l d'O<sub>2</sub> enregistré pour le mois d'Avril.

- **A la sortie :**

En mois d'Avril et à la sortie du digesteur la concentration de la boue mixte digérée est de 945 mg/l d'O<sub>2</sub>.

→ La différence des valeurs moyennes de la DCO à l'entrée et à la sortie du digesteur est montrant une faible élimination de la matière organique, ce qui va permettre une accumulation des AGV et par conséquent la production d'une boue instable qui va augmenter le risque de contamination dans le milieu naturel.

### **b- Les concentrations de la boue :**

Au niveau des concentrations de la boue mixte (MS et quantité en DCO), les variations sont principalement dues à une surcharge entrante exceptionnellement pour les mois d'Avril et Mai, ces derniers sont caractérisés par des événements pluvieux importants ainsi des surcharges argileuses considérables, si cette surcharge organique est sévère, le système peut demander beaucoup de temps avant de retrouver ses performances initiales.

Le problème des concentrations peut être expliqué par un mauvais brassage qui ne permet pas de mélanger la boue épaissie avec la boue flottée ce qui va influencer le contact entre la boue mixte et les microorganismes dans le digesteur. Ces variations des concentrations au sein du digesteur conduisent à la formation d'une croûte à la surface du mélange. Cette croûte, qui apparaît souvent dans les systèmes classiques, ralentit la réaction et oblige d'assurer une maintenance régulière.

Au niveau du digesteur, un mauvais mélange est souvent la cause d'incidents comme la formation de mousse et une hétérogénéité trop importante entre les différents points du digesteur.

### **Au niveau des paramètres physico-chimiques:**

#### **a- La température :**

Les différents groupes bactériens de la digestion anaérobie sont sensibles à la température, car des changements brutaux de température peuvent entraîner un déséquilibre du processus qui pourrait entre autre ralentir une étape par rapport à une autre (les bactéries méthanogènes sont plus sensibles aux baisses de température que les bactéries fermentaires et acidogènes), (Cha. et Noike, 1997 cité par Paing, 2001).

La température optimale se situe autour de 37 °C, concernant les analyses mensuelles des variations de la température, on remarque en Juin une augmentation de 38,2 °C et en Février une baisse de 30,8°C.

Les gradients de température représentent l'un des problèmes rencontrés au niveau du digesteur et qui peut être expliqué par un problème au niveau du réchauffage, un arrêt de l'installation ou à un mal brassage de la boue et par conséquent la température est distribuée de façon hétérogène dans tout les points du digesteur.

Donc l'influence de la température sur la digestion anaérobie est conséquence de plusieurs phénomènes augmentation de la vitesse réactionnelle conformément à la relation d'Arrhenius, diminution du taux de conversion pour des conditions de température hors des températures optimales (37 °C pour mésophile) augmentation du taux de mortalité microbienne. (Batstone, 2002).

#### **b- Le pH :**

L'écosystème microbien au niveau du digesteur et plus précisément les bactéries méthanogènes sont très influencées par les valeurs du pH du milieu. La digestion anaérobie se déroule normalement pour des pH compris entre 6,8 et 7,5 : en dessous ou égale 6,8 l'activité des bactéries méthanogènes diminuent rapidement (Henze *et al.* ,1996), et c'est le cas enregistré en Janvier.

Ces diminutions de pH sont causées surtout par l'accumulation des AGV, ce qui produit l'inhibition du procédé méthanogène (Edeline, 1993).

Le pH a aussi un effet indirect sur la toxicité des métaux surtout pour des valeurs d'un pH trop hautes (comme celle de 8,1 enregistrée en Avril).

### ***c- Les AGV :***

Les concentrations des AGV donnent une idée directe sur l'état de la digestion.

Une faible teneur en AGV est souhaitable pour un bon fonctionnement du digesteur, mais ce n'était pas le cas dans nos analyses pendant les 6 premiers mois de l'année.

Les moyennes des concentrations en AGV sont marquées par un maximum de 903mg/l enregistré en Janvier et qui dépasse la valeur limite tolérée (500 mg/l).

On remarque donc des concentrations très fortes en AGV, qui peuvent produire des inhibitions sur l'activité de la biomasse méthanogène. D'après Arhing *et al.* (1995), les fortes concentrations en AGV sont plus le résultat d'un déséquilibre de la digestion anaérobie causé par une surcharge organique, un changement de température due à un mauvais mixage ainsi à la présence des éléments toxiques indésirables.

La digestion anaérobie offre plusieurs avantages par rapport à la voie plus classique aérobie : capacité à dégrader des effluents complexes et concentrés, faible production de boues, faible coûts de fonctionnement voir production d'énergie.

Mais ce procédé se montre instable, sensible aux variations des conditions opératoires et les paramètres de concentrations, et parfois plusieurs mois sont nécessaire pour ramener le digesteur à un point de fonctionnement normal.

Ce défaut majeur de la digestion anaérobie conduit à l'instabilisation de la boue à la sortie du digesteur, ce qui s'explique par la présence d'éléments toxiques renfermés dans celle-ci.

Le tableau suivant résume les résultats d'analyses des métaux lourds qui concernent deux échantillons de boues déshydratée, c'est-à-dire à la sortie de la station d'épuration de Marrakech en mois d'Avril et Mai :

Les métaux lourds	Echantillon 15/04/2012	Echantillon 15/05/2010	Valeur limite dans les boues (mg/kg)
	Boues déshydratées (mg/kg)	Boues déshydratée (mg/kg)	
Cadmium	1.39	2,12	10
Chrome	2754.12	2016,56	1000
Cuivre	156.48	145,67	1000
Plomb	961.57	889,10	800
Zinc	921.97	826,74	3000

*Tab.2 : Les résultats d'analyses des métaux lourds*

Les analyses des métaux lourds montrent que les teneurs en Cadmium, Zinc et Cuivre dans la boue ne dépassent pas les valeurs nominales considérées comme seuil de tolérance dans les sols. Par contre le chrome et le Plomb dépassent les limites.

Ces valeurs rencontrées ont une influence pas seulement sur le fonctionnement du digesteur, mais aussi sur la qualité de la boue résultante qui sera fortement riche en matière toxique et micropolluants et qui représente par conséquent un impact direct sur l'environnement, ainsi que les nappes phréatiques lors du rejet de la boue dans la décharge qui se trouve à proximité de Oued Tensift.

### ***1- Impact de la qualité de la boue sur l'environnement :***

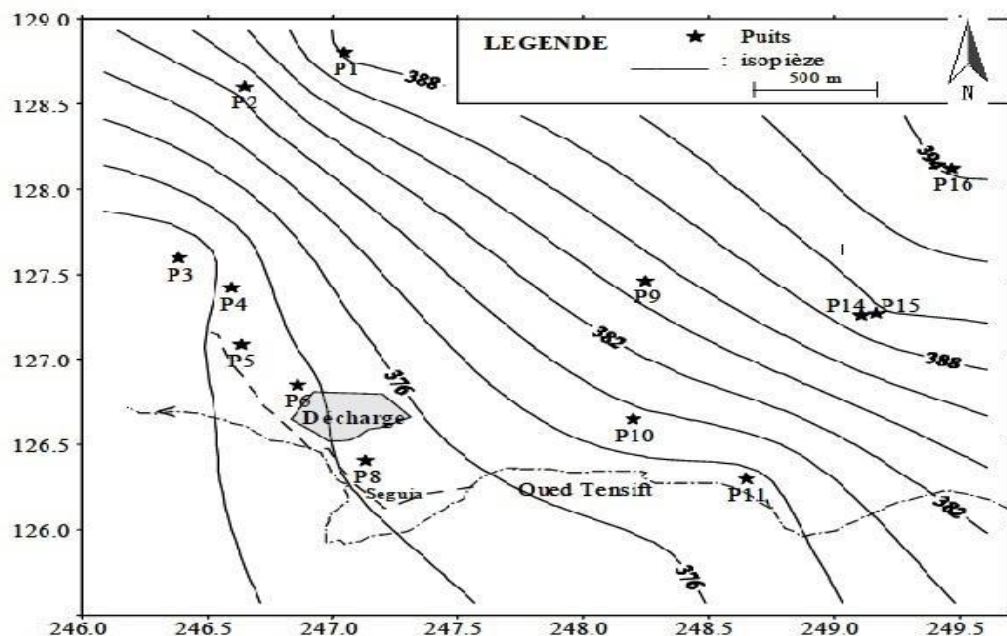
Le fait d'apporter des boues dont la qualité chimique et organique est différente de celle du milieu récepteur, va entraîner des modifications de ce dernier. L'épandage de boues de station d'épuration peut, en effet, modifier les propriétés du sol et par conséquent les nappes phréatiques. Ces modifications peuvent être d'ordre édaphique (par l'apport de matière organique, modification de la structure), microbiologique, ou toxique.

L'élimination de certains micropolluants des eaux traitées conduit à leur accumulation dans les boues d'épuration. Une situation qui soulève des questions quant au devenir de ces micropolluants et composés toxiques et leur impact direct sur l'environnement, ces derniers sont la principale source de contamination des milieux aquatiques, des terrains qui les



entourent et des nappes phréatique dans le cas de terrains perméables à semi perméable par les résidus toxiques.

Si certains micropolluants peuvent être en partie éliminés de la boue grâce aux traitements classiques dans la STEP, d'autres éléments exigent un traitement bien plus spécifique qui n'est pas pris en considération dans cette station (exemple les pesticides , HAP : les Hydrocarbures Aromatique Polycycliques ...), ces formes toxiques ne disparaissent pas et la fraction non biodégradable se concentre dans les boues d'épuration, et qui s'infiltrent par la suite dans les nappes voisines et plus précisément la nappe du Haouz dès leurs rejets dans la nature. Cette nappe libre est caractérisée par des écoulements souterrains qui s'établissent dans les alluvions plio-quadernaires et les formations néogènes.



*Fig. 26: Carte piézométrique de la région du Oued Tensift (d'après Hakkou et al., 2001)*

La recharge de la nappe se fait principalement par infiltration des eaux de crues des oueds atlasiques traversant la plaine ainsi que certains micropolluants qui se trouvent dans la boue rejeté au niveau de la décharge. L'écoulement général se fait du Sud vers le Nord, puis de l'Est vers l'Ouest au Nord de Marrakech selon l'axe de l'Oued Tensift.

Du fait de la faible profondeur de la nappe (entre 0 et 5m le long de l'Oued Tensift), et de la perméabilité moyenne des terrains, la vitesse de propagation et l'intensité de la pollution en

métaux lourds s'avèrent importante, ce qui conduit à une dégradation de la qualité des eaux souterraines pompées pour but d'irrigation et qui sont riches en micropolluants métalliques présentant un danger de contamination de la chaîne alimentaire avec accumulation le long de celle-ci, ayant pour conséquence des effets toxiques, cancérigènes, tératogène et mitogène sur l'Homme.

## ***2- Impact de la boue sur la production du biogaz:***

Le biogaz est obtenu par digestion anaérobie de la matière organique issue des eaux urbaines domestique et industrielle de la ville de Marrakech. La dégradation des substances organiques se déroule en plusieurs étapes sous l'action de populations bactériennes. (*voir annexes*)

Le taux de production du biogaz est un indicateur du bon déroulement des phases de la digestion.

→ Dans le cas d'un débit très élevé en biogaz on parle d'une surcharge en matière organique qui pourra également induire à une fuite de gaz essentiellement le CH<sub>4</sub> dans l'air se qui contribuera au phénomène de l'effet de serre.

→ Au cas où on obtient un débit insuffisant en biogaz on pourra directement déduire que le problème rencontré s'enregistre au niveau de la méthanisation qui est une phase importante de la digestion.

## ***II- Les Solutions adoptées :***

### ***A / Vérification des conditions imposées pour le fonctionnement :***

Lorsqu'un procédé à été choisi, et des conditions de fonctionnement établies, il est nécessaire de contrôler assez souvent les valeurs des différents paramètres pour s'assurer qu'ils restent dans une gamme de valeurs acceptables afin de ne pas modifier les réponses de l'écosystème microbien.

Leurs natures et leurs fréquences dépendent de la technique utilisée, de l'effluent traité et de l'expérience acquise sur le procédé. Les différents paramètres contrôlés sont généralement :

- Le pH, le débit, la concentration chimique en oxygène (DCO) et la teneur en matière en suspension (MES) de l'effluent d'alimentation.

- La température, le niveau, les débits de recirculation et l'homogénéité de boue au fond du digesteur.

Souvent, les valeurs de ces paramètres sont surveillées en continu par des capteurs adaptés et couplés à des alarmes.

Afin de s'assurer du bon fonctionnement de l'installation. Lors de ce tour de contrôle, il devra:

- a. Noter ses observations visuelles sur tout ce qui paraît anormal ou particulier (aspect de l'eau, arrêt ou marche des équipements, etc.....).
- b. Prélever tous les paramètres de procédé comme débit, pression, température, etc.

L'importance d'une observation précise et systématique du fonctionnement de l'installation ne peut être sous-estimée, elle est à la base d'une bonne conduite et constitue une aide importante en cas de perturbations.

En effet, il arrive souvent qu'un problème se manifeste brusquement, mais que la cause trouve son origine dans l'évolution d'un paramètre, qui a commencé bien avant.

La fiche des analyses journalières (feuilles de suivi) est utilisée, ainsi que le cahier de suivi journalier dans lequel les variations, actions, observations spéciales sont notées. Naturellement l'ordinateur va donner la plupart des informations concernant le suivi de la station d'épuration, comme le fonctionnement des équipements, les instruments, les débits traités, les graphiques..., mais il faut tout de même noter les informations clés pour arriver à un suivi normal.

Un digesteur peut être soumis à des perturbations (provisoires ou non) qui peuvent être liées à des fluctuations de l'effluent ou à des problèmes sur le procédé.

### ***B/ Les paramètres à contrôler :***

Le tableau suivant résume en générale les paramètres à contrôler et les solutions adaptées par la station dans le cas où des fluctuations sont remarquées :

<i>Les paramètres à contrôler</i>	<i>Les solutions adoptées</i>
<i>La température</i>	Le chauffage des 4 digesteurs se fait par un circuit externe de recirculation : les boues sont pompées depuis le fond du digesteur. Elles passent dans un échangeur « eau chaude / boues », puis retournent vers la bache d'alimentation du digesteur où elles sont mélangées avec les boues fraîches, ce qui permet de réchauffer celles-ci. Les échangeurs thermiques sont en général de type tubulaire, ce qui facilite leur entretien. Ils sont alimentés, à contre-courant, par l'eau chaude provenant d'une chaudière biogaz, ou du circuit de refroidissement d'un moteur biogaz (cogénération).
<i>La demande chimique en oxygène (DCO)</i>	La mesure de la DCOS automatique est réalisable par des chaînes à flux continu (MORFEAU et SARRIS, 1974). Sa détermination peut être effectuée en différents points du digesteur mais on se limite le plus souvent à l'effluent de sortie. Un post-traitement aérobie permet d'abaisser encore sa valeur avant de rejeter l'effluent dans le milieu naturel.
<i>Les acides gras volatils (AGV)</i>	Le dosage individuel des AGV s'effectue par chromatographie en phase gazeuse, ce qui limite sa diffusion. Il est possible d'effectuer une surveillance en continu. Des techniques mesurant l'acidité volatile totale (AVT) permettent parfois de se faire une idée de leur concentration dans le milieu. Il en va de même de la comparaison de l'alcalinité totale et de l'alcalinité due aux bicarbonates déterminées par titrimétrie (ou titrage est une technique de dosage utilisée en chimie analytique afin de déterminer la concentration d'une espèce chimique en solution). De manière générale, on peut contrôler la concentration en AGV comprise entre 20 - 30 meq/l qui indique une surcharge organique comme suit : <ul style="list-style-type: none"> <li>• AGV &gt; 20 meq/l → réduire le débit d'alimentation;</li> <li>• AGV &gt; 30 meq/l → arrêter l'alimentation temporairement.</li> </ul>
<i>Matières en suspension (MES)</i>	Sa détermination permet d'estimer la biomasse bactérienne dans le réacteur, La surveillance des MES résiduelles dans l'effluent en sortie d'un réacteur à cellules fixées permet de détecter un éventuel détachement du biofilm, qui peut être consécutif à une surcharge organique. Alors dans le cas d'une surcharge en matières en suspension, un arrêt d'alimentation serait la bonne solution.

<p><i>Le potentiel hydrogène</i></p>	<p>La digestion anaérobie se déroule de façon optimale au voisinage de la neutralité (pH 7.2). une baisse de pH augmente la teneur en AGV non ionisés donc les phénomènes d'inhibition sur les microorganismes.</p> <p>La vitesse de restauration de l'activité initiale d'un écosystème après une chute importante de pH dépend de la durée du phénomène, mais aussi de la valeur de ce pH. Pour un filtre anaérobie sur acétate, la durée de récupération est inversement proportionnelle au pH appliqué.</p> <p>La régulation du pH est généralement prévue dans la conception des digesteurs. Différents produits sont susceptibles d'être employés. Il est donc nécessaire d'ajouter des produits correcteurs tels que : la chaux, vu son faible cout, est souvent utilisée mais elle entraine aussi une dissolution de CO<sub>2</sub> créant ainsi une dépression dans le digesteur. Les meilleurs choix sont les bicarbonates ou les carbonates de sodium ou potassium. Une addition trop importante des ces produits ne conduit pas à des pH trop élevés.</p> <p>La mesure du pH est une technique simple mais nécessite de nombreux nettoyage car le poreux se colmate rapidement dans ces milieux.</p>
<p><i>Le débit du biogaz</i></p>	<p>Le débit est un paramètre facile à contrôler et sont enregistrement peut être effectué en continue. Ce contrôle au niveau de la phase gazeuse peut dépendre d'un ajustement de pH ou d'un débit hydraulique plus élevé. En laboratoire de nombreuses méthodes sont disponibles pour le doser. La plus utilisé est la chromatographie en phase gazeuse. La détermination en continue de la pression partielle de CO<sub>2</sub> peut se faire en mesurant le pH d'une solution de bicarbonate dans laquelle passe le biogaz (ROZZI et al, 1983) ou par des techniques d'absorption dans l'infrarouge.</p>
<p><i>L'alcalinité</i></p>	<p>Les techniques consistent principalement à mesurer la quantité totale de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> en acidifiant le milieu avec des acides forts de titre connu. On déplace l'équilibre vers la formation de CO<sub>2</sub>. La principale interférence dans cette mesure est due à la présence des AGV qui vont passer sous la forme non ionisée. La technique la plus utilisée au niveau de la STEP est le recyclage partiel de l'effluent anaérobie vers le bassin en amont du réacteur (donc avec l'affluent) aide à la récupération de l'alcalinité sous forme de bicarbonates (formés lors de la production de CO<sub>2</sub>).</p>

**Tab.3 : Tableau résumant les solutions adoptées**

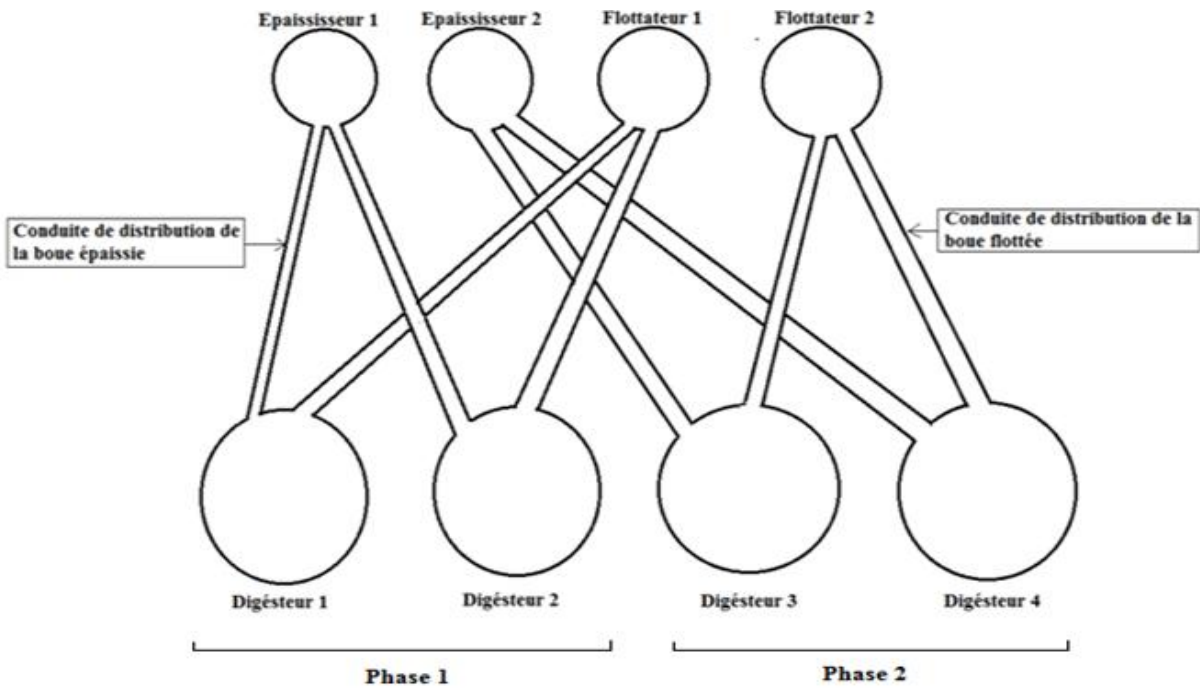
### ***III- Les solutions proposées :***

#### ***A- L'ajout d'une fosse de mixage :***

Actuellement la station n'a pas encore réglé le problème de l'hétérogénéité de la boue au fond du digesteur et qui représente un dysfonctionnement remarquable de ce dernier, et perturbe le déroulement du traitement de la boue mixte ainsi les conditions nécessaires de la stabilité de la boue.

La technique utilisée dans la station consiste, au cours de l'alimentation continue de la boue épaissie et de la boue flottée, tout un brassage mécanique non régulier ou une agitation par réinjection du gaz au sein du digesteur dans un intervalle de temps très court (les deux boues non pas assez de temps pour bien se mélanger). Ce qui va engendrer toute un ensemble des problèmes soit au niveau du dysfonctionnement de l'ouvrage ce qui implique une perturbation des phases de traitement, soit au niveau de la qualité et la stabilisation de la boue qui n'autorise pas leur rejet dans le milieu naturel avec un grand risque de contamination et de pollution.

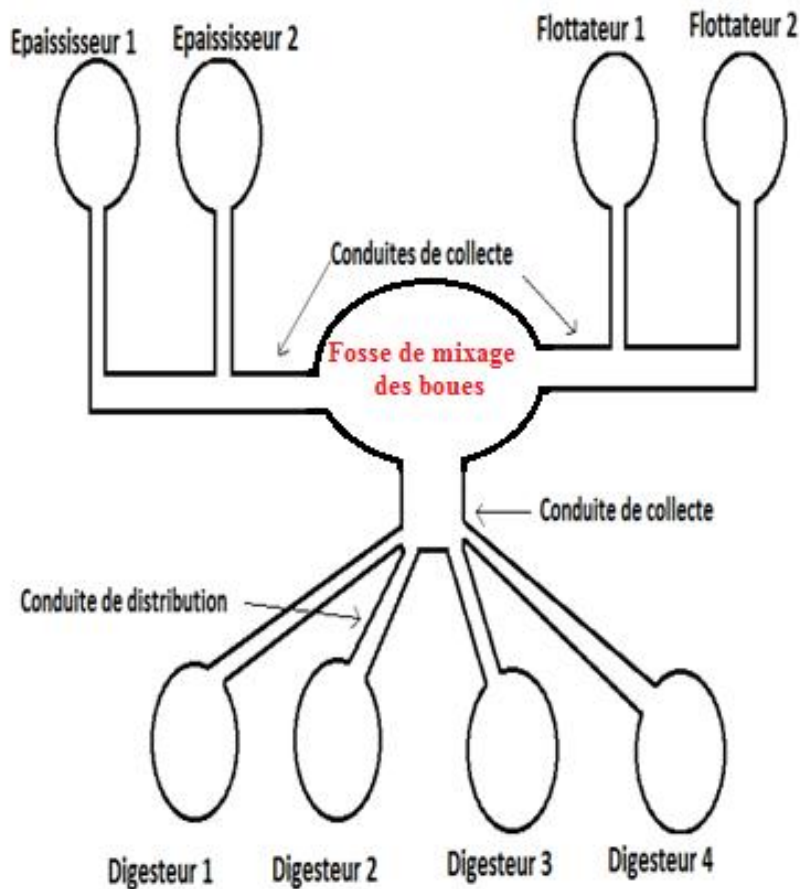
Le schéma suivant nous renseigne de point de vue déroulement et distribution sur la répartition irrégulière des boues épaissies et flottées pour les quartes digesteurs, celle-ci se fait suite à une alimentation directe à partir les 2 épaisseur et les 2 flottateurs à travers des conduites de distributions.



**Fig .27 : Schéma descriptif de l'ancienne répartition des boues**

Au niveau des digesteurs le système d'agitation est très lent et se fait au cours de l'alimentation en boues fraîches, ce qui résulte une formation de dépôts au fond de l'ouvrage et créer des zones d'anaérobie favorables au développement de populations de bactéries non désirables, et par conséquent on aura une boue hétérogène et une concentration défavorable pour la digestion.

Afin de minimiser se problème et mieux préparer la boue pour la digestion, nous avons proposé d'établir cette solution qui semble mieux adaptée. (voir annexes)



*Fig .28: Schéma descriptif de la nouvelle répartition de la boue mixte.*

Au lieu d’avoir à chaque fois au niveau des quatre digesteurs une alimentation de la boue primaire (épaissie) suivie par une alimentation de la boue secondaire (flottée), la préparation du mélange doit se faire avant l’introduction dans le digesteur, c’est pour ça nous avons pu élaborer un nouvel ouvrage nommé « Fosse de mixage » dont l’alimentation se fait par ordre d’un digesteur à l’autre.

La fosse de mixage est une cuve souterraine (pour de faciliter l’apport des boues flottés et épaissie qui sera de manière gravitaire afin de minimiser le taux d’énergie consommée par les pompes), cylindrique et étanche à dôme sphérique qui aura un volume de  $600\text{m}^3$ , un volume maximal qu’on pourra utiliser sans que notre ouvrage puisse en aucun cas influencer la nappe

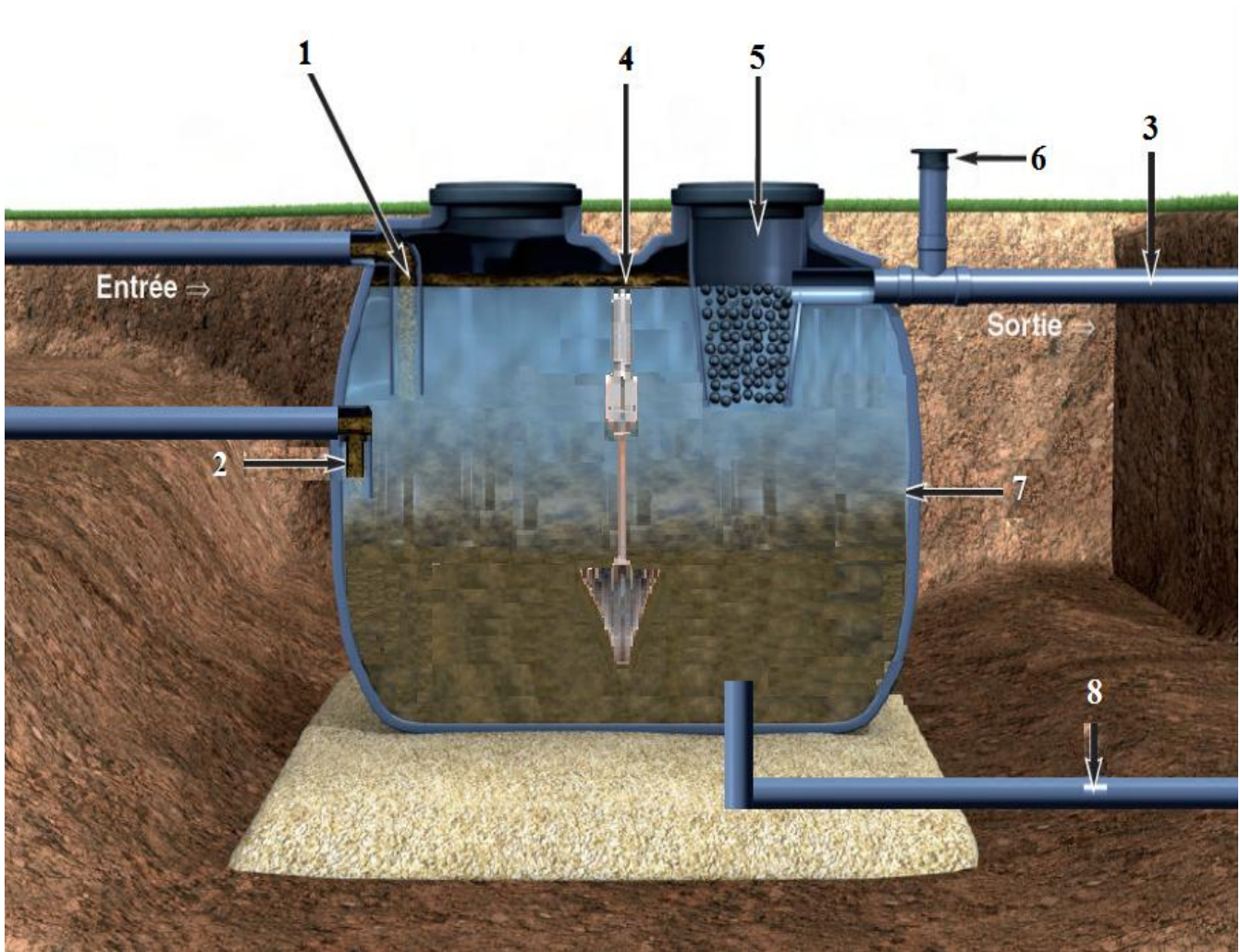


phréatique. Chaque 2h l'épaisseur et le flottateur vont verser un volume de boue de 600m<sup>3</sup> dans la fosse de mixage grâce à des conduites de collectes souterraines , 2h correspond au temps nécessaire pour que 600 m<sup>3</sup> de boues soit très bien brassé, notre digesteur a un volume énorme de 6000 m<sup>3</sup> , donc avec 6000 m<sup>3</sup> de boues on aura besoin de 20h continue de mixage, et de presque 24h pour le remplissage de l'ouvrage et la vérification des autres paramètres avant de débiter la digestion , donc il faudra 24h de différence entre le remplissage de deux digesteurs .

Notre fosse de mixage correspond à 1 /10 du volume du digesteur donc le phénomène de brassage va se produire 10 fois et en continue on va pouvoir alimenter notre ouvrage. L'alimentation se fait du haut vers le bas et c'est ce qui nécessite la présence d'une pompe assez performante qui va aider à faire remonter la boue bien mélangée depuis la fosse vers le digesteur. En état normale ce n'est que deux digesteurs qui seront remplis c'est-à-dire 12000 m<sup>3</sup> en entier de boues à digérer, mais dans le cas de surcharge on passe au digesteur 3 et 4 ( ce dernier est très rarement utilisé ) , le digesteur est un procédé anaérobie donc la présence d'air sera défavorable au bon fonctionnement , alors soit le digesteur est totalement rempli c'est-à-dire 6000 m<sup>3</sup> pour ne pas laisser de la place à l'air pour se loger , soit la boue inférieure à ce volume passe vers un stockeur jusqu'à ce qu'on lui rajoute le volume manquant pour qu'à son tour soit digérée.

Dans la partie supérieure de la « fosse de mixage » s'installe un agitateur permettant le brassage mécanique des boues, et dans la partie inférieure s'installe une conduite venant du digesteur qui permet l'agitation par injection du biogaz ( de pression : 8 bars , la pression maximale nécessaire afin d'éviter toute fuite de gaz indésirable ) , sans oublier une pompe assez grande afin de faire remonter la boue vers le digesteur , cette pompe sera accompagnée par un ventilateur qui sert à maintenir le bon fonctionnement et le bon état des moteurs de pompage.

Cet ouvrage est représenté comme suite :



*Fig.29 : schéma explicatif de la fosse de mixage*

- 1- Entrée de la boue épaissie
- 2- Entrée de la boue flottée
- 3- Sortie de la boue mixte vers les quatre digesteurs
- 4- Agitateur mécanique
- 5- Récupérateur à pompe de la boue mixte
- 6- Ventilateur
- 7- Bassin de mélange
- 8- Agitation par recirculation du biogaz

Cette solution présente plusieurs avantages :

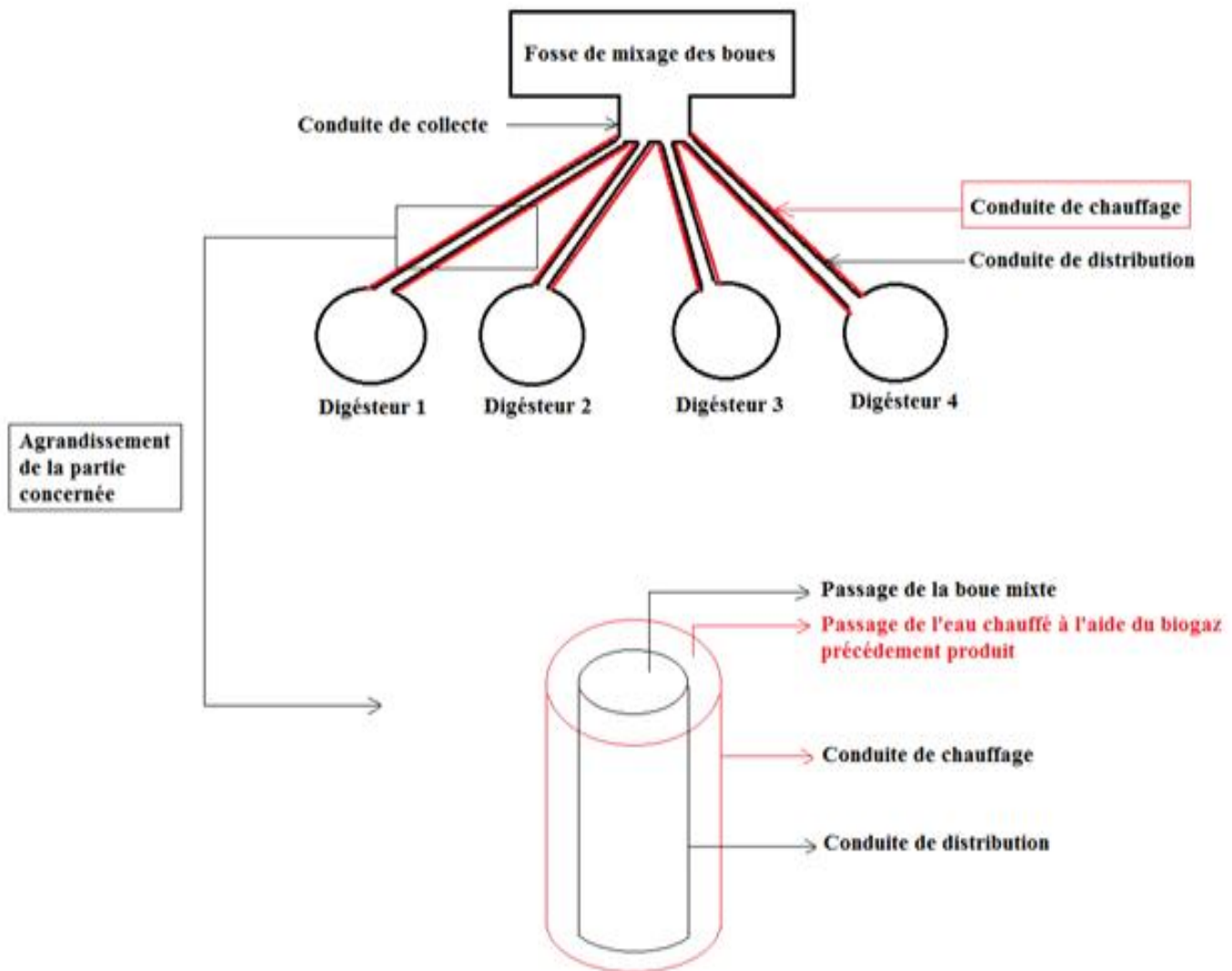
- La fosse représente toute un système de mélange efficace du contenu du digesteur permettant :

- d'assurer à la fois l'homogénéité du digestat (une boue homogène, fraîche et bien mixée) et le renouvellement des contacts bactéries et matière dégradable.
- D'obtenir des boues avec la plus petite quantité possible de matière à digérer, ce qui empêche la fermentation et le dégagement de mauvaises odeurs.
- D'améliorer significativement les propriétés mécaniques et biologiques des boues usées.
- L'élimination ou la destruction accélérée et contrôlée d'une partie des matières organiques, et plus précisément des matières à évolution bactérienne rapide.
- L'inactivation importante des germes pathogènes présents dans la boue et responsables de sa fermentation.

### ***B- Régulation de la température avant l'entrée au digesteur :***

La maintenance d'une température au alentour de 37 °C est nécessaire pour une digestion saine et profiter du maximum de biogaz produit pour le bon fonctionnement de la station.

Afin d'augmenter le rendement de la digestion, nous avons proposé de créer un dispositif capable de faire chauffer la boue mixte avant son introduction dans le digesteur, nous avons présenté le dispositif comme suite :



**Fig. 30 : Régulation proposée de la température avant l'entrée du digesteur**

Le chauffage de la boue se fait par un circuit externe de recirculation : les boues seront pompées jusqu'à la fosse de mixage. Elles passent dans un échangeur « eau chaude / boues » ce qui permet d'une part de réchauffer celles-ci et d'autre part d'homogénéiser la température pour améliorer la digestion.

La régulation de la température avant de passer à la digestion est faite par des échangeurs thermiques qui sont en général de type tubulaire, ce qui facilite leur entretien. Ils sont alimentés, à contre-courant, par l'eau chaude provenant d'une chaudière biogaz, la boue mixée et chauffée se dirige vers la bache d'alimentation du digesteur.

## Conclusion

*L'utilisation de la digestion anaérobie comme procédé de dépollution a de sérieux atouts pour s'imposer dans de nombreux secteurs.*

*La maîtrise du fonctionnement des digesteurs ainsi que la production d'une boue stable nécessite deux types de contrôles : celui relatif aux conditions des concentrations à l'entrée et à la sortie du digesteur sous forme des quantités en MS et en DCO, et celui qui dépend des paramètres physico-chimiques tels que la température, le pH, les concentrations en AGV et l'alcalinité. Toutes les valeurs de ces paramètres sont reliées entre elles et leur interprétation permet souvent d'identifier rapidement la cause d'une instabilité lorsqu'elle est présente.*

*Actuellement, la station d'épuration des eaux usées de Marrakech connaît plusieurs problèmes au niveau du traitement de la boue par digestion anaérobie et ceci a été expliqué par la réalisation des analyses concernant les six premiers mois de l'année 2012.*

*Tout au long de notre travail, nous avons essayé de décrire et d'étudier le fonctionnement de cette station, plus précisément le procédé de la digestion anaérobie, afin d'élaborer une solution pour l'optimisation du traitement de la boue, qui sera réalisée par le contrôle continu des paramètres nécessaire au déroulement de la digestion (les solutions adoptées par la STEP), ainsi par la mise en place d'une fosse de mixage des boues avant son introduction dans le digesteur(solution proposée), afin de garantir un bon déroulement de toutes les phases de la digestion anaérobie et par conséquent la production d'une boue stable avec un taux important de réduction des éléments indésirables qui ne présente aucun danger lors de son rejet dans le milieu naturel, ainsi qu'une production optimale du biogaz qui répond aux besoins de la station en électricité et qui sera utilisé par la suite dans plusieurs domaines tels que le réchauffage et le brassage de la boue.*

## *Bibliographie*

- **Batstone D.J., Keller J., Angelidaki I., Kalyuzhnyi S.V., Pavlostathis S.G., Rozzi A., Sanders W.T.M., Siegrist H. and Vavilin V.A.** (2002). Anaerobic Digestion Model No 1.IWA. Task group for mathematical modelling of anaerobic digestion processes. *IWA Editions.Cornwall, UK*
- **Choo K.H. and Lee C.H.** (1996a). Effect of anaerobic digestion broth composition on membrane permeability. *Wat. Sci. Tech.* **34**(9), 173-179
- **CLARK R.H, SPEECE R.E.** (1970). The pH tolerance of anaerobic digestion 265-307.
- **DALLA TORRE A.,** (1986) : Mixed culture model of anaérobie digestion :application to the evaluation of start up procedures. *Biotech.Bioeng.,* 27-1106.
- **Edeline, F.** (1993) L'épuration biologique des eaux. Théorie et technologie des réacteurs. Cebedoc Ed. Liège, Belgique.
- **Wikipedia** : site de recherche, « En ligne » [http://fr.wikipedia.org/wiki/Loi\\_d'Arrhenius](http://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_d'Arrhenius); (page consulté le 25 Janvier)
  
- **Hakkou R., Wahbi M., Bachnou A., Elamari K., Hanich L. et Hibti M.** : Impact de la décharge publique de Marrakech (Maroc) sur les ressources en eau. *Bull. Eng. Geol. Environ.* **60**, 325-336 (2001).
- **KVH.** (2011)-Manuel processus et opération : Traitement secondaire, tertiaire, traitement des boues et du biogaz et traitement de l'air vicié, 23-260.
- **Mc Carty P.L. and Brosseau M.H.** (1963). Effect of high concentration of individual volatile acids on anaerobic treatment. *Proc. 18th Industrial Waste Conf., Purdue University, Ann Arbor Science, Ann Arbor, USA,* 283-296
- **MOLETTA R.** (1986a). Différentes approches de la modélisation de la fermentation méthanique. *Bio-Sciences* 2 -55.
- **MOLETTA R.** (1986b). Modélisation de la fermentation méthanique : influence des conditions de fonctionnement sur le pH, *11ème colloque Soc.Fr.Microbiol. Toulous,* 285.
- **MOSEY F.E., FERNANDES X.A** (1984). Mathematical modelling of methanogenesis-digestion, in : *Methods for environmental biotechnology,* ISBN 0-12-295040-2, 159.

- **M.SAADI, E.A.HILAI, A. BOUDDA (1957):** carte géologique du Maroc(1/500000), Marrakech , ministère de l'énergie et des mines direction de la géologie, édition du service géologique du Maroc, note et mémoire N°70.
- **RADEEMA. (2009)-Note de process :** *Réalisation de la deuxième phase et exploitation de la station d'épuration des eaux usées de Marrakech.*
- **R.MOLETTA (1989) –** *Water and science review : Control and utilisation of anaérobic digestors 277-279.*
- **ROZZI A.,BURION K.W., HAWKES D.L. (1983).** Potentiometric method for the determination of carbon dioxide in biogas .J.Agric.Engng.Res., 282-505.
- **STEYER J.P., Buffière P., Rolland D. and Moletta R. (1999).** Advanced control of anaerobic digestion processes through disturbances monitoring. *Wat. Res.* **33**(9), 2059-2068.
- **STROHWALDN.K.H. (1991).** The application of the anaerobic digestion - ultrafiltration processto brewery effluent. *Contract Report No. 338/1/91 Water Research Commission, Pretoria, South Africa.*
- **WHITMORE T.N., LAZZARI M., LLYOD D, (1985) :**Comparative studies of methanogenesis in thermophilic and mesophilic anaerobic degestion using membrane inletmass spectrometry . *Biotech. Letters*, 7-283.

## *Liste des figures*

- Fig.1:** Organigramme de la RADEEMA
- Fig.2:** Carte géographique du Maroc localisant Marrakech-Tensift-Al Haouz (Daniel Dalet/dmaps.com)
- Fig.3 :** carte géologique de la région de Marrakech échelle 1/500000 (Ministère de l'énergie et des mines, direction de la géologie 1957)
- Fig.4:** Les qualités d'eau des principaux effluents d'Oued Tensift.
- Fig.5:** Carte de localisation de la STEP de Marrakech ( RADEEMA)
- Fig.6:** Coupe longitudinal d'un digesteur anaérobie
- Fig.7 :** Schémas descriptif de l'origine des boues primaires et secondaires
- Fig.8:** Schémas des différentes étapes de la digestion anaérobie.
- Fig.9:** Variation de la concentration de la matière organique au cours de l'alimentation du digesteur
- Fig.10:**Variation de la concentration de la boue digérée à la sortie du digesteur en mois d'Avril 2012.
- Fig.11:**Variation de la température d'Avril 2012 au cours de la digestion anaérobie des deux phases
- Fig.12:** Variation du taux de biodégradation en fonction de la température (WATERLEAU)
- Fig.13 :** Variation de la charge DCO en fonction de la température (WATERLEAU)
- Fig.14 :** variation du pH au cours de la digestion pour les deux phases
- Fig.15:** Influence d'une baisse du pH sur le temps nécessaire au digesteur pour récupérer 50% de son activité (CLARK et SPEECE ,1970)
- Fig.16:** Variation des AGV au cours de la digestion des deux phases
- Fig.17 :** Variation de l'alcalinité du mois d'Avril pour les deux phases
- Fig.18 :** Variation de l'AGV/Alcalinité en fonction du pH (Strohwald, 1993)
- Fig.19 :** Variations mensuelles de la MS des boues mixtes
- Fig.20 :** Variation des concentrations en DCO à l'entrée et sortie des digesteurs
- Fig.21 :** Variations mensuelles de la température des digesteurs
- Fig.22 :** Variations mensuelles du pH des digesteurs
- Fig.23 :** Variations mensuelles de l'alcalinité des digesteurs
- Fig.24 :** Variations mensuelles des AGV des digesteurs
- Fig.25:** Carte piézométrique de la région du Oued Tensift (d'après Hakkou et al., 2001)
- Fig.26 :** Schéma descriptif du processus de récupération de l'alcalinité par recyclage de l'effluent adapté pour la station
- Fig.27 :** Schéma descriptif de l'ancienne répartition de la boue mixte
- Fig.28:** Schémas descriptif de la nouvelle répartition de la boue mixte
- Fig.29 :** Schéma explicatif de la fosse de mixage
- Fig.30 :** Régulation proposée de la température avant l'entrée du digesteur



## *Liste des tableaux*

**Tab.1 :** Concentration moyenne de DCO en mois d'Avril à l'entrée et sortie du digesteur

**Tab.2 :** Les résultats d'analyses des métaux lourds

**Tab.3 :** Tableau résumant les solutions adoptées

## *Liste des photos*

**Photo.1 :** Station d'épuration de la ville de Marrakech

**Photo.2 :** Dégrillage

**Photo.3 :** Dégrillage fin

**Photo.4 :** Dessablage-Dégraissage

**Photo.5:** Décanteur primaire

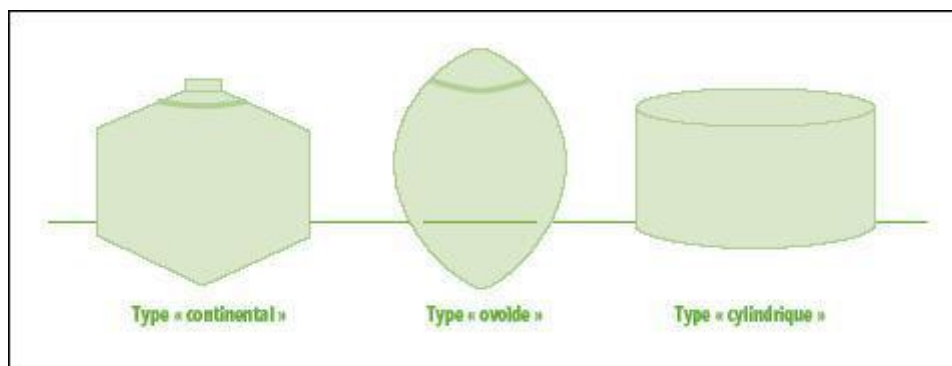
**Photo.6:** Le digesteur

**Photo.7:** Le gazomètre

## *Annexes*

<b>Volume unitaire</b>	<b>6000 m<sup>3</sup></b>
<b>Volume total</b>	<b>12000 m<sup>3</sup></b>
<b>Diamètre</b>	<b>24 m</b>
<b>Hauteur cylindrique</b>	<b>12,25 m</b>

*Caractéristiques descriptives du digesteur*



*Les différentes formes des digesteurs*

<b>Un débit nominal</b>	<b>500 Nm<sup>3</sup>/h</b>
<b>Une composition d'entrée</b>	<b>CH<sub>4</sub> : 65 +/- 5%.</b> <b>CO<sub>2</sub> : 35 +/- 5%.</b>

	<p>H2S: 3200 ppm.</p> <p>N2 : &lt;250 ppm</p>
--	---

*Débit et composition de biogaz entré dans la désulfuration*

*Tableaux des moyennes mensuelles*

Mois	AGV mg/l					
	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
Digesteur 1A	304	382	340	846	532	256
Digesteur 2A	326	364	310	903	505	259
Digesteur 1B	448	371	325	593	525	254
Digesteur 2B	467	358	323	609	545	261

Mois	Concentrations des boues					
	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
MS épaissies g/l	53,3	42,1	46,1	41	45,3	43,6
MS flotté g/l	41	40,2	40,6	31,5	49,8	38,3
MS mixte g/l	47,15	41,15	43,35	36,25	47,55	40,95

*Analyses mensuelles des AGV des digesteurs*

*Analyses des concentrations de boues*

Mois	DCO à l'entrée	DCO à la sortie
Janvier	929	637
Février	1124	802
Mars	1147	857
Avril	1150	945
Mai	1004	721
Juin	1103	769

Mois	Température de la digestion					
	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
Digesteur 1A	36,5	32,2	31,4	41,8	39,2	33,9
Digesteur 2A	36,3	31,4	36	34,2	36,3	38,9
Digesteur 1B	31,2	31,8	36,2	39,3	40,6	38,6
Digesteur 2B	30,8	32,1	41	36,3	37,2	36,9

*Analyse des valeurs de DCO*

*Analyses de la température des digesteurs*

Mois	Mesure du pH dans la digestion					
	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
Digesteur 1A	7,2	7,4	7,7	8	7,4	7,1

Digesteur 2A	7,2	7,4	7,7	8	7,4	7,1
Digesteur 1B	6,9	7,3	7,8	8,1	7,5	7,3
Digesteur 2B	6,8	7,3	7,8	8,1	7,5	7,3

*Analyses du pH des digesteurs*

*Analyses de l'alcalinité des digesteurs*

<i>Mesure de l'alcalinité</i>						
Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
Digesteur 1A	4,5	4,5	3,2	2,9	3	4
Digesteur 2A	4,2	4,4	3,2	2,9	2,9	3,9
Digesteur 1B	3,9	4,1	3,1	2,8	2,9	4,3
Digesteur 2B	4,1	4,1	3,1	3,0	3,3	3,9

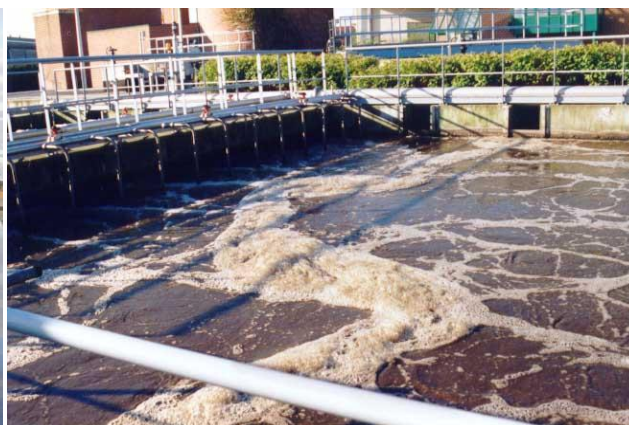
**Tableau1 : Rapport mensuel des analyses de la digestion des boues en mois d'Avril 2012**

Date	Digestion Phase 1											Digestion Phase 2										
	MSV alim g/l	MSV/ MS %	T(°C)		pH		AGV (mg/l)		Alcalini t-é g/l		MSV di g- ér é	MSV alim. g/l	MSV/ MS %	T(°C)		pH		AGV (mg/l)		Alcalinité g/l		MSV Dig Érée
			70- 80 %	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1				D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2		
1	22	63	40.2	37	8.1	8.1	345	402	2.8	3.1	19	27	72	36.1	36.2	7.8	7.7	396	360	3.4	3.4	20
2	24	65	35.7	36.6	7.9	7.8	312	360	3	3.1	20	27	72	36.5	37.1	7.9	7.9	420	444	3.6	3.6	19
3	30	55	32.3	36.1	7	7	354	360	3	3.2	20	30	74	36.6	36.9	7.9	7.9	444	370	3.2	3.2	25
4	30	55	32.5	35.6	7.8	7.9	348	360	3	3.2	19	24	74	36.4	36.7	8	8	396	384	3.4	3.4	20
5	34	49	32.3	35	7	7	516	408	1	0.9	19	24	72	36.1	36.2	7.8	7.9	420	540	2.9	3.4	20
6	35	58	32.4	34.7	7.9	7.9	444	444	2.8	3	18	28	72	36	36.2	8	8	420	444	2.9	3.2	24
7	32	50	31.9	34.1	7.8	7.8	567	348	3	3	19	28	74	35.9	36.3	6.2	7.9	465	450	3	3.6	10
8	20	46	31.9	33.7	7.8	7.7	490	316	3.1	3	19	19	74	36.2	36.4	8	8	420	455	3.3	3.4	20
9	26	62	32.5	33.7	7.8	7.9	456	444	3.1	3	20	17	72	36.4	36.7	8.1	8.1	480	492	3.3	3.2	21
10	26	63	33.7	34.1	7.9	7.9	507	443	3	3	20	17	71	35.1	35.1	8	8	480	510	3.5	4.5	20
11	26	64	32.1	33.6	8	8	504	456	3	3.2	20	30	73	36.9	36.9	8.7	8.1	480	516	3.6	3.4	26
12	22	64	32.6	34	7.9	7.9	444	420	3.1	3.1	19	27	73	36.2	36.4	8.1	8.1	528	408	3.3	3.5	19
13	20	63	33.9	34.1	6.2	7.8	684	492	3	3.1	19	10	68	36.1	32.1	8	8	600	444	3.1	3.7	18
14	21	63	33.2	34	7.9	7.9	549	500	3.3	3.2	18	18	70	36.2	37.7	8.1	8.1	528	444	3.1	3.4	18
15	24	61	33.4	30.8	7.7	7.9	467	456	3.2	3.2	20	16	73	36.1	36.8	7	6.4	732	384	3.2	3.1	19
16	29	67	33.4	33.7	7.9	7.9	480	456	3.1	3.1	18	14	70	36.3	37.4	8.1	8.2	504	480	3	3.5	19
17	30	66	33.2	33.5	7.9	8	496	550	3	3.1	20	19	72	36.3	37.2	8.1	8.2	581	576	3	3.4	19
18	28	66	33.2	33.4	8.1	8.1	528	600	3	3.1	19	20	72	36.2	37	8.2	8.2	552	504	3.1	3.1	18
19	27	67	33.1	33.2	8	8	492	528	3	3.1	20	20	72	36.6	36.9	8.2	8.2	552	528	3.4	3.4	20
20	26	67	33.1	33.1	8	8.5	636	732	2.8	3	17	20	73	34.2	34.2	8.2	8.1	696	720	3.2	3.4	18
21	23	64	32.4	32.5	8.1	6.9	587	530	3.3	3	15	19	82	30.1	36.3	8.2	8.3	676	710	3.2	3.2	17
22	30	61	32.9	33	8	8	513	600	3	2.9	21	17	75	36	36.5	8.2	8.3	576	525	3.1	3.4	17
23	26	68	35	33.6	8	8	612	540	2.9	2.9	24	17	73	36.1	36.7	8.1	8.2	576	552	3.2	3.4	19
24	25	69	33.9	33.9	8	8	678	545	3.4	3	18	32	73	36.1	36.5	8.2	8.2	581	612	2.5	3.4	19
25	25	68	33.3	34.3	8.2	8.2	552	600	3	2.9	18	26	74	36.4	32.9	8.2	8.3	528	840	2.7	3.6	18
26	24	67	31.9	33.9	8.1	7.9	768	624	2.7	2.1	18	26	74	34.9	35.1	8.2	8.3	660	732	2.9	3.1	18
27	25	68	32.5	34.1	8.1	8	600	576	3.1	3	15	35	74	37	37.1	8.2	8.7	634	576	3.3	3.3	18
28	23	62	32.8	34.1	8.7	8.1	654	540	3.3	3.1	16	37	75	36.7	37	8.3	8.3	572	576	3.2	3.1	17
29	21	45	33.1	34.2	8.1	8.2	678	634	2.9	3	16	39	75	37.2	36.9	8.2	8.3	512	630	3.4	3.3	19
30	28	66	33.4	34.2	8.3	8.2	672	552	3.3	3.2	18	25	74	37.1	36.9	8.3	8.4	516	696	3.5	3.5	20

M o y	26	65	33.3	34.2	8	8	532	505	2.9	3	19	19	73	36.2	36.3	8.1	8.1	527	547	3.2	3.4	20
M a x	35	69	40.2	37	8.7	8.5	768	732	3.3	3.4	24	37	82	37.2	37.7	8.7	8.5	696	840	3.6	3.7	26
M i n	20	55	30.1	32.5	6.2	6.9	312	360	1	0.9	15	17	68	34.2	30.1	6.2	6.4	396	384	2.7	3.1	10



**Décanteur primaire**



**Bassin d'aération biologique**



**Décanteur secondaire "clarificateur"**



**épaisseur gravitaire**

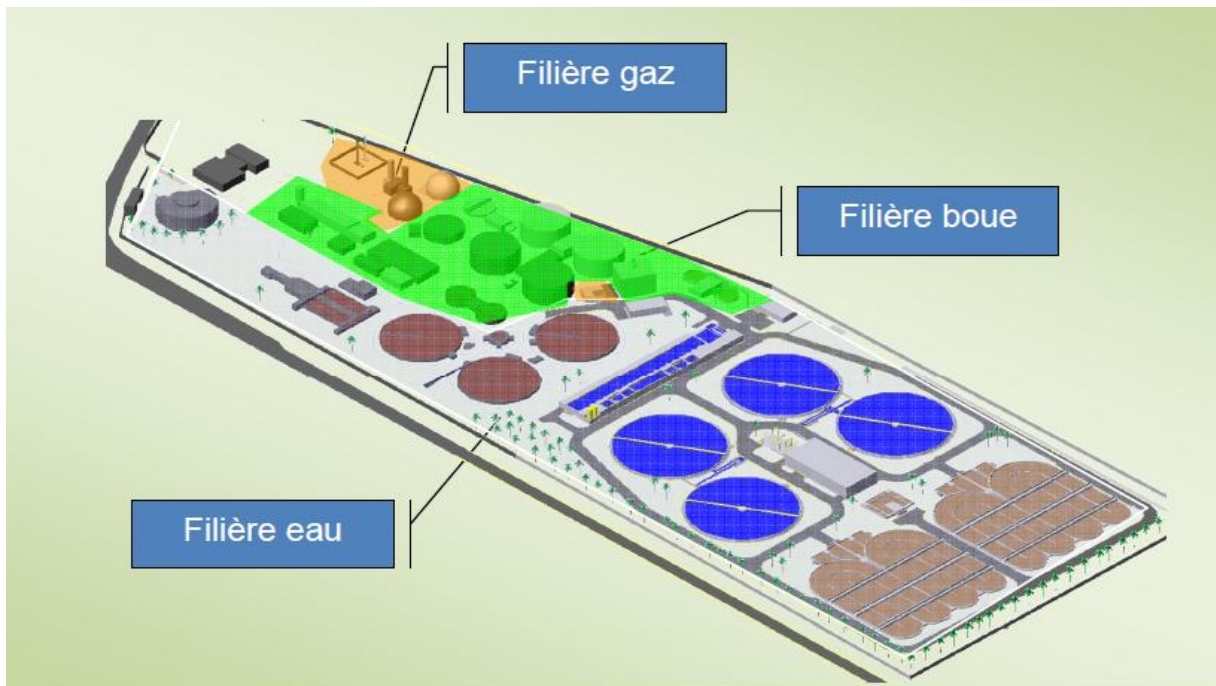


**Mécanisme de désulfuration**

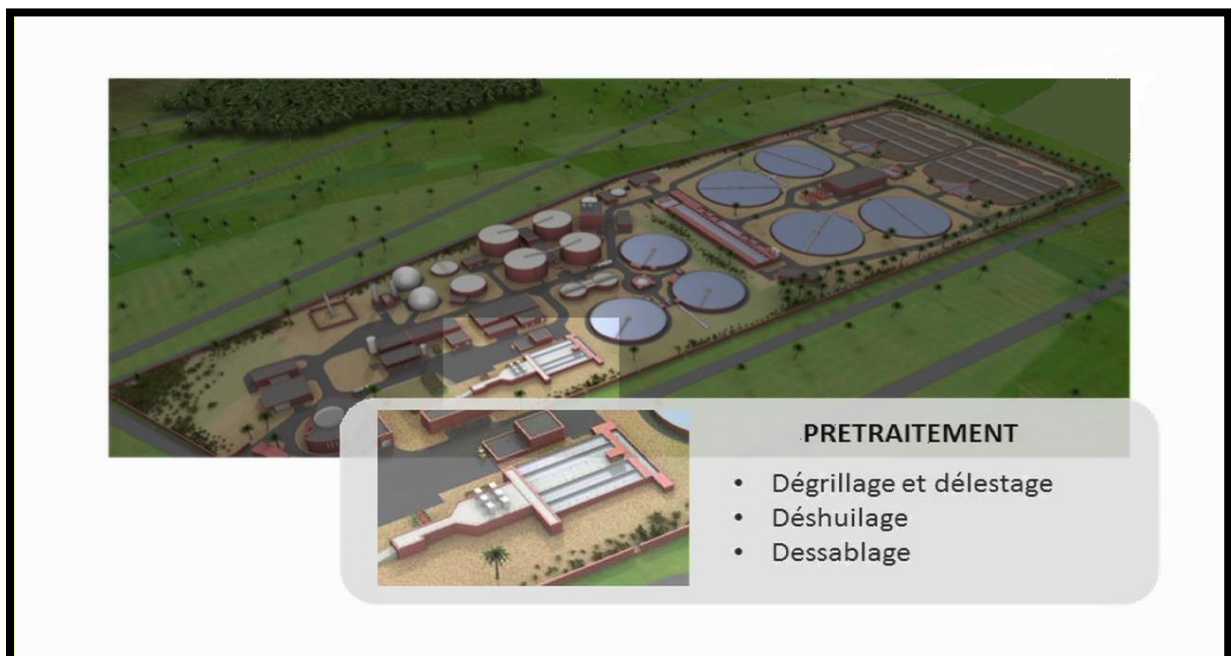


**Le cogénérateur**





**Modèle de STEP avec les trois filières**



**Etape de prétraitement**

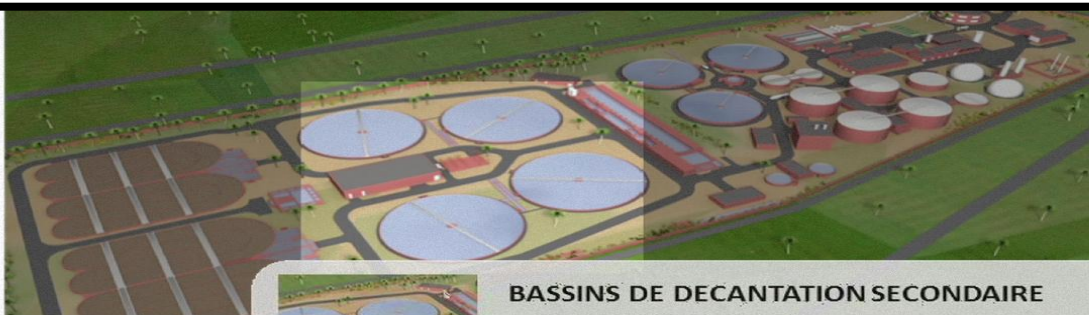




**REACTEUR BIOLOGIQUE**

- Elimination de la pollution organique
- Aération: oxygène pour micro-organismes
- Boues activées

**Etape du traitement secondaire**



**BASSINS DE DECANTATION SECONDAIRE**

- Envoi eau propre  
→ vers l'oued Tensift  
→ vers traitement tertiaire
- Envoi boues vers digesteurs

**Décantation secondaire**



**TRAITEMENT TERTIAIRE**

- Coagulation et floculation
- Filtration sur lit de sable
- Désinfection UV et chloration
- Envoi eau purifiée vers irrigation

**Traitement tertiaire**

