

Département des Sciences de la Terre

Licence des Sciences et Techniques

Eau & Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

ETUDE DE LA PERFORMANCE DE LA DIGESTION
ANAEROBIE DANS LA STATION DE TRAITEMENT
DES EAUX USEES DE « MARRAKECH »

Réalisé par: BOUNASSER Sara & AIT ABDELOUAHED Saida

Soutenu: Le 21 Juin 2018

Devant le jury composé de :

Pr. Khadija EL HARIRI: Encadrante (FST- Marrakech)

Mr. Tarik AL MANSOUR: Encadrant (Station d'épuration des eaux usées),

Pr. Hassan IBOUH: Examineur (FST- Marrakech),

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2017-2018

Dédicace :

C'est avec profonde gratitude et sincères mots,
que nous dédions ce modeste travail de fin d'étude à
nos chers parents ; qui ont sacrifié leur vie pour
notre réussite et nous ont éclairé le chemin par
leurs conseils judicieux
nous espérons qu'un jour,
nous pourrions leur rendre un peu de ce qu'ils ont
fait pour nous, que Dieu leur prête bonheur et longue vie.
nous dédions aussi ce travail à nos frères et
sœurs, nos familles, nos amis,
Tous nos professeurs qui nous ont enseigné
et à tous qui nous sont chers

Remerciement :

Premièrement nous remercions Dieu source de toute connaissance.

Au terme de ce travail, nous adressons nos remerciements les plus sincères à notre encadrante **M. Khadija ELHARIRI**, enseignante à la faculté des sciences et techniques, pour nous avoir permis de bénéficier de son grand savoir dans différents sujets tout au long de notre stage à la STEP, pour sa pédagogie, ses compétences, sa modestie et son aide précieuse tout au long de ce projet même pour les moments les plus difficiles. Vraiment merci pour la qualité d'encadrement si sérieuse et si consistante...

Un grand merci à **Mr. Mahmoud** et **Mr. Abdelouahid DRIOUICH** méritant tout le respect pour ses encouragements, pour nous avoir bien accueillis dans la STEP et également pour son aide précieuse qu'ils nous ont offerte tout au long du stage.

Nos remerciements à notre encadrant **Mr. Tarik ALMANSOUR**, ingénieur à la STEP, pour ses explications, ses conseils et son assistance.

Nous ne manquons pas l'occasion de remercier **Mr. Salaheddine HADOUNI** pour son incontestable contribution dans l'accomplissement de notre projet et pour sa disponibilité.

Sommaire :

Liste des photos :.....6

Liste des figures :.....7

Liste des tableaux :.....7

Liste des abréviations :.....8

Introduction.....9

Chapitre 1 : présentation générale10

I. Présentation de la RADEEMA : 11

1. Les missions et les objectifs de la RADEEMA: 11

1. Définition : 11

2. Les objectifs de l’assainissement : 11

1. Situation géographique de la station : 12

2. Les objectifs de mise en place de la station : 12

3. Les objectifs de la STEP : 12

4. Les composantes de la STEP : 13

IV. Les étapes de traitement des eaux usées : 15

Collecte des eaux : 15

La filière eau : 15

1. Le prétraitement : 15

2. Le traitement primaire : 17

3. Le traitement secondaire : 18

4. Le traitement tertiaire: 19

La filière boue 20

La filière biogaz 22

I. L’impact de la station sur l’environnement : 24

Chapitre 2 : étude de la performance de la digestion mésophile à la STEP de MARRAKECH25

I. Problématique de l’étude : 26

II. Généralités sur la digestion anaérobie : 27

1. Intérêts de la digestion anaérobie : 28

2. Mécanisme de la digestion anaérobie : 28

3. Les paramètres de la digestion : 30

III. Méthode d’échantillonnage : 33

Chapitre 3: analyses et interprétations des résultats :	39
I. Interprétations des résultats du mois d'Avril : (<i>voir annexe 2</i>).....	40
II. Interprétations des moyennes des mois (juillet, août septembre) 2017 et (février, mars, avril) 2018 : (<i>voir annexe 2</i>).....	50
III.Solutions proposées :	52
Conclusion générale :	55
Bibliographie :	56
Annexes:	57

Liste des photos :

Photo 2: les constituants de la STEP	13
Photo 3: la fosse à batard.....	15
Photo 4: le dégrillage.....	16
Photo 5: dessableur-déshuileur.....	17
Photo 6: le traitement secondaire	19
Photo 7:le traitement tertiaire	20
Photo 8: les étapes de traitement de la boue.....	22
Photo 9: torchère	22
Photo 10: les étapes de traitement de biogaz.....	23
Photo 11 : les échantillons prélevés	33
Photo 12: les étapes de mesure de la matière sèche	34
Photo 14: multimètre+ mesure de pH des échantillons.....	35
Photo 13: l'étuve à 550°C+ la mesure de la MSV	35
Photo 15: Centrifugeuse+ mesure d'alcalinité.....	37
Photo 16:ébullition des échantillons + titration des AGV par NaOH	38

Liste des figures :

Figure 1 : la situation géographique de la STEP (Maps)	12
Figure 2 : coupe longitudinale d'un décanteur primaire.....	18
Figure 3: coupe longitudinale de digesteur	27
Figure 4 : Schéma illustrant les différentes étapes de la digestion anaérobie (Barret, 2014-2015)	30
Figure 5 : variations journalières de la matière sèche.....	40
Figure 6: variations journalières de la matière sèche volatile à l'entrée du digesteur	41
Figure 7 : variations journalières de la matière sèche volatile réduite au niveau des digesteurs	42
Figure 8 : variations journalières de la MSV à la sortie des digesteurs	43
Figure 9: variations des AGV pendant le mois d'Avril 2018.....	43
Figure 10 : variation de l'alcalinité durant le mois d'Avril dans les deux phases	44
Figure 11 : variation du pH en Avril 2018 au niveau des digesteurs.....	45
Figure 12: variation journalière de la température dans les deux phases de la digestion	45
Figure 13 : variation du temps de séjour pendant le mois d'Avril au niveau des digesteurs ...	46
Figure 14 : variation journalière du débit de biogaz produit au niveau des digesteurs	47
Figure 15 : variations mensuelles de la réduction de la matière sèche	50
Figure 16 : variations mensuelles du pH	50
Figure 17 : variations mensuelles de la température.....	50
Figure 18 : variations mensuelles du temps de séjour	50
Figure 19 : variations mensuelles de biogaz	51
Figure 20 : schéma illustrant l'ajout des Co-substrats dans le digesteur (la méthanisation de la matière organique)	53

Liste des tableaux :

Tableau 1 : les constituants de la station	14
Tableau 3 : analyse FFOM (force-faiblesse-opportunité-menace).....	24

Liste des abréviations :

RADEEMA : régie autonome de distribution d'eau et d'électricité de Marrakech

STEP : station de traitement et d'épuration

MES : matière en suspension

MS : matière sèche

MSV : matière sèche volatile

AGV : acides gras volatils

TAC : titre d'alcalinité

TS : temps de séjour

Introduction

L'accroissement démographique économique et urbain est à l'origine de différentes sources de pollution. Parmi ces sources de pollution, la production des eaux usées souvent rejetées dans le milieu récepteur (mer, rivières, sols) sans traitement préalable générant ainsi de nombreuses maladies et épidémies.

Au Maroc, la consommation en eau est en perpétuelle augmentation que ça soit humaine industrielle ou agricole.

Les sécheresses répétées qu'a connue notre Royaume a forcé les décideurs à prendre les mesures nécessaires qui permettent une meilleure gestion des eaux usées comme étant des ressources hydriques appréciables qu'il faut absolument récupérer après leur épuration.

Au niveau de la ville de Marrakech, la régie autonome de distribution d'eau et d'électricité de Marrakech (RADEEMA) a réalisé une station de traitement et d'épuration des eaux usées pour leur exploitation comme source d'énergie électrique et thermique.

Le traitement des eaux usées consiste à décanter les éléments polluants particuliers et à extraire les éléments dissous qui sont transformés en matière déposée suite à un traitement approprié. Ainsi, à la sortie de la station, il en résulte d'une part une eau épurée rejetée dans le milieu naturel réutilisée pour l'irrigation des golfs et des palmeraies.

D'autre part, il reste des sous-produits désignés sous le terme « boue résiduaire ». Ces boues produites par la station d'épuration constituent une quantité énorme destinée pour la production de biogaz suivant la technique de la digestion mésophile.

La boue digérée suit un voie de déshydratation afin d'augmenter le taux de la siccité est séchée au décharge selon le nouveau projet de séchage.

Cette étude sera structurée en trois parties :

- Généralités sur la station de traitement des eaux usées de la ville de Marrakech
- Présentation des filières de traitement des eaux usées.
- Etude de la performance de la digestion mésophile à la station d'épuration et quelques solutions proposées pour le bon fonctionnement de la digestion.

Chapitre 1 : présentation générale

I. Présentation de la RADEEMA :

Dans le cadre de la protection de l'environnement et de la gestion intégrée des ressources en eau, le premier janvier 1998, la RADEEMA (Régie Autonome de Distribution d'Eau et d'Electricité de Marrakech) a pris en charge la gestion du service de l'assainissement liquide suite aux délibérations de la communauté urbaine de Marrakech.

1. Les missions et les objectifs de la RADEEMA:

La RADEEMA consiste à assurer d'une manière continue la distribution d'eau et d'électricité et la gestion du service d'assainissement liquide, l'épuration et la réutilisation des eaux usées.

Elle a aussi d'autres objectifs comme suit :

- Maintien de la dynamique des investissements
- Amélioration de la qualité des services rendus aux citoyens
- Protection de l'environnement
- Sauvegarde des ressources en eau potable.
- Amélioration du système de distribution d'eau potable de la ville de Marrakech, par la lutte contre le gaspillage d'eau.

II. Assainissement :

1. Définition :

L'assainissement est une démarche visant à améliorer la situation sanitaire globale de l'environnement dans ces différents composants. Il comprend la collecte, le traitement et l'évacuation des déchets solides et toutes les matières naturellement évacuées par l'Homme ou un organisme animal sous forme solide ou liquide.

2. Les objectifs de l'assainissement :

- L'objectif principal est la prévention du contact humain avec des substances dangereuses
- L'évacuation et le traitement des eaux usées afin de minimiser les risques pour la santé et pour l'environnement.

- Porter la professionnalisation de la gestion des services d'assainissement liquide de 24% à 49%.
- La réduction de la pollution et la dégradation de l'environnement.

III. Présentation de la STEP :

1. Situation géographique de la station :

La station d'épuration est située au Nord de la ville de Marrakech, en rive gauche 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 17 ha.



Figure 1 : la situation géographique de la STEP (Maps)

2. Les objectifs de mise en place de la station :

Le choix du site est motivé, par sa côte la plus basse qui permet la collecte et le transport gravitaire des eaux usées, et 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.

3. Les objectifs de la STEP :

Les objectifs de la station d'épuration sont :

- Soulager les ressources en eau potable
- Le bon développement des cultures vue le faciès chimique des eaux

- La protection des nappes souterraines du danger de contamination par les constituants d'une eau usée non traitée.
- La protection de l'environnement
- L'amélioration des conditions sanitaires
- La participation au développement touristique.

4. Les composantes de la STEP :



Photo 1: les constituants de la STEP

Les chiffres	Les noms	Les nombres
1	Administration	1
2	Fosse à batârd	3
3	Dégrillage	3
4	Dessablage déshuilage	2
5	Décanteur primaire	4
6	Les bassins biologiques	5
7	Les clarificateurs	4
8	Le traitement tertiaire : -coagulation/floculation -filtre à sable -désinfection UV+chloration	1
9	Epaississeurs	3
10	Flotatteurs	2
11	Digesteurs	4
12	Stockeur	2
13	Filtre à bande	2
14	Unité de la désulfuration	1
15,17	Gazomètre	2
16	Cogénération	4
18	Bassin naturel contient l'eau tertiaire	1
19	Torchères	2

Tableau 1 : les constituants de la station

IV. Les étapes de traitement des eaux usées :

Collecte des eaux :

Les eaux usées sont collectées au niveau d'un déversoir d'orage situé en amont et à 2 Km de la station et ensuite transmises vers cette dernière par le biais d'un canal souterrain. Au même temps, il joue un rôle de gestion du débit d'eau entrant, il est équipé d'une vanne murale pour la régulation des débits d'entrée et particulièrement pendant les périodes de pluies ou de crues, étant donné que toute augmentation du débit va engendrer un dysfonctionnement et entraver l'efficacité du traitement.

La filière eau :

1. Le prétraitement :

Afin de protéger les équipements mécaniques, la plupart des stations d'épuration sont équipées des prétraitements physiques. Ces prétraitements ont pour mission d'assurer la protection des étapes ultérieures de traitement contre des risques de débouchage et d'abrasion.

- **La fosse à batard:** c'est un canal d'un volume de 4.5 m³ par lequel passe l'eau tout d'abord lors de son arrivée à la station. Les déchets lourds se décantent et s'acheminent par des techniques manuelles vers la décharge publique.



Photo 2: la fosse à batard

➤ **Le Dégrillage:**

Son rôle est d'empêcher les particules volumineuses et solides de passer. Il existe trois types :

La pré-grille : elle est d'un entrefer de 20 cm, inclinée à 15°, sa largeur est de 3 m, de nettoyage manuel, permet d'éliminer les gros déchets (morceau de bois, partie d'arbre...)

Le dégrillage grossier : il est vertical de nombre de 4 canaux automatique, ce dégrillage est caractérisé par un entrefer de 10 cm, une largeur de 1.5m, une épaisseur de 1cm, il permet de retenir les éléments volumineux.

Le dégrillage fin : il est vertical de nombre de 4 canaux automatiques, ce dégrillage est caractérisé par un entrefer de 1 cm, une largeur de 1.5m, une épaisseur de 1 cm, il permet de retenir les éléments les plus fins.



Photo 3: le dégrillage

➤ **Le dessablage/le déshuilage :**

Cette technique a pour but d'enlever les matières solides, sables et d'autres particules lourds, qui pourraient endommager les équipements mécaniques de traitement.

Le dessableur : situé dans une zone aérée où le sable est lavé et capturé dans une gouttière au fond, il est ensuite extrait par des pompes à sable puis envoyé vers un laveur à sable.

Le déshuileur : situé dans une zone non-aérée et calme où l'huile et les graisses sont capturées à la surface puis sont évacuées par un racleur pour le traitement des graisses. Ces graisses vont alimenter les digesteurs pour augmenter la qualité de biogaz .



Photo 4: dessableur-déshuileur

2. Le traitement primaire :

Les eaux prétraitées sont acheminées vers le répartiteur afin de les distribuer de manière égale sur les 3 décanteurs primaires qui sont de forme circulaire et conique au fond.

Le traitement primaire vise à éliminer par décantation une forte proportion de matière en suspension (50 à 60 %).

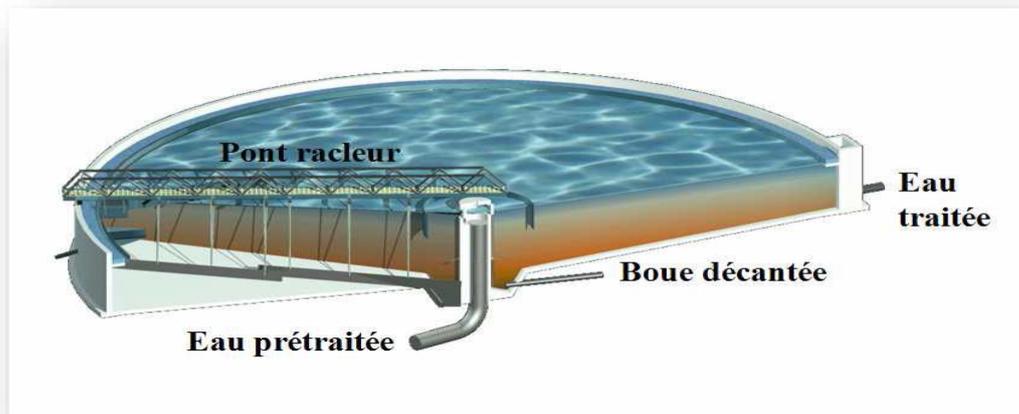


Figure 2 : coupe longitudinale d'un décanteur primaire.

3. Le traitement secondaire :

L'eau passe par le répartiteur qui réduit la vitesse d'eau et sépare l'eau sur les quatre bassins biologiques d'aération ouvertes, dans lesquels on injecte de l'air grâce à des diffuseurs d'air. Ce traitement se base sur les bactéries qui vont se nourrir des matières organiques présentes dans l'eau.

Le rôle de ces bactéries est de transformer naturellement la pollution organique et d'éliminer le carbone, l'azote et le phosphore contenus dans les eaux.

Les processus qui sont adoptés pour éliminer l'azote sont :

La nitrification : La nitrification est l'oxydation de l'ammoniaque (NH_4) en nitrates (NO_3). Cette transformation se produit dans le bassin d'aération dans des conditions aérobies où l'oxygène est ajouté par l'entremise de compresseur sous l'action de bactéries appelées NITROMAS.

La dénitrification : Il s'agit d'un procédé biologique qui consiste à la réduction du nitrate en azote gazeux par des bactéries dénitrifiantes via la formation des composés intermédiaires tels que le nitrite, l'oxyde nitrique et l'oxyde nitreux dans des conditions anoxiques. Au cours du processus de la dénitrification, les organismes responsables de la libération du carbone peuvent utiliser les nitrates (NO_3^-) et les nitrites (NO_2^-) comme source d'oxygène.

➤ **Le clarificateur :**

L'eau en provenance du dégazeur s'écoule vers la deuxième chambre du répartiteur à partir duquel les quatre clarificateurs sont chargés de manière égale.

Le clarificateur est un bassin circulaire, équipé d'un pont racleur.

L'eau est ensuite laissée au repos durant environ neuf heures et demie dans les clarificateurs. L'eau et les boues biologiques s'y séparent par un processus naturel de décantation.

Les boues décantées sont renvoyées en plus grande partie vers les bassins d'aérations. L'autre partie sera transmise au flotateur afin de rejoindre la file boue.



Photo 5: le traitement secondaire

4. Le traitement tertiaire:

Le traitement tertiaire vise à éliminer les dernières matières en suspension, le phosphore et les germes pathogènes présentés dans l'eau.

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

L'objectif de ce traitement est donc d'obtenir un effluent avec un taux de MES < 5 mg/L.

Les étapes de traitement tertiaire sont les suivantes :

- **traitement par coagulation :** En ajoutant un réactif *Coagulant* ***FeCl3*** permet de rassembler les fines matières contenues dans l'eau à traiter pour former des flocons appelés : "Flocs".

- **traitement par floculation :** L'ajout à l'eau d'un réactif *Floculant* (un polymère) permet de coller l'ensemble des particules qui ont déjà rassemblées par la Coagulation.

L'action de ce Floculant permet de former des gros Floccs qui vont se séparer beaucoup plus rapidement de l'eau à traiter par décantation ou bien Flottation.

- **le filtre à sable :** cette technique permet d'assurer le passage de l'eau à traiter par des filtres de nombre de 12 qui sont constitués de sable et des graviers de différentes granulométries .le rôle de ce filtre est d'éliminer la matière en suspension présente dans l'eau.
- **Désinfection ultra violet et chloration :** Traitement de l'eau par l'ultra- violet et injection du chlore pour tuer les microorganismes restant dans l'eau.



Photo 6:le traitement tertiaire

La filière boue

Les boues d'épuration (urbaine ou industrielles) sont les principaux déchets produits par la station d'épuration à partir des effluents liquides. Ces sédiments résiduels sont constitués de bactéries mortes et de matières organiques minéralisées.

Le traitement de la boue se réalise selon les étapes suivantes :

➤ **Epaississement :**

Les boues retenues par la décantation primaire doivent être traitées avant leur évacuation. Ce traitement consiste à réduire les quantités des boues en éliminant une partie de l'eau qu'elles contiennent. Les boues sont envoyées par pompage vers les digesteurs.

➤ **Flottation :**

Pour la boue secondaire 60%-70% d'elle recyclée dans les bassins biologiques et permet d'activer les bactéries qui sont présente dans l'eau pour dégrader la matière organique rencontrée dans l'ouvrage et 30% à 40% subit une flottation pour diminuer la teneur en eau puis les boues sont envoyées vers les digesteurs.

➤ **La Digestion anaérobie :**

Les boues primaires sont stabilisées par la digestion anaérobie 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 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.

➤ **Stockage des boues digérées :**

Pour tamponner la production des boues et permettre une déshydratation des boues digérées, un stockeur de 1800 m³ de capacité a été mis en disposition pour le stockage de ces boues digérées.

➤ **La déshydratation mécanique :**

Dans la station d'épuration, l'étape de traitement finale des boues est leur déshydratation mécanique afin d'éliminer un maximum d'eau. Cela se réalise selon les technologies suivantes :

- Filtre à bandes
- Centrifugeuse



Photo 7: les étapes de traitement de la boue

➤ **Le séchage des boues déshydratées :**

De nouveau, c'est MARRAKECH qui innove en matière de digestion des boues produites par la STEP (station de traitement et réutilisation des eaux usées).

En effet, la RADEEMA a prévu une station de séchage solaire de boues sous serre qui pourra traiter ,environ 75000 tonnes de boues/an confiée pour la construction et l'exploitation à waterleau/thermosystem.la STEP de MARRAKECH produit annuellement près de 160 tonnes de boue déposées et enfouies dans les terrains .(Il nous est apparu nécessaire d'aller vers une manière plus écologique), indique Rachid BENCHIKHI directeur de la RADEEMA. (BERRISSOULE, 2016)

La filière biogaz

➤ **Désulfurisation :**

Le biogaz produit entre en phase de désulfurisation pour l'élimination d'H₂S.

➤ **Gazomètre :**

C'est un réservoir servant à stocker le gaz de la station, son volume est de 2450m³.

➤ **Torchère :**

Utilisé dans le cas où il y a un excès de méthane épuré dans le gazomètre (dépassé la capacité de stockage), dans ce cas le méthane est brûlé et libérée dans l'atmosphère



Photo 8: torchère

➤ **Cogénération :**

Cette technologie permet de produire simultanément de l'énergie électrique (assure 50% d'électricité de la STEP) et de l'énergie thermique qui réchauffe la boue dans les digesteurs.



Photo 9: les étapes de traitement de biogaz

I. 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'eau. Mais elle a des aspects négatifs surtout sur l'être humain. Le tableau ci-dessous présente les différents impacts de la station d'épuration sur l'environnement.

<u>Forces :</u> <ul style="list-style-type: none">• Traitement des eaux usées• Production de biogaz• Protection de l'environnement• Protection des ressources hydriques• Irrigation des golfs et des palmeraies	<u>Faiblesses:</u> <ul style="list-style-type: none">• Le projet de la STEP néglige l'irrigation des domaines d'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.
<u>Opportunités :</u> <ul style="list-style-type: none">• Le nouveau projet de séchage• La construction des bassins de forte charge• L'augmentation de biogaz produit (30000m³/j) en parallèle avec le débit des eaux épurées	<u>Menaces :</u> <ul style="list-style-type: none">• Pollution de l'air (les odeurs liées à la fermentation des eaux usées)• Pollution sonore (bruits à l'intérieur des locaux, bruits de circulation)• Effets sur la santé

Tableau 2 : analyse FFOM (force-faiblesse-opportunité-menace)

Chapitre 2 : étude de la performance de la digestion mésophile à la STEP de MARRAKECH

I. Problématique de l'étude :

Dans la station d'épuration, le traitement des eaux usées conduit à l'accumulation des quantités très importantes des matières en suspension qui sont nommées « boues ». Ces dernières sont très chargées en micropolluants et composés toxiques éliminés des eaux durant l'épuration et cela a un impact direct sur l'environnement. En effet c'est la principale source de contamination des nappes phréatiques dans le cas des terrains perméables et semi perméables ainsi la contamination des milieux aquatiques sous l'effet des produits toxiques.

Le fait de rejeter ces boues dont la qualité chimique et organique est différente de celle du milieu récepteur, va entraîner des modifications au niveau des propriétés du sol et par conséquent de la nappe phréatique.

Les boues polluées est rejetées vont s'infiltrer progressivement dans le sol et par conséquent dans les nappes, le degré de toxicité de ces boues et leur constituants vont influencer l'écoulement de surface et souterrains.

La pollution en métaux lourds s'avère 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.

La STEP de Marrakech a réalisé le projet de la digestion anaérobie pour la dépollution des boues. En effet la méthanisation des boues permet une réduction de leur volume et la production d'un biogaz valorisable en énergie. Cette dernière est utilisée pour le chauffage du digesteur et la production d'électricité (cogénération).

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, et le temps de séjour...) 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 engendrent la modification du fonctionnement du digesteur et par conséquent au déroulement du procédé ainsi la modification de la qualité de la boue digérée et sa stabilité dans le milieu naturel.

II. Généralités sur la digestion anaérobie :

La méthanisation ou digestion anaérobie est un procédé naturel qui permet la transformation de la matière organique en énergie par des bactéries en l'absence d'oxygène et dans des conditions de température égale à 37°C.

Le biogaz produit est composé majoritairement de méthane (CH₄), une quantité de CO₂ et une petite quantité d'H₂S. Le résidu de la digestion (ou digestat) est stable, désodorisé et débarrassé en majeure partie des germes pathogènes.

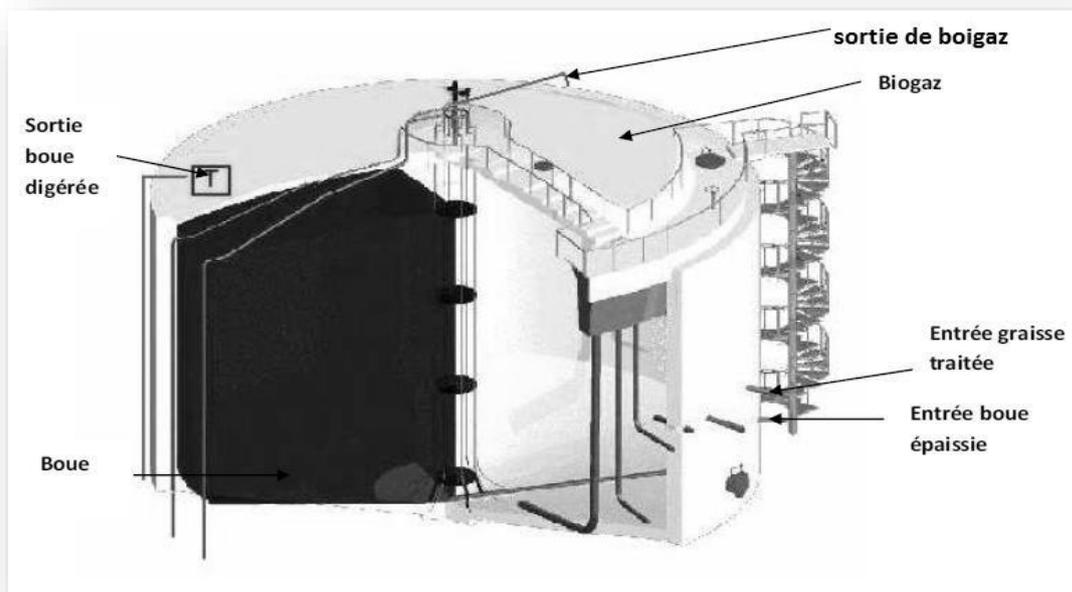


Figure 3: coupe longitudinale de digesteur

1. Intérêts de la digestion anaérobie :

- La réduction de 40% de quantité des boues à traiter
- La production de biogaz
- La protection de l'environnement
- La production d'un digestat stabilisé, débarrassé en grande partie des germes pathogènes
- La réduction des teneurs en composés organiques volatils

2. Mécanisme de la digestion anaérobie :

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

- **L'hydrolyse :**

L'étape d'hydrolyse est un processus de dégradation des composés particuliers, mettant en jeu divers micro-organismes hydrolytiques anaérobies. Elle conduit à l'hydrolyse enzymatique et à la solubilisation de molécules complexes (protéines, polysaccharides, lipides, cellulose,...) en composés plus simples (acides aminés, sucres simples, acides gras, glycérol,...). La quantité de matière particulaire solubilisée dépend de la composition même de la phase particulaire dans les digesteurs.

- **L'acédogenèse :**

Cette étape consiste à transformer les molécules dissoutes en produits intermédiaires tels que l'alcool, l'acide organique de plus bas poids moléculaires et les acides gras volatils qui comprennent l'acide acétique ainsi que l'hydrogène et CO_2 .

- **L'acétogénèse :**

Les bactéries acétogénèse commencent son œuvre, celles-ci transforment les alcools et les acides organiques en acides acétiques en CO_2 et H_2 qui s'ajoutent à ceux déjà produits.

- **La méthanogenèses :**

A ce point deux groupes distincts de microorganismes responsables de la formation du méthane :

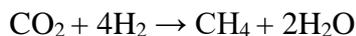
- *Les microorganismes méthanogènes acétiques-clastiques :*

Ces bactéries transforment l'acide acétique en méthane et en CO₂ (production de 70% du méthane obtenu)

- *Les microorganismes méthanogènes hydrogénotrophes :*

Ces bactéries utilisent le CO₂ et l'hydrogène moléculaire pour produire 30% du méthane restant. Elles exercent entre autre une action fondamentale pour l'équilibre du processus notamment l'élimination de l'hydrogène produit dans les étapes précédentes.

La méthanogène peut être décrite par les réactions suivantes :



Toute accumulation éventuelle d'H₂ pourrait bloquer l'acétogenèse et causer une accumulation excessive des acides gras volatils dans le milieu. Lorsque celui est produit, on observe une augmentation de l'acidité du milieu ce qui contribue à arrêter le processus.

Parmi les bactéries présentes durant la digestion mésophile : **les bactéries sulfato-réductrices**, en effet autant que les matériaux de départ contiennent une petite quantité de sulfate, ces bactéries utilisent une petite partie de H₂ moléculaire disponible pour réduire ce sulfate en hydrogène sulfuré(H₂S).

Finalement on obtient un mélange gazeux contenant principalement :

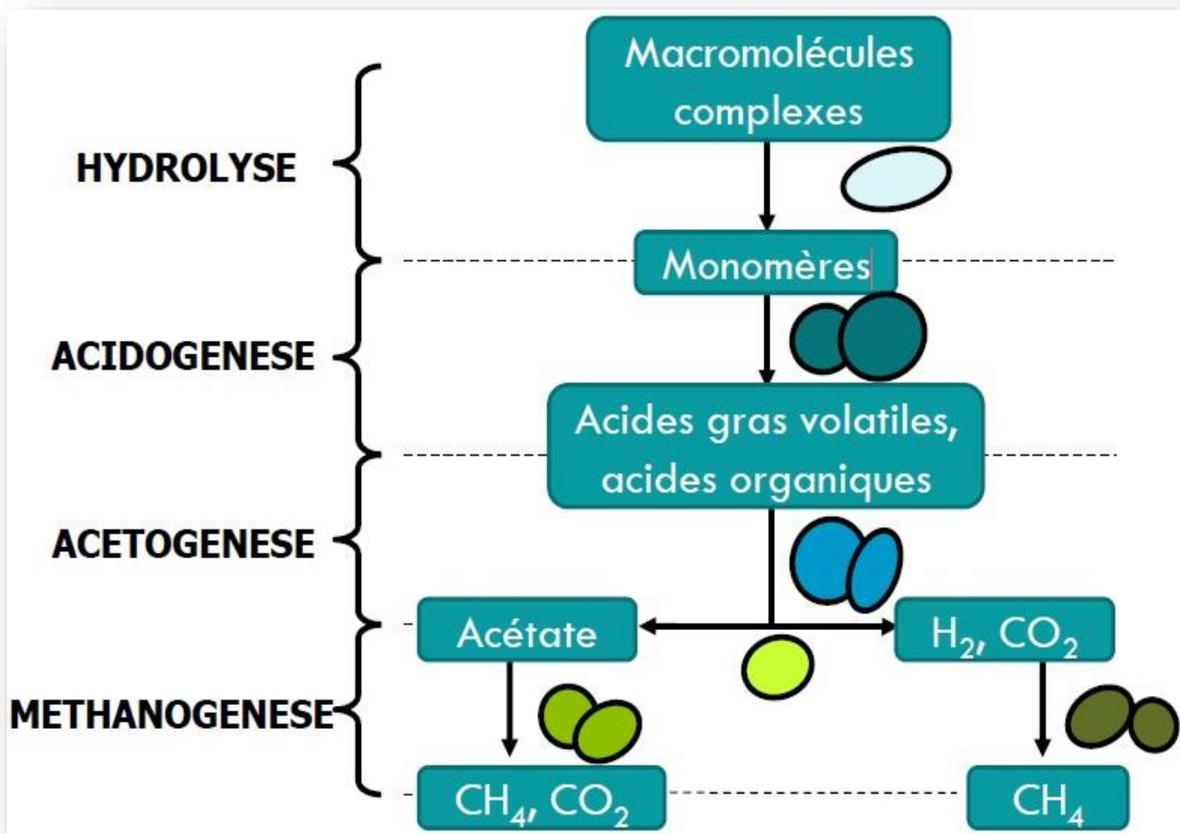
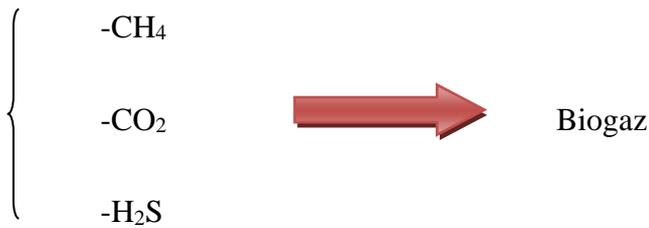


Figure 4 : Schéma illustrant les différentes étapes de la digestion anaérobie (Barret, 2014-2015)

3. Les paramètres de la digestion :

Lors de la mise en service du digesteur, il est nécessaire de contrôler différents paramètres qui conditionnent la méthanisation. Ces paramètres sont le pH, l'alcalinité, les Acides Gras Volatils, le temps de séjour, les nutriments et le débit de biogaz.

- **Les nutriments :**

Le suivi des nutriments est essentiel pour maintenir une biomasse constante et permettre une croissance des micro-organismes tout au long de la digestion.

- **Le temps de rétention hydraulique :**

Le TRH ou temps de rétention hydraulique (temps de séjour moyen des boues) est le principal paramètre de dimensionnement d'un digesteur. Il est généralement de l'ordre de 21 jours, ce qui est un compromis entre l'optimisation des performances de la dégradation de la matière organique et le volume du digesteur.

- **Température :**

La digestion anaérobie de la matière organique ne produisant pas significativement de chaleur, il est nécessaire de chauffer les digesteurs pour maintenir une température compatible avec une bonne activité microbienne. Ce chauffage est assuré généralement en consommant une partie du méthane produit.

- **Le pH :**

Le pH est le paramètre principal qui conditionne la méthanisation. Dans la littérature il est en général conseillé de garder un pH autour de la neutralité (entre 6,8 et 7,5). En effet, le pH peut inhiber les bactéries méthanogènes essentielles à la production du biogaz. Ainsi le suivi du pH, qui est fortement lié à la production d'acides gras volatils (AGV), va permettre de réguler le digesteur et éventuellement d'ajuster le pH.

- **L'alcalinité**

L'alcalinité est un paramètre important, très lié au pH puisqu'il constitue la représentation du pouvoir tampon du digesteur, donc sa capacité à maintenir un pH stable. Il dépend en majeure partie de la concentration en bicarbonates. Des mesures par titrage à H_2SO_4 souvent automatisées sont généralement utilisées pour définir l'alcalinité.

- **Les Acides Gras Volatils :**

Les acides gras volatils sont les intermédiaires de la digestion anaérobie qui influencent de plus le processus. Ils sont produits au cours de l'acidogénèse. L'accumulation d'AGV entraîne une baisse de pH qui inhibe les bactéries méthanogènes censées les transformer en méthane, la digestion est donc déséquilibrée. La mesure en continu de ces AGV par mesure titrimétrique permet de prévenir les dysfonctionnements de ce type.

- **Débit de biogaz :**

Le suivi du débit de biogaz ainsi que sa composition en méthane notamment, permet d'avoir une idée sur l'état de fonctionnement du réacteur. La mesure peut être faite par un appareil automatique.

III. Méthode d'échantillonnage :

1. Prélèvement des échantillons :

Le prélèvement des boues s'effectue manuellement et quotidiennement à l'aide d'un technicien au laboratoire.



Photo 10 : les échantillons prélevés

2. **Détermination de la matière sèche (MS) :**

- Pesé des cupules à vide dans la balance pour obtenir le **P₁**
- Placé un volume de **100ml** de l'échantillon de la boue dans chaque cupule et puis placées à l'étuve à 105°C pendant la nuit.
- Le lendemain les échantillons sont mis dans le dessiccateur une demi-heure .Ils sont ensuite pesés, on obtient le **P₂**.

La formule suivante permet de calculer la valeur de la matière sèche en **g/l**.

$$MS = \frac{(P2 - P1) * 1000}{V}$$



Photo 11: les étapes de mesure de la matière sèche

3. Détermination de la matière sèche volatile (MSV) :

- Les échantillons sont placés au four à moufle à 550°C pendant 2heures.
- On obtient le poids **P₃**.
- La valeur de MSV s'exprime en **g/L**, et est obtenue par la formule suivante :

$$MSV = \frac{(P2 - P3) * 1000}{V}$$



Photo 12: l'étuve à 550°C+ la mesure de la MSV

4. Détermination du pH :

Ce paramètre est mesuré à l'aide d'un multimètre directement lors de l'arrivée des échantillons au laboratoire. les valeurs de pH des quatre digesteurs est presque égaux .si ne le sont pas donc il ya un problème au niveau de l'un des digesteurs.



Photo 13: multimètre+ mesure de pH des échantillons

5. Détermination de l'alcalinité (TAC) :

- prélever 25 ml de l'échantillon de la boue des 4 digesteurs
- mettre les échantillons dans des tubes de centrifugation
- centrifuger à 1000 Tours/minute durant 13 minutes. Verser le surnageant dans un bécher.
- Ajouter 25 ml d'eau distillée et centrifuger jusqu'à obtention d'eau surnageant égal à 125 ml.

Le TAC est obtenu par titration de la solution obtenue à l'aide d'un acide H₂SO₄ pour atteindre un pH égal à 7 et on note le volume initial et on continue à titrer jusqu'à un pH égal à 4 et on note le volume final.

$$TAC = \frac{V(A) * T(A) * 1000}{VE}$$

Avec TAC exprimée en meq/l

V(A), le volume d'acide utilisé pour atteindre le pH4

T(A), le titre de la solution de l'acide utilisée

VE, le volume initial d'échantillon de boue, en ml

Dans notre cas, nous utilisons de l'acide sulfurique à 0.1N et par ailleurs VE=25 ml la formule peut donc s'écrire :

$$TAC = \frac{V * 0.1 * 1000}{25} = V * 4$$

Avec V, le volume d'acide sulfurique utilisé pour atteindre pH4

TAC exprimé en g/L de bicarbonates de calcium et non pas en meq/L. 1meq/L correspond à 50 g/L.

La formule simplifiée que l'on peut utiliser est :

$$TAC = V * 0.2$$



Photo 14: Centrifugeuse+ mesure d'alcalinité

6. Détermination des acides gras volatils(AGV) :

- Sur le même échantillon que TAC, ajouter de l'acide pour descendre jusqu'à pH3.3-3.5.
- Porter à ébullition, puis faire bouillir pendant 3 minutes. Laisser ensuite refroidir jusqu'à la température ambiante.
- Ajouter la soude(NaOH) 0.1N jusqu'à pH4.
- Effectuer un dosage jusqu'à pH7.

La formule générale de calcul des AGV est la suivante :

$$AGV = \frac{V(A) * T(A) * 1000}{VE}$$

Avec AGV exprimée en meq/l

V(A), le volume De la base utilisée pour atteindre le pH7

T(A), le titre de la solution de la base utilisée

VE, le volume initial d'échantillon de départ, en ml

Dans notre cas, nous utilisons de la soude à 0.1N et par ailleurs VE=25 ml la formule peut donc s'écrire :

$$AGV = \frac{V*0.1*1000}{25} = V (B)*4$$

On exprime généralement en mg/L d'acide acétique (CH_3COOH). 1 meq/L correspond à 60mg/L d'acide acétique .La formule peut s'écrire donc :

$$AGV = V * 0.24$$

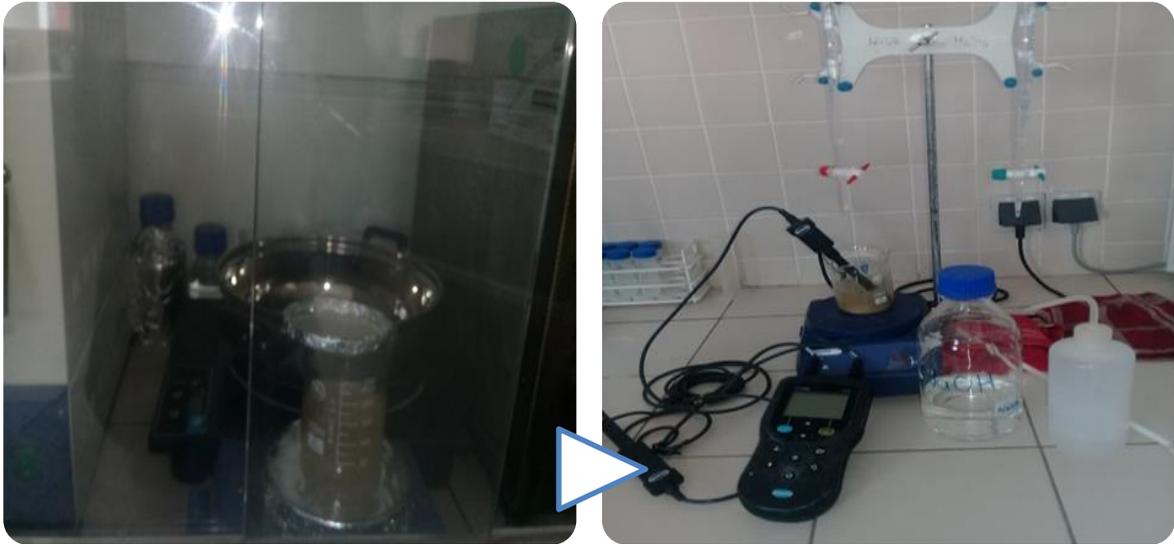


Photo 15:ébullition des échantillons + titration des AGV par NaOH

Chapitre 3: analyses et interprétations des résultats :

Durant cette étude, nous avons 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. 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. Interprétations des résultats du mois d'Avril : (voir annexe 2)

Durant cette étude, nous avons 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. 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.

1. La matière sèche (MS) :

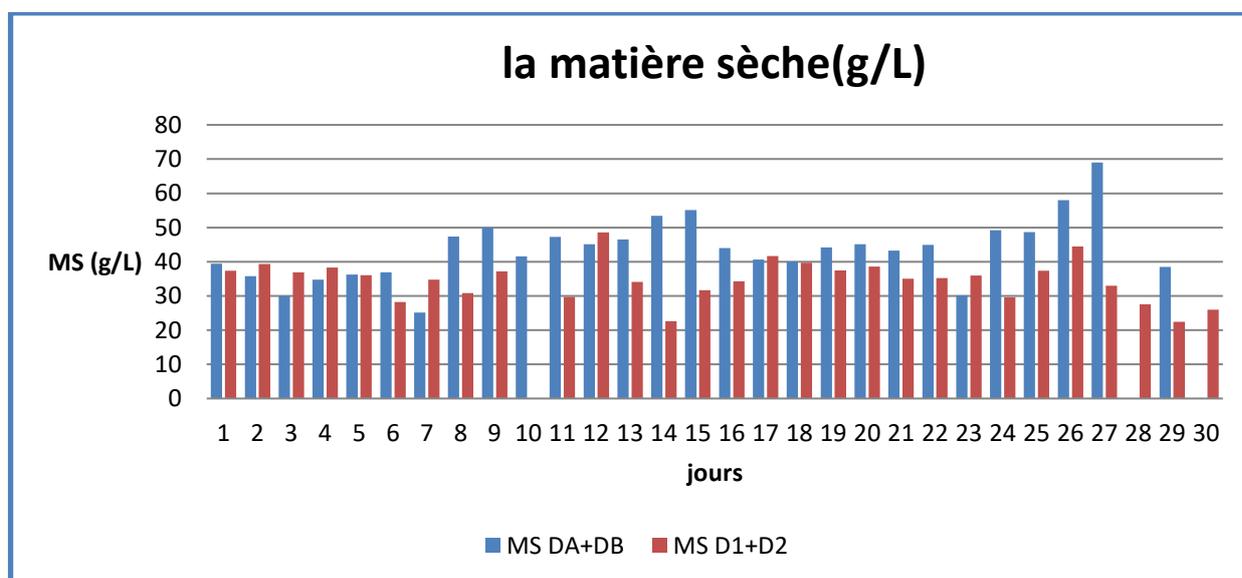


Figure 5 : variations journalières de la matière sèche

A l'entrée de chaque digesteur parmi les paramètres d'alimentation nécessaire à observer c'est la matière sèche soit minérale, organique ou toxique.

Dans cette figure on remarque la variation journalière de la concentration de la matière sèche d'un digesteur à l'autre. En effet on note un maximum de 69g/L au niveau de la phase 1 (DA+DB) et un minimum de 22.42g/L au niveau de la phase2 (D1+D2).

Chaque augmentation de la matière sèche est expliquée par l'augmentation de la matière en suspension entrée à la station et le bon épaissement de la boue (68,6g/L).

2. La MSV :

a. La MSV entrée au digesteur :

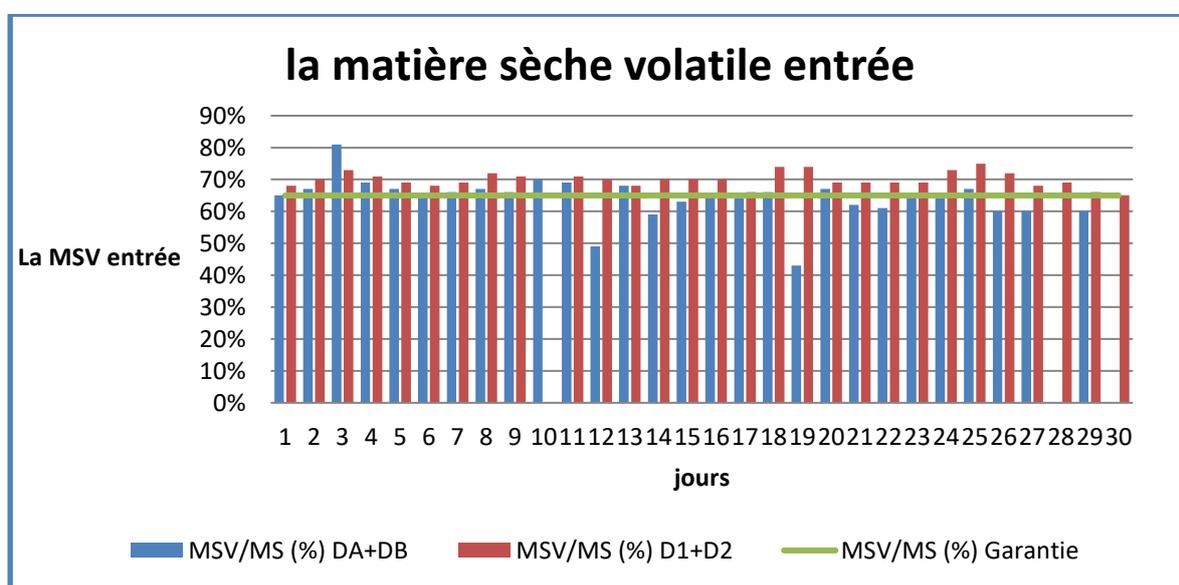


Figure 6: variations journalières de la matière sèche volatile à l'entrée du digesteur

La matière sèche volatile est la responsable sur la production de biogaz par méthanisation dans des conditions favorables.

La figure ci-dessus montre des valeurs différentes de la matière sèche volatile durant le mois d'Avril et on remarque que la plupart de ces valeurs ont dépassées le seuil qui est 65% qui peut permettre une bonne digestion et production de biogaz.

Sur ce graphe, la matière sèche volatile arrive à un maximum de 81% au niveau de la phase 1 (DA+DB) et un minimum de 43% dans la même phase. la diminution de la matière sèche volatile peut être expliqué par la dégradation de la matière organique en matière minérale à cause de l'augmentation de temps de séjour de la boue avant d'être entrée au digesteur.

b. La MSV réduite :

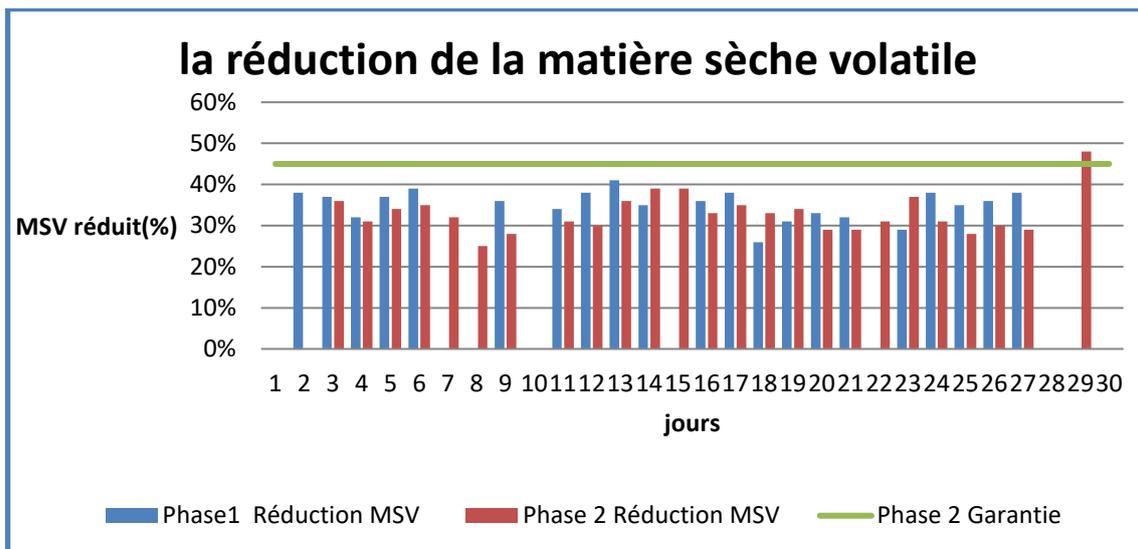


Figure 7 : variations journalières de la matière sèche volatile réduite au niveau des digesteurs

Les valeurs de la MSV réduire dans ce mois est inférieure à la garantie excepté le 29 avril qui présente une augmentation de 48%. Cette variation est expliquée par une augmentation de la température au niveau des digesteurs de la phase 2 (D1+D2).

Chaque augmentation de la température influence la biodégradation de la matière organique et donc résulte une inhibition de la méthanisation

c. La MSV sortie du digesteur :

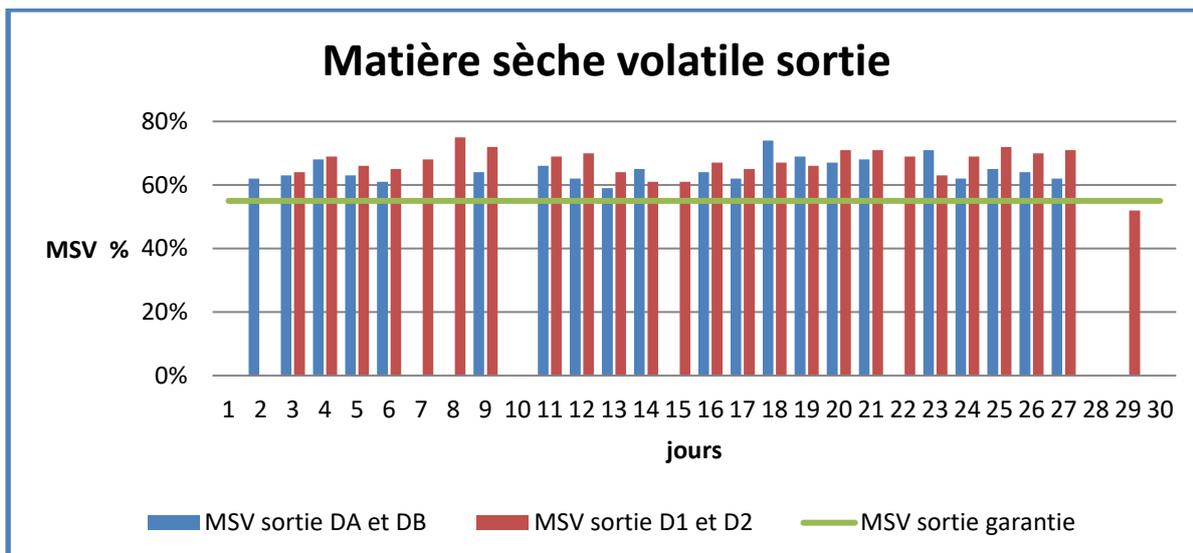


Figure 8 : variations journalières de la MSV à la sortie des digesteurs

Les valeurs de la MSV sortie pendant ce mois sont très proches les uns des autres et ont dépassées le seuil sauf le jour 29 avril où il y a une diminution bien marquée au niveau des digesteurs de la phase 2 (D1+D2).

La matière sèche volatile réduite est inversement proportionnelle à celle qui est sortie. En effet chaque diminution de cette dernière est engendrée par une réduction très importante de la matière organique.

3. Les Acides Gras Volatils (AGV):

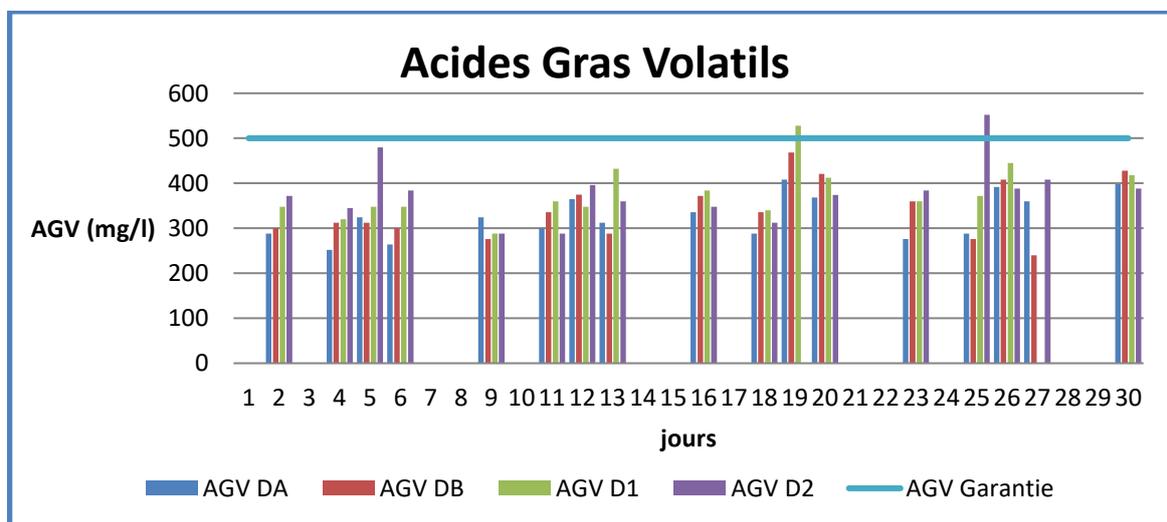


Figure 9: variations des AGV pendant le mois d'Avril 2018

Sur ce graphique les AGV arrivent à une concentration maximale de 552mg/l enregistré au niveau de la deuxième phase et une concentration minimale de 240mg/l dans la première phase.

L'accumulation d'acides gras volatils lors d'une surcharge organique au niveau du digesteur résulte une inhibition du processus de méthanisation.

4. L'alcalinité :

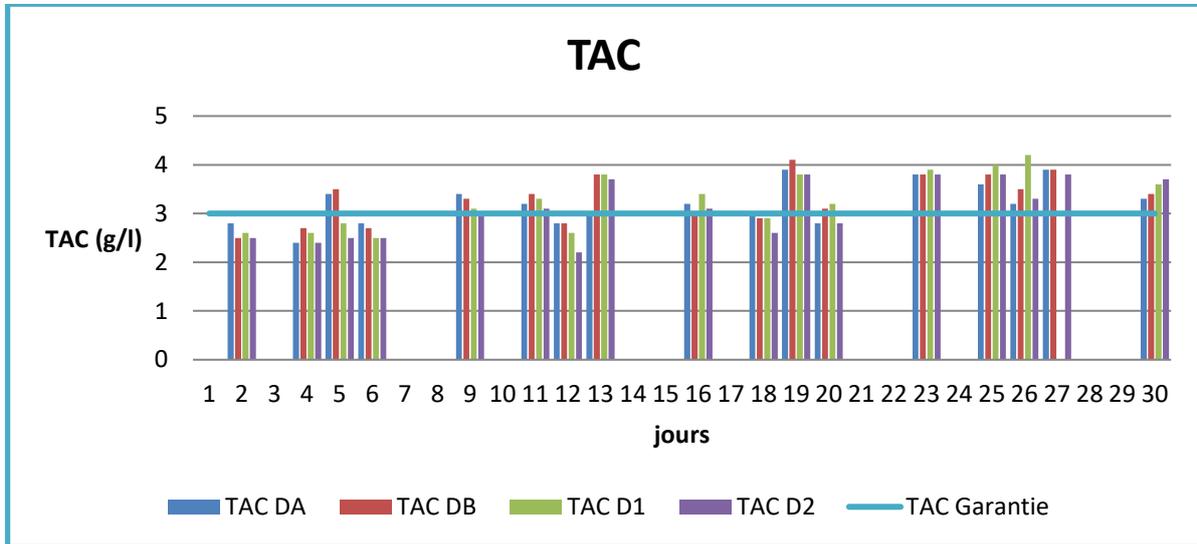


Figure 10 : variation de l'alcalinité durant le mois d'Avril dans les deux phases

On remarque que les valeurs de l'alcalinité varient, la plupart de ces dernières sont inférieures à la norme au début de mois d'Avril et supérieures à la fin du mois. La figure montre un maximum de 4.2g/L dans la phase 2 (D1) et un minimum de 2.2g/L dans la phase 2 (D2).

Chaque variation de l'alcalinité au niveau des digesteurs engendre un mal fonctionnement des bactéries durant la méthanisation donc une mal production de biogaz.

5. Le pH :

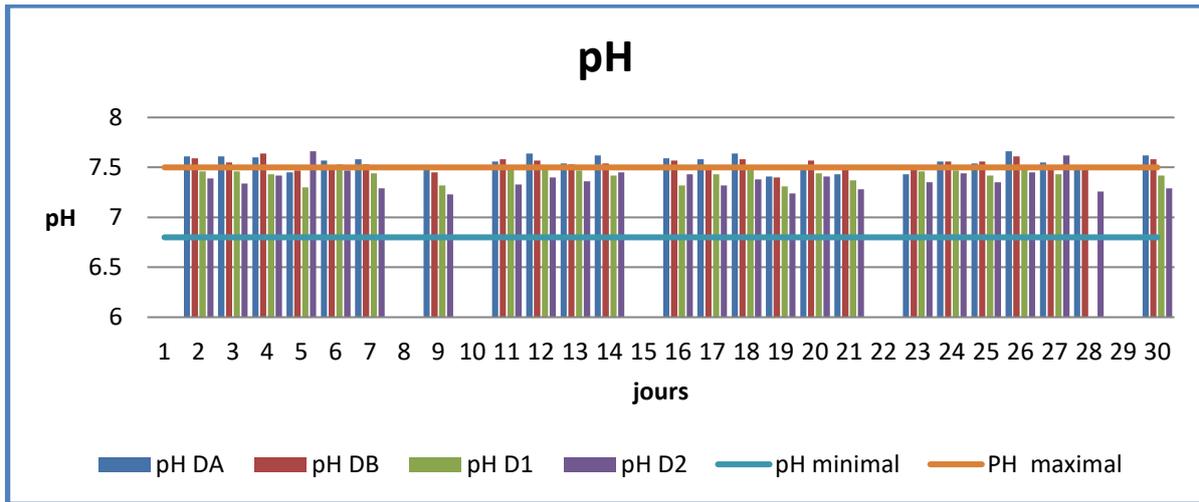


Figure 11 : variation du pH en Avril 2018 au niveau des digesteurs

Un maximum de pH est enregistré est de 7.66 au niveau de la phase 1 (DA+DB) et un minimum de 7.23 au niveau de la phase 2 (D1+D2).

Le taux élevé du pH est due à une dégradation complète des acides (acides gras volatils) au niveau des digesteurs

6. La Température

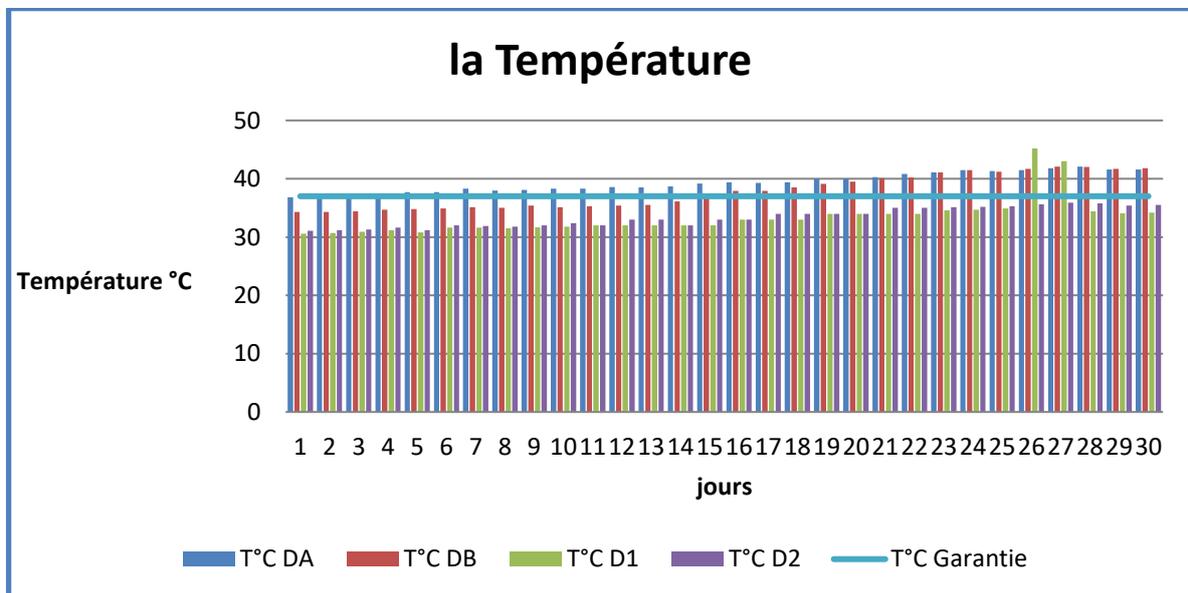


Figure 12: variation journalière de la température dans les deux phases de la digestion

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 30.6°C comme valeur minimale, jusqu'à 42.1°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 brutale sont signes d'un mauvais fonctionnement du digesteur.

7. Le Temps de séjour

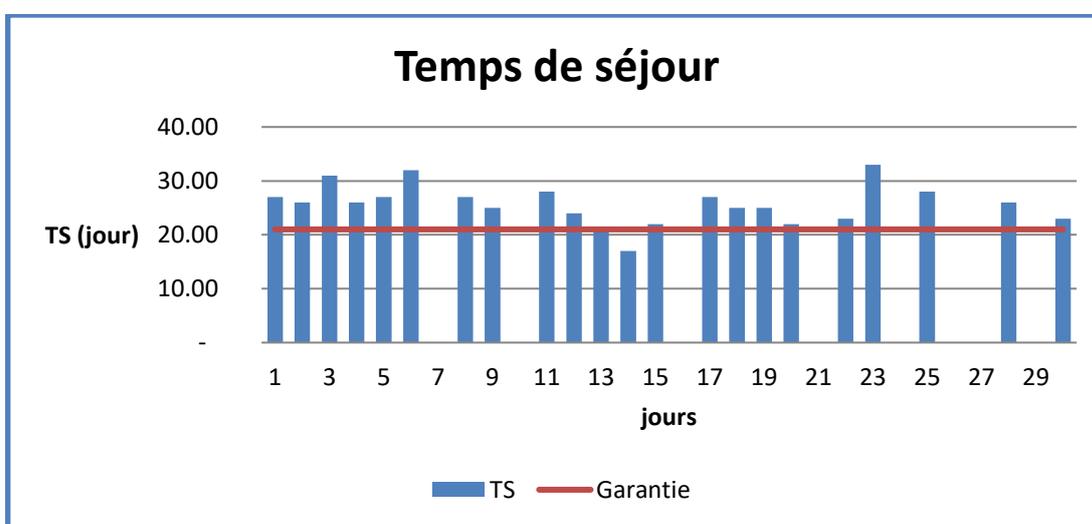


Figure 13 : variation du temps de séjour pendant le mois d'Avril au niveau des digesteurs

Dans le graphe ci-dessus, la plupart des valeurs du temps de séjour sont supérieures à la norme qui est 21 jours, un maximum est enregistré est de 33 jours et un minimum de 17 jours.

Chaque augmentation du temps de séjour de la boue va influencer négativement sur la qualité de la boue et donc sur la production de biogaz, en effet plus la boue devient vieille la matière organique se dégrade totalement en matière minérale.

8. Le Biogaz produit

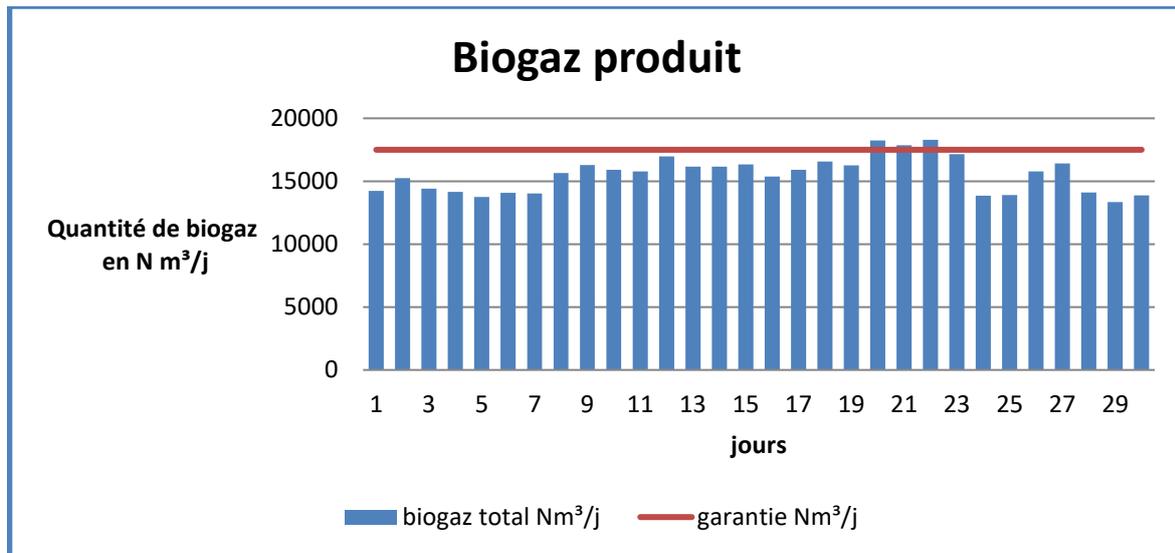


Figure 14 : variation journalière du débit de biogaz produit au niveau des digesteurs

En général la quantité journalière du biogaz produit pendant le mois d'Avril 2018 est inférieure à la garantie (17500Nm³/j) excepté les jours (20, 21,22) .la valeur maximale est de 18 286 Nm³/j et la valeur minimale est de 13886Nm³/j.la chute du débit de biogaz peut être expliquée soit par la diminution de la quantité de la matière organique au niveau des digesteurs c'est-à-dire que la matière en suspension entrée à la station est faible ou le mal traitement de la boue au niveau des épaisseurs ou les flotateurs. Elle peut être aussi expliquée par la mauvaise réduction de la MSV au niveau des digesteurs.

Discussion des résultats :

La station de traitement des eaux usées de la ville de Marrakech a traité durant le mois d'Avril un débit moyen journalier de 112.943 m³/j, soit une augmentation de 24,5% par rapport au débit moyen nominal.

Les événements pluvieux relativement élevés enregistrés pendant ce mois engendrent une surcharge importante en MES et en matière organique.

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

La production de la boue n'a pas connu d'amélioration notable. Cela est la résultante de problème de l'extraction de boue suite aux différents problèmes au niveau des pompes d'aspiration des épaisseurs ainsi que les arrêts fréquents des pompes de la fosse de mélange.

Il est à noter que la charge d'extraction de la boue flottée est de 16.793 Kg/j est insuffisante et reste très faible par rapport à la charge nominale 27.307 Kg/j.

La faible concentration moyenne de la boue épaissie 43.1g/L au lieu de 70g/L et celle de la boue flottée qui est 35.5g/L au lieu de 45 g/L ont influencé directement sur la quantité de la matière sèche entrée aux digesteurs, cela induit à une diminution de la concentration de la matière sèche volatile. Donc la quantité de la réduction des AGV va être faible ce qui va influencer négativement sur la production de biogaz.

Des changements des caractéristiques physico-chimiques tel que la température qui varie de 30.6°C jusqu'à 45.2°C. Ceci induit à une mauvaise biodégradation de la matière organique au niveau des digesteurs.

Pour l'évolution de l'alcalinité, il y a des variations au niveau du mois d'Avril. À chaque fois le TAC augmente, on remarque l'augmentation des AGV qui arrivent jusqu'à 552mg/L dépassant la valeur optimale de 500 mg/L.

A partir des analyses précédentes chaque augmentation de TAC est associée à une forte concentration en AGV dans le digesteur. Cela conduit à l'équilibre de pH au niveau des digesteurs.

Pour ce qui concerne le pH, il n'y a pas une grande variation durant ce mois car au niveau des digesteurs à chaque fois que le pH varie, il y a automatiquement l'ajout de la soude s'il devient plus acide et FeCl₃ s'il est plus basique pour qu'il soit toujours neutre ou proche de la neutralité.

Le temps de séjour de la boue influence aussi sur la production de biogaz, en effet quand la boue séjourne plus de temps au niveau des digesteurs la dégradation de la matière organique devient faible ce qui induit à une diminution de la production de biogaz.

C'est le cas où le temps de séjour est égal à 28 j la production de biogaz à été de 13912Nm³ inférieure à la garantie (17500Nm³).

Durant le mois d'Avril, les paramètres qui ont influencé beaucoup sur la production de biogaz sont la matière en suspension entrée aux digesteurs qui a été faible et la variation élevée de la température qui résulte un mal fonctionnement de la digestion.

II. Interprétations des moyennes des mois (juillet, août septembre) 2017 et (février, mars, avril) 2018 : (voir annexe 2)

1. Analyses :

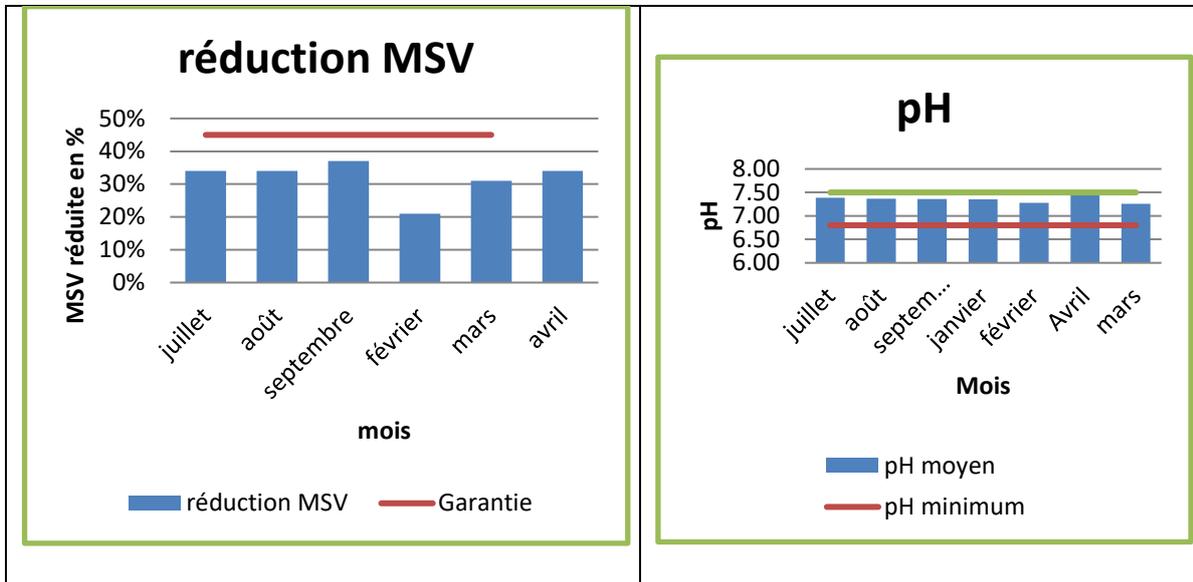


Figure 15 :
variations mensuelles de la réduction de la matière sèche volatile

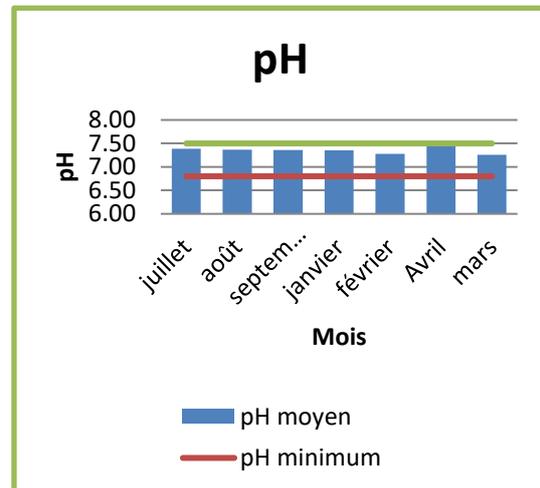


Figure 16 :
variations mensuelles de pH

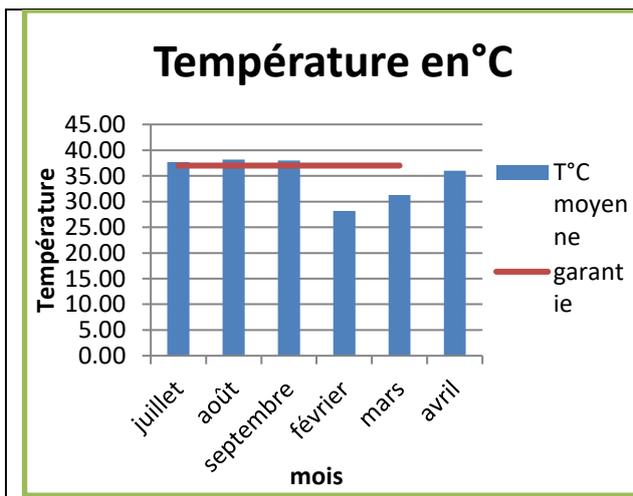


Figure 17 :
variations mensuelles de la température

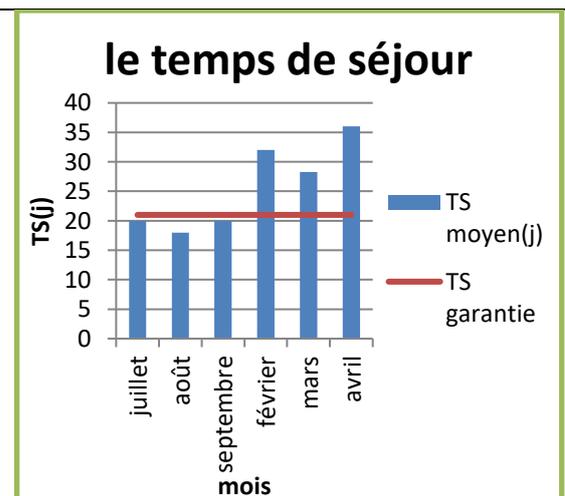
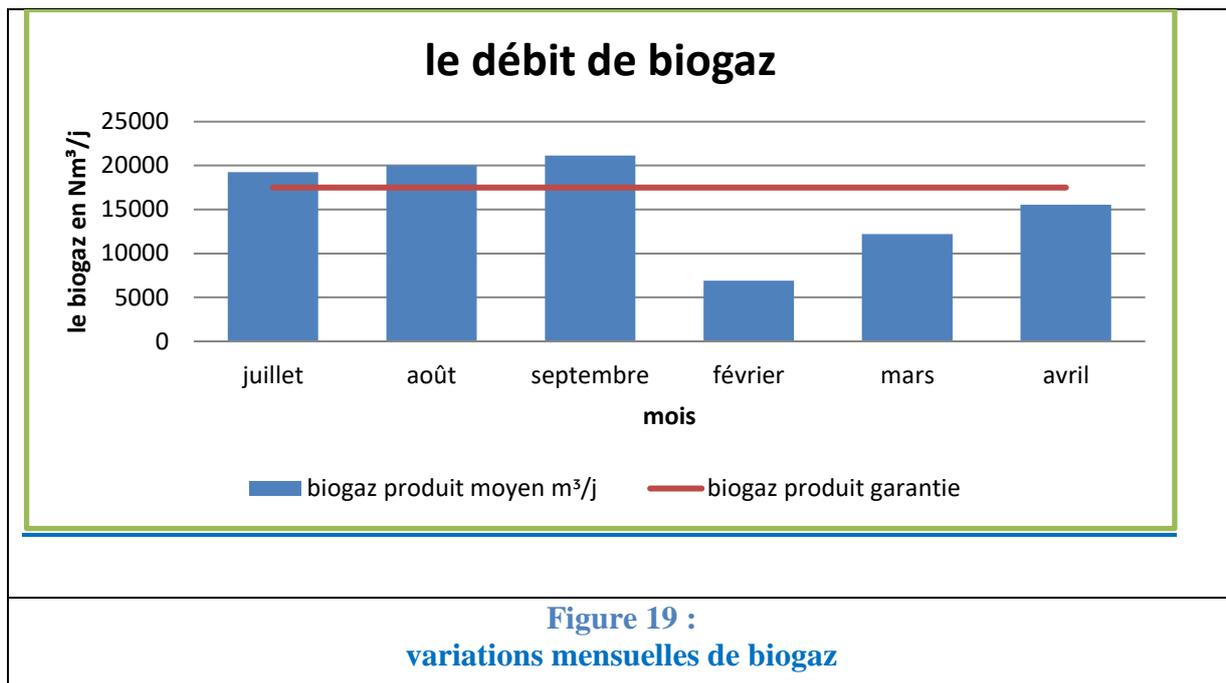


Figure 18
variations mensuelles du temps de séjour



2. Interprétations :

- **Figure 15 :**

-La figure montre des variations mensuelles importantes de la concentration de la MSV réduite au niveau des digesteurs. En effet la concentration de réduction MSV est faible par rapport à la garantie et cela peut être expliqué par le taux faible de la matière organique entrée aux digesteurs.

- **Figure 16 :**

-Le pH mensuelle varie faiblement et n'a pas dépassé la garantie. Donc la variation des saisons n'influence pas sur le pH.

- **Figure 17 :**

-La variation des valeurs moyennes de la température est très marquée au niveau de ces mois .En effet des valeurs sont supérieures à la norme sont enregistrées durant l'été (juillet, août et septembre) et d'autres inférieures à la norme durant l'hiver et le printemps (février, mars et avril).Donc l'atmosphère influence sur la température des boues même si il ya le chauffage thermique de ces dernières.

Ce paramètre influence sur la production de biogaz et c'est le cas de mois février où la température moyenne égale à 28.15°C au lieu de 37°C et le biogaz produit égal à 3451.5 Nm³/j au lieu de 17500 Nm³/j.

- **Figure 18 :**

La figure 19 montre des variations saisonnières du temps de séjour. En effet pendant l'hiver les valeurs de TS sont plus élevées que l'été. Un maximum est enregistré en Avril (36j) qui est supérieur à la garantie et un minimum en août (18j).

Chaque augmentation du temps de séjour influence négativement sur la production de biogaz.

- **Figure 19 :**

-Les mois août et septembre sont marqués par une augmentation du débit du biogaz produit d'une valeur de 21155Nm³/j qui traduit un excès en matière organique fermentée.

Cependant le mois de février est marqué par une baisse considérable du débit de production du biogaz, arrivant jusqu'à 6903Nm³/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. Il peut être aussi expliqué par la variation brutale de la température au niveau des digesteurs ce qui induit à une inhibition de la méthanisation.

III. Solutions proposées :

- **La Co-digestion:**

Nous avons choisis cette solution car elle permet de valoriser la production de biogaz par la digestion anaérobie.

1. **Définition de Co-digestion :**

La Co-digestion anaérobie est un mélange de deux ou plusieurs substrats avec des caractéristiques complémentaires, de sorte qu'il y ait une augmentation de la production de biogaz par leur traitement conjointe.

Exemple de substrats : les margines :

Les margines présentent un rejet fortement pollué sous forme de liquide résiduel dont la composition est variable. Cette variabilité dépend du type d'olives (l'espèce picholine

marocaine est le plus dominante au Maroc) du degré de leur maturation (selon la période de collecte),

Les margines renferment deux fractions, l'une en suspension essentiellement formée de la pulpe d'olives et l'autre soluble contenant les sucres, les lipides, les acides organique

Les margines brutes ne peuvent être méthanisées qu'après leur dilution. En effet certains composés des margines brutes essentiellement de type polyphénols, s'accumulaient et inhibaient la méthanisation.

Le prétraitement des margines par est donc une alternative pour diminuer la toxicité des margines et augmenter les rendements en méthane par l'alimentation des bactéries présentent aux digesteurs.

2. Technique d'utilisation des Co-substrats :

Les Co-substrats sont généralement prétraités avant d'être envoyés aux digesteurs.

Ils sont broyés en fines particules afin de faciliter la réaction biologique ou malaxés pour obtenir un intrant homogène.

Ces éléments sont envoyés dans des silos aux digesteurs.

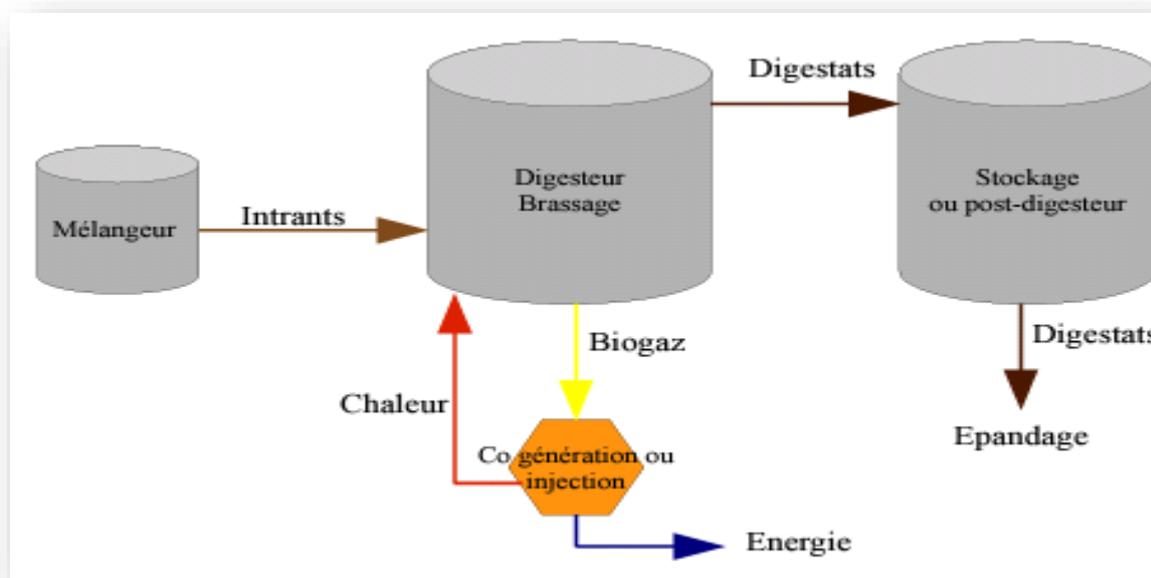


Figure 20 : schéma illustrant l'ajout des Co-substrats dans le digesteur (la méthanisation de la matière organique)

3. Avantages de la Co-digestion:

- L'ajout de Co-substrat à potentiel méthanogène peut permettre d'améliorer la production de biogaz

- Le Co-substrat d'une teneur faible en azote baisse le coût d'investissement de traitement des déchets avec un rendement de biogaz important.
- Une technologie techniquement réalisable et économiquement efficace pour la suppression ou la neutralisation des substances toxiques, réfractaires à la digestion anaérobie
- Elle joue un rôle dans la bioremédiation des écosystèmes pollués par des produits chimiques.

4. **Inconvénients de la Co-digestion :**

- Il existe des Co-substrats à potentiel méthanogène élevé mais leur teneur en azote peut limiter leur utilisation.
- Le coût d'investissement de méthanisation augmente proportionnellement avec l'augmentation du volume des traités.

Conclusion générale :

L'un des problèmes que rencontre le Maroc aujourd'hui réside principalement dans le manque de ressources en eau qui affiche un état inquiétant en l'absence de stratégies efficaces et efficaces de la gestion des eaux naturelles et des eaux usées.

Marrakech est l'une des villes qui a connu ces derniers temps une forte augmentation de la population et une forte urbanisation. Il en résulte ainsi une augmentation du taux de consommation et d'usage d'eau et par conséquent une augmentation des volumes des eaux usées rejetées.

D'où la nécessité de prendre des mesures d'urgence pour augmenter les stations d'épuration des eaux usées mais aussi de leur modernisation.

A la station d'épuration de Marrakech, le principe consiste à réduire la boue afin de produire le biogaz par la digestion anaérobie qui constitue l'une des techniques fondamentales à la station.

Selon les analyses effectuées au laboratoire, on est arrivé à suivre le fonctionnement de la méthanisation. En effet la digestion anaérobie est contrôlée par des paramètres externes (les saisons) et internes (MS, concentration en MSV, température, pH, AGV et TAC).

Les résultats trouvés indiquent que la production de biogaz n'est pas toujours conforme à la norme (17500 m³/j), cette variation est liée à la température saisonnière et à la matière en suspension entrée à la station. Ajoutant à cela les digesteurs de la première phase ont connu une production de biogaz plus importante que celle de la deuxième phase et cela à cause de l'alimentation des digesteurs de la première phase par les graisses du prétraitement.

A la lumière de ces résultats, nous avons proposé des solutions de remédiation pour une meilleure optimisation du traitement de la boue, l'utilisation de la Co-digestion en ajoutant des Co-substrats qui contiennent des quantités importantes de la matière organique aux digesteurs (solutions proposées), afin d'obtenir une bonne qualité de 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 :

- **Bakkal-Bennani.,** (2012) : Optimisation du fonctionnement de la station d'épuration des eaux usées de Marrakech.
Mémoire de fin d'étude, Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech, 78p.
- **Doumali-Eladnani.,** (2013) : 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.
Mémoire de fin d'étude, Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech, 90p.
- **RADEEMA,** (2009): Réalisation de la deuxième phase et exploitation de la station d'épuration de Marrakech.
Note process, 137p.
- **KE-AB-HG,** (2018) : Rapport d'exploitation mensuelle, 53p

Webographie :

- <https://www.memoireonline.com/11/13/7708/Etude-sur-la-fermentation-methanique-des-boues-activees-de-la-station-d-epuration-de-Boumerdes-en.html>
- http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0405/beiere/4/html/binome3/proc_met.htm
- http://www.orne.gouv.fr/IMG/pdf/Guide_Methanisation_Orne_origine_corrige_2_5_02_2015_cle7a1b47.pdf
- <http://www.biogaz-energie-renouvelable.info/index.html>
<http://www.enseeiht.fr/fr/index.html>
- www.memoireonline.com

Annexes:

Annexe1 : Tableaux des moyennes mensuelles :

	réduction MSV	Garantie
Juillet	34%	45%
Août	34%	45%
Septembre	37%	45%
Février	21%	45%
Mars	31%	45%
Avril	34%	45%

Analyses de la MSV réduite

	TS	
	moyen(j)	garantie
juillet	20	21
août	18	21
septembre	20	21
février	32	21
mars	28,3	21
avril	36	21

Analyses du temps de séjour au niveau des digesteurs

Mois	T°C moyenne	Garantie
Juillet	37,68	37
Août	38,18	37
Septembre	38,00	37
Février	28,15	37
Mars	31,3	37
Avril	36,00	37

Analyses de la température des digesteurs

Mois	pH moyen	pH minimum	pH maximum
Juillet	7,39	6,8	7,5
Août	7,37	6,8	7,5
Septembre	7,36	6,8	7,5

Janvier	7,35	6,8	7,5
Février	7,28	6,8	7,5
Avril	7,48	6,8	7,5
Mars	7,26	6,8	7,5

Analyses du pH dans les digesteurs

	biogaz produit	
	moyen m ³ /j	Garantie
Juillet	19239	17500
Août	20013	17500
septembre	21155	17500
Février	6903	17500
Mars	12210	17500
Avril	15155	17500

Analyses de biogaz dans les digesteurs

Annexe 2 : Rapport mensuel des analyses de la digestion des boues en mois d'Avril 2018

Alimentation de la digestion			Paramètres process de la digestion																
journées	MSV/MS (p1)	MSV/MS (p2)	T°C				AGV (mg/L)				Alcalinité (g/L)				PH				
			D A	D B	D1	D2	D A	D B	D 1	D 2	D A	D B	D 1	D 2	D A	D B	D1	D2	
1	65%	68%	36,8	34,3	30,6	31,1													
2	67%	70%	37,3	34,3	30,7	31,2	28,8	30,0	34,8	37,2	2,8	2,5	2,6	2,5	7,61	7,59	7,46	7,39	
3	81%	73%	37,5	34,4	30,9	31,3									7,61	7,55	7,46	7,34	
4	69%	71%	37,5	34,7	31,2	31,6	25,2	31,2	32,0	34,5	2,4	2,7	2,6	2,4	7,67	7,44	7,43	7,42	

5	67%	69%	37,7	34,8	30,8	31,2	32,4	31,2	34,8	48,0	3,4	3,5	2,8	2,5	7,4,5	7,4,7	7,3	7,6,6	
6	65%	68%	37,7	34,9	31,6	32,32	26,4	30,0	34,8	38,4	2,8	2,7	2,5	2,5	7,5,7	7,5,7	7,5,3	7,4,7	
7	66%	69%	38,3	35,1	31,6	31,9									7,5,8	7,5,3	7,4,4	7,2,9	
8	67%	72%	38,38	35,35	31,5	31,8													
9	66%	71%	38,1	35,4	31,7	32,32	32,4	27,6	28,8	28,8	3,4	3,3	3,1	3,3	7,5,7	7,4,5	7,3,2	7,2,3	
10	70%		38,3	35,1	31,8	32,4													
11	69%	71%	38,3	35,3	32,32	32,32	30,0	33,6	36,0	28,8	3,2	3,4	3,3	3,1	7,5,6	7,5,8	7,5,7	7,3,3	
12	49%	70%	38,6	35,4	32,32	33,33	36,5	37,5	34,8	39,6	2,8	2,8	2,6	2,2	7,6,4	7,5,7	7,5,2	7,5,7,4	
13	68%	68%	38,5	35,5	32,32	33,33	31,2	28,8	43,2	36,0	3,3	3,8	3,8	3,7	7,5,4	7,5,3	7,4,7	7,3,6	
14	59%	70%	38,7	36,1	32,32	32,32									7,6,2	7,5,4	7,4,2	7,4,5	
15	63%	70%	39,2	37,2	32,32	33,33													
16	65%	70%	39,4	37,9	33,33	33,33	33,6	37,2	38,4	34,8	3,2	3,3	3,4	3,1	7,5,9	7,5,7	7,3,2	7,4,3	
17	64%	66%	39,3	37,9	33,33	34,34									7,5,8	7,5,7	7,4,3	7,3,2	
18	66%	74%	39,4	38,5	33,33	34,34	28,8	33,6	34,0	31,2	3,3	2,9	2,9	2,6	7,6,4	7,5,8	7,5,1	7,3,8	
19	43%	74%	40,40	39,1	34,34	34,34	40,8	46,8	52,8		3,9	4,1	3,8	3,8	7,4,1	7,4,7	7,3,1	7,2,4	
20	67%	69%	40,40	39,5	34,34	34,34	36,8	42,1	41,2	37,4	2,8	3,1	3,2	2,8	7,4,9	7,5,7	7,4,4	7,4,1	
21	62%	69%	40,40	40,40	34,34	35,35									7,4,7	7,5,7	7,3,7	7,2,7	

			3	1											3		7	8	
22	61%	69%	40,8	40,2	34	35													
23	65%	69%	41,1	41,1	34,6	35,1	27,6	36,0	36,0	38,4	3,8	3,8	3,9	3,8	7,4,3	7,5	7,4,6	7,3,5	
24	64%	73%	41,5	41,5	34,7	35,2									7,5,6	7,5,6	7,4,7	7,4,4	
25	67%	75%	41,3	41,2	34,9	35,3	28,8	27,6	37,2	55,2	3,6	3,8		3,4	7,5,4	7,5,6	7,4,2	7,3,5	
26	60%	72%	41,5	41,7	45,2	35,6	39,2	40,8	44,5	38,8	3,2	3,5	4,2	3,3	7,6,6	7,6,1	7,5,1	7,4,5	
27	60%	68%	41,8	42,1		35,9	36,0	24,0		40,8	3,9	3,9		3,8	7,5,5	7,5,2	7,4,3	7,6,2	
28		69%	42,1		34,4	35,8									7,5,1		7,5		7,2,6
29	60%	66%	41,6	41,7	34,1	35,4													
30		65%	41,6	41,8	34,2	35,5	39,8	42,8	41,8	38,8	3,3	3,4	3,6	3,7	7,6,2	7,5,8	7,4,2	7,2,9	

Jours	MS		Réduction MSV		MSV digérée		TS
	DA+DB	D1+D2	DA+DB	D1+D2	DA et DB	D1 et D2	
1	39,38	37,35	38%				27,00
2	35,82	39,29	37%	36%	62%		26,00
3	30	36,85	32%	31%	63%	64%	31,00
4	34,78	38,31	37%	34%	68%	69%	26,00
5	36,27	36,09	39%	35%	63%	66%	27,00
6	36,92	28,24		32%	61%	65%	32,00
7	25,15	34,78		25%		68%	
8	47,31	30,83	36%	28%		75%	27,00
9	50	37,18			64%	72%	25,00
10	41,57		34%	31%			
11	47,25	29,72	38%	30%	66%	69%	28,00
12	45,1	48,57	41%	36%	62%	70%	24,00
13	46,47	34,12	35%	39%	59%	64%	21,00
14	53,39	22,63		39%	65%	61%	17,00
15	55,08	31,71	36%	33%		61%	22,00
16	44	34,29	38%	35%	64%	67%	
17	40,62	41,66	26%	33%	62%	65%	27,00
18	40,1	39,73	31%	34%	74%	67%	25,00
19	44,19	37,43	33%	29%	69%	66%	25,00
20	45,07	38,55	32%	29%	67%	71%	22,00
21	43,23	35,07		31%	68%	71%	
22	44,92	35,22	29%	37%		69%	23,00
23	30,15	35,94	38%	31%	71%	63%	33,00
24	49,22	29,59	35%	28%	62%	69%	
25	48,66	37,33	36%	30%	65%	72%	28,00
26	58	44,44	38%	29%	64%	70%	
27	69	32,94			62%	71%	
28		27,54		48%			26,00
29	38,5	22,42				52%	
30		26					23,00

