

Département des Sciences de la Terre

Licence ès Sciences et Techniques Eau & Environnement

Mémoire de Fin d'Études

ANALYSE DE LA PERFORMANCE DU PROCÉDE DE LA DIGESTION ANAÉROBIE DES BOUES DE LA STEP DE MARRAKECH

Réalisé par : Wilson Mildred Chuka & Borbor Steward

Soutenu : **Le 28 Juin 2017**

Devant le jury composé de :

- Pr. REDDAD A. : FST- Marrakech, Encadrante
- Pr. KHAMLI N. : FST – Marrakech, Examineur
- Mr. Bissi Y. & Mr. Al-mansoure T. : STEP- RADEEMA, Co-encadrants

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2016-2017

Remerciement

Au terme de ce travail, il nous est agréable de nous adresser à toute personne qui a participé de près et de loin à son élaboration.

Nous tenons à remercier en premier lieu, le corps professoral et administratif de la Faculté des sciences et technique de Marrakech, pour leur dévouement à améliorer la qualité de notre formation.

Nos vifs remerciements sont adressés à notre encadrante Madame Reddad Aicha, Professeur au Département des Sciences de la Terre, à la Faculté des Sciences et Techniques qui a fait preuve d'une grande patience et disponibilité à notre égard et qui nous a permis, grâce à ses conseils constructifs, de mener à bien notre stage.

Nous adressons également notre gratitude à Mr. Bissi Yassine, ingénieur et chef de division de la STEP et Réutilisation, et Mr. Almansoure Tarik qui ont accepté de nous encadrer et nous diriger le long de ce travail.

Nos sincères remerciements vont aussi aux membres du jury pour avoir accepté de juger notre travail.

Par ailleurs, la réalisation de ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien moral et effectif de nos familles. On remercie donc nos parents pour leur appui et leur soutien durant toutes nos années d'étude.

Toutes ces personnes et d'autres encore ont contribué au bon déroulement de notre stage et à la rédaction de ce mémoire. Pour elles, MERCI.

Résumé

La digestion anaérobie ou méthanisation est le processus naturel biologique de dégradation de la matière organique en absence d'oxygène. La digestion anaérobie des boues de station d'épuration (STEP) est largement appliquée, généralement sur les stations de grandes capacités (>50 000 EH). La STEP de Marrakech est l'une des plus grandes STEP au Maroc avec une capacité de 1 300 000 EH. Elle est basée sur le procédé « boues activées » et génère ainsi une quantité notable de boues. Leur traitement consiste en une digestion anaérobie suivie d'une étape de déshydratation, ce traitement est couplé à une valorisation du biogaz produit par cogénération.

L'objectif de l'étude est de suivre les différents paramètres des boues avant et après digestion, ainsi que la production de biogaz afin d'en tirer les améliorations à apporter et les corrections à faire. La méthodologie adoptée a été la mesure quotidienne de plusieurs paramètres de digestion, à savoir la charge massique, la température, le pH, le temps de séjour, la teneur en Acides gras volatils (AGV) des boues et l'Alcalinité. Les performances de la digestion ont pu être suivies grâce au taux d'abattement de la matière organique, au volume de biogaz produit, au ratio du biogaz produit par masse de matières volatiles éliminées et à sa teneur en H₂S.

Le suivi des paramètres depuis octobre de 2016 jusqu'au mars de 2017 a permis de mettre en exergue que les conditions requises pour une bonne digestion sont respectées au sein de la STEP de Marrakech. Néanmoins, un faible taux d'abattement des Matières Volatiles Sèches (MVS) et une forte teneur en H₂S du biogaz ont été constatés. Ce faible taux d'abattement des MVS est dû aux réponses des problèmes observés dans les digesteurs ; et presque toute la quantité de H₂S produit est éliminée durant la désulfurisation. Pour cela, un suivi régulier est recommandé.

Abstract

Anaerobic digestion or methanization is a series of biological processes in which microorganisms break down biodegradable materials in the absence of oxygen. The anaerobic digestion of sewage sludge is largely applied, generally on the great capacities stations (> 50,000 EH). The water treatment plant of Marrakesh has a capacity of 1,300,000 EH. It is based on the process “activated sludge” and so generates a considerable quantity of muds. Their treatment consists of an anaerobic digestion followed by a stage of dehydration; this treatment is coupled with a valorization of the biogas produced by cogeneration.

The aim of the study is to follow the various parameters of muds before and after digestion, as well as the production of biogas in order to draw from them the necessary improvements and corrections. Adopted methodology was a daily measurement of the digestion parameters, namely the mass load, temperature, pH, residence time, volatile fatty acids of muds and alkalinity. The performances of digestion could be followed by the rate of the abatement of the organic matter, the volume of produced biogas and its content in H₂S.

The follow-up of the parameters from October 2016 to March 2017 allowed to put forward that the requirements for a good digestion are observed within the water treatment plant of Marrakesh. Nevertheless, a low level of abatement and a strong content of H₂S of biogas were noticed. This low level of abatement of Volatile dry matters is due to the action taken to eliminate few problems that were observed in the digesters. And almost all the quantity of H₂S produced is eliminated during the desulfurization process. For that purpose, a regular follow-up of the digestion process is recommended.

Glossaire

Acides gras volatils (AGV) : acides organiques saturés à chaîne courte, produits lors de la fermentation anaérobie (principalement acétate, acide propionique, acide butyrique).

Aérobic - Aérobie : désigne une situation dans laquelle l'oxygène est présent à l'état dissous.

Alcalinité - T.A.C : le Titre alcalin complet (TAC) correspond à la teneur de l'eau en carbonates et hydrogénocarbonates (CO_3^{2-} et HCO_3^-). Il est équivalent à l'alcalinité. Le TAC s'exprime en degrés français (°F) :

$1^\circ \text{F} = 6 \text{ mg.L}^{-1} \text{ CO}_3^{2-}$ (carbonate) = 10 mg carbonate de calcium

$1^\circ \text{F} = 1/5$ milliéquivalent.

Anaérobie - Anaérobiose : désigne une situation dans laquelle l'oxygène est totalement absent, qu'il soit libre (O_2) ou lié à une molécule type nitrate (NO_3^-), nitrite (NO_2^-).

Anoxie : désigne une situation dans laquelle l'oxygène libre dissous est absent mais présent sous forme liée (nitrate et/ou nitrite).

Azote : il est nécessaire de connaître ses différentes formes : N- NO_3^- : nitrate, N- NO_2^- : nitrite, N- NH_4^+ : azote ammoniacal, N.T.K. : Azote total Kjeldahl (azote organique + azote ammoniacal), N.G.L : ensemble de l'azote sous toutes ses formes.

Bactérie : organisme vivant de taille microscopique ayant besoin pour se développer de tous les éléments qui constituent sa structure cellulaire, c'est-à-dire : C, H, O, N, P, S... Ces éléments se trouvent dans les eaux usées sous forme de molécules plus ou moins complexes : glucides (sucres, amidon, cellulose), protéines, lipides (matières grasses, hydrocarbures...).

Boue activée : amas biologique (floc) formé, au cours du traitement d'une eau résiduaire, par la croissance de bactéries et d'autres microorganismes en présence d'oxygène dissous.

Capacité nominale : débits et charges maximaux de l'influent à traiter pour lesquels les installations sont conçues pour être en conformité avec le niveau de rejet requis.

Charge hydraulique : rapport du débit reçu sur la capacité hydraulique nominale de la station. Elle s'exprime en pourcentage de la capacité nominale.

Charge massique (C_m) : flux de DBO_5 entrant par jour dans le système biologique par unité de masse de matières en suspension ou de matières volatiles en suspension. La charge massique s'exprime en $\text{kg DBO}_5.\text{kg}^{-1} \text{ MVS.j}^{-1}$. On distingue ainsi les procédés à faible charge, moyenne charge et forte charge massique.

Charge organique : rapport de la pollution reçue sur la capacité nominale de la station. Elle s'exprime en pourcentage du flux nominal en DBO_5 .

DBO_5 - Demande biochimique en oxygène : quantité d'oxygène dissous nécessaire à l'oxydation biologique (par les microorganismes) pendant cinq jours, des matières organiques

contenues dans l'eau. Elle s'exprime en $\text{g O}_2.\text{L}^{-1}$. Elle permet d'évaluer la fraction dégradable de la charge polluante carbonée des eaux usées.

DCO - Demande chimique en oxygène : masse d'oxygène dissous nécessaire à la l'oxydation chimique des matières organiques et/ou minérales contenues dans l'eau. Elle s'exprime en $\text{g O}_2.\text{L}^{-1}$. Elle permet d'évaluer la charge polluante des eaux usées. Dans le cas de rejet en milieu naturel la valeur est plafonnée à 300 mg.L^{-1} (si le flux est inférieur à 100 kg.j^{-1}) et à 125 mg.L^{-1} quand le flux est supérieur. Dans le cas de rejet en station la valeur peut être portée à 2000 mg.L^{-1} (réglementation ICPE).

Débit : volume par unité de temps ($\text{m}^3.\text{jour}^{-1}$, $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$, $\text{m}^3.\text{seconde}^{-1}$)

- Débit de pointe : débit horaire maximal reçu par la station
- Débit moyen 24 h : débit moyen horaire reçu par la station (quantité jour/24)
- Débit temps sec : débit d'eau usée arrivant à la STEP sans être modifié par des chutes de pluies ou des fontes de neige

Dénitrification : réduction des nitrates (NO_3^-) et des nitrites (NO_2^-) en azote gazeux (N_2) par des bactéries en situation d'anoxie. La vitesse de dénitrification est fonction du pH, de la température, de l'absence d'oxygène dissous et de la source de carbone organique.

Digestion anaérobie des boues : procédé anaérobie qui réduit la masse de matières organiques des boues.

Epaississement : procédé qui consiste à augmenter la concentration en solides d'une boue, par élimination de l'eau.

Flottation : montée des matières en suspension dans un liquide vers la surface sous l'effet de l'entraînement par un gaz.

Liqueur mixte : mélange d'eaux usées et de boues activées participant au traitement dans une installation à boues activées.

Matières en suspension (MES) : concentration (en mg.L^{-1}) en matières solides (matières organiques et minérales) contenues dans un liquide. Elles sont déterminées par filtration ou centrifugation, puis séchage dans des conditions définies et contrôlées (étuve à 105°C).

Matières organiques : ensemble des substances d'origine biologique et autres substances oxydables contenues dans un effluent (C, N, P).

Matières sèches (MS) : concentration (en g.L^{-1}) en matières solides et solubilisées dans un liquide. Elles sont déterminées directement par séchage (à l'étuve à 105°C) d'un échantillon brut d'eau ou de boues dans des conditions définies et contrôlées. Les MS se distinguent des MES par la fraction des sels dissous qui peuvent représenter 20-30 % des MES.

Nitrification : oxydation de l'azote ammoniacal (NH_4^+) en nitrite (NO_2^-) (nitritation) puis en nitrate (NO_3^-) (nitratisation). L'étape limitante est généralement la nitritation.

Phosphate (P) : molécule chimique constituée d'atomes de phosphore oxydé. On parle principalement d'orthophosphates (PO_4^{2-}). On distingue : P- PO_4 - phosphates et PT - phosphore total.

pH : potentiel d'hydrogène. Mesure qui reflète l'acidité ou l'alcalinité.

Station d'épuration : ensemble des installations chargées de traiter les eaux collectées par le réseau de collecte des eaux usées avant rejet au milieu naturel.

Temps de séjour en digestion : rapport du volume effectif du digesteur au volume des boues journalièrement introduit. Si du surnageant est soufré, le temps de séjour en digestion est inférieur à l'âge des boues.

Liste d'Acronymes

AGV :	Acides Gras Volatiles
BP :	Boues Primaires
BS :	Boues Secondaires
DBO ₅ :	Demande Biologique en Oxygène pendant 5 jours
DCO :	Demande Chimique en Oxygène
EH :	Equivalent Habitant
MES :	Matières En Suspension
MS :	Matières Sèches
MVES :	Matières Volatiles En Suspension
MVS	Matières Volatiles Sèches
pH :	Potentiel Hydrogène
RADEEMA :	Régie Autonome de Distribution d'Eau et d'Electricité de Marrakech
STEP :	Station d'Épuration
TAC :	Titre Alcalimétrique Complet
TRH :	Temps de Rétention Hydraulique
UV :	Ultra-Violet

Remerciements.....	i
Résumé.....	ii
Abstract.....	iii
Glossaire.....	iv
Liste des Acronymes.....	vii
Liste des Figures.....	xi
Liste des Tableaux.....	xii

Première PARTIE GENERALITE DE LA STEP DE MARRAKECH

Introduction Générale.....	1
Problématique et Méthodologie.....	2
I. Présentation de l'Organisme d'accueil.....	3
I.1. Situation Géographique de la STEP.....	5
I.2. Objectif de la STEP de Marrakech.....	5
II. Traitement des Eaux Usées de la STEP.....	6
II.1. Prétraitement.....	6
II.2. Traitement Primaire.....	7
II.3. Traitement Secondaire ou Biologique.....	8
II.4. Traitement Tertiaire.....	10
III. Traitement des Boues de la STEP.....	13
III.1. Epaissement.....	13
III.2. Flottation.....	13
III.3. Digestion Anaérobie.....	14
III.4. Déshydratation.....	15
IV. Traitement du Biogaz.....	16
V Traitement de l'Air Vicié.....	17

Deuxième PARTIE

Analyse de la Performance du Procédé de la Digestion des boues

Introduction	18
II. Caractéristiques des boues d'épuration	18
II.1 Types des boues.....	18
II.2. Composition des boues d'épuration	18
II.3. Facteurs caractérisant la nature des boues.....	19
III. Digestion Anaérobie	20
III.1. Objectif.....	20
III.2. Processus de la Méthanisation.....	21
III.3. Paramètres de la Digestion Anaérobie.....	22
III.4. Paramètres déterminant la Performance de la Digestion Anaérobie.....	23
IV. Bilan Matière Nominal de la Digestion Anaérobie	24
V. Analyse Statistique	25
VI. Résultat et Interprétation	26
VI.1. Suivi des Paramètres.....	26
VI.1.1. Acides Gras Volatils (AGV).....	26
VI.1.2. Alcalinité.....	30
VI.1.3. pH.....	34
VI.1.4. Température.....	34
VI.1.5. Temps Séjours.....	35
VI.2. Performance du Procédé de la Digestion Anaérobie des boues	35
VI.2.1. Taux de Réduction de MSV.....	35
VI.2.2. Débit du Biogaz Produit.....	39
VI.2.3. Ratio du biogaz/MSV éliminée.....	43

VI.2.4. Teneur en H ₂ S.....	44
VII. Discussion et Recommandation.....	45
VII.1. AGV.....	45
VII.2. Teneur en H ₂ S.....	45
VIII. Conclusion	45

Liste des Figures

Fig. 1 : Organigramme de l'Organisme accueillant (RADEEMA).....	4
Fig. 2 : Situation géographique de la STEP de la ville de Marrakech (RADEEMA,2007).....	5
Fig. 3 : Grille de 10 cm.....	7
Fig. 4 : Grille de 8cm.....	7
Fig. 5 : Grille de 1cm.....	7
Fig. 6 : Dessableur/déshuilleur	7
Fig. 7 : Decanteur Primaire.....	8
Fig. 8 : Les quatre bassins Biologiques.....	9
Fig. 9 :Clarificateur.....	10
Fig.10 :Bassins de coagulation-floculation.....	11
Fig.11 :Filtres à Sables.....	11
Fig.12 : Désinfection UV.....	12
Fig.13 : Chloration.....	12
Fig.14 : Eppaississement gravitaire.....	13
Fig.15 : Flottation.....	14
Fig.16 : Fonctionnement des Digesteurs de la STEP.....	15
Fig.17 : Déshydratation des boues.....	16
Fig.18 : Chéminement du Traitement du Biogaz produit à la STEP.....	16
Fig.19 : Désulfuration.....	17
Fig.20 : Cgénération.....	17
Fig.21 : Gazomètres.....	17
Fig.22 : Torchères.....	17
Fig.23 : Etape des processus da la méthanisation.....	21
Fig.24 : AGV du digesteur 632A pour 2016.....	26
Fig.25 : AGV du digesteur 632A pour 2017.....	26
Fig.26 : AGV du digesteur 632B pour 2016.....	27
Fig.27 : AGV du digesteur 632B pour 2017.....	27
Fig.28 : AGV du digesteur D6301 pour 2016.....	28
Fig.29 : AGV du digesteur D6301 pour 2017.....	28
Fig.30 : AGV du digesteur D6302 pour 2016.....	29
Fig.31 : AGV du digesteur D6302 pour 2017.....	29
Fig.32 : Alcalinité du digesteur 632A pour 2016.....	30
Fig.33 : Alcalinité du digesteur 632A pour 2017.....	31
Fig.34: Alcalinité du digesteur 632B pour 2016.....	31
Fig.35 : Alcalinité du digesteur 632B en 2017.....	32
Fig.36 : Alcalinité du digesteur D6301 en 2016.....	32
Fig.37 : Alcalinité du digesteur D6301 en 2017.....	33
Fig.38 : Alcalinité du digesteur D6302 en 2016.....	33
Fig.39 : Alcalinité du digesteur D6302 en 2017.....	34
Fig.40 : Taux de Réduction de MSV des phases I et II en Octobre 2016.....	36
Fig.41 : Taux de Réduction de MSV des phases I et II en novembtre 2016.....	36
Fig.42 : Taux de Réduction de MSV des phases I et II en décembre 2016.....	37
Fig.43 : Taux de Réduction de MSV des phases I et II en janvier 2017.....	37
Fig.44: Taux de Réduction de MSV des phases I et II en février 2017.....	38
Fig.45 : Taux de Réduction de MSV des phases I et II en mars 2017.....	39

Fig. 46 : Débit du biogaz produit en octobre 2016.....	39
Fig. 47 : Débit du biogaz produit en novembre 2016.....	40
Fig. 48 : Débit du biogaz produit en décembre 2016.....	40
Fig. 49: Débit du biogaz produit en janvier 2017.....	41
Fig. 50 : Débit du biogaz produit en février 2017.....	41
Fig. 51 : Débit du biogaz produit en mars 2017.....	42
Fig.52 : Ratio du biogaz/kg MSV éliminées en 2016.....	43
Fig.53 : Ratio du biogaz/kg MSV éliminées en 2017.....	43

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Les Pollutions à traiter.....	6
Tableau 2 : Abattement garanti du traitement primaire.....	8
Tableau 3 : Composition des boues	19
Tableau 4 : Quantité Nominale des boues avant et après épaissement.....	24
Tableau 5 : Alimentation Nominale de la digestion.....	24
Tableau 6 : Bilan Nominal du biogaz.....	25
Tableau 7 : Alimentation Statistique de la digestion.....	25
Tableau 8 : pH moyens des quatre digesteurs pendant les six mois.....	34
Tableau 9 : Température moyennes des quatre pendant digesteurs.....	35

Introduction Générale

Au cours de ces dernières décennies, le Maroc a connu une évolution progressive touchant tous les secteurs (démographique, économique et touristique). Ceci a causé plusieurs problèmes socio-économiques et surtout environnementaux liés à la rareté des précipitations, aux risques sanitaires, à la carence du pouvoir réglementaire et d'assainissement.

La ville de Marrakech est parmi les villes les plus influencées par ces problèmes. Pour cela, il est nécessaire d'en garantir la disponibilité dans le temps des moyens de forme d'exploitation durable qui permettent de faire face aux exigences actuelles sans menacer l'équilibre environnemental. C'est dans ce sens que la régie autonome de distribution de l'eau de Marrakech a pensé à se doter de sa propre station de traitement des eaux polluées (STEP) qui seront une fois épurées restituées à la nature en vue de la recharge de la nappe phréatique. Cette épuration pourrait également être considérée comme une ressource renouvelable en eau avec un potentiel de 33 millions de m³ par an couvrant ainsi 85% de la demande en eau destinées à l'arrosage des parcours de golfs de la ville.

Dans le cadre de notre projet de fin d'études, nous avons eu l'occasion d'effectuer un stage dans la station de traitement des eaux usées de la ville de Marrakech, afin de suivre les divers traitements que subissent les eaux usées. Le projet consiste à analyser la performance de la digestion anaérobie des boues de la STEP de Marrakech. Les boues peuvent être valorisées pour la production de biogaz et ce dernier est utilisé pour la production des énergies électrique et thermique pour le fonctionnement de la station.

PREMIÈRE PARTIE

GENERALITE DE LA STEP DE MARRAKECH

INTRODUCTION

Les boues d'épuration représentent la part principale des résidus issus des opérations de traitement des eaux usées. Leur devenir constitue un enjeu fondamental de la politique d'assainissement et de protection de l'environnement. La plus ancienne technique mise en œuvre pour réduire les volumes de production de boues est la digestion anaérobie. La valorisation de la biomasse renouvelable est l'une des voies les plus importantes pour lutter contre le réchauffement climatique. GOSH (1997) estime que la valorisation des déchets organiques et des effluents industriels permettrait une réduction de 20% du réchauffement climatique. Cette stabilisation biologique est employée au Maroc par la station d'épuration de Marrakech. Afin d'optimiser les rendements des digesteurs, il est indispensable d'identifier les paramètres influant sur la digestion. Dans ce contexte, la finalité de l'étude est de citer les attentes de ce processus et de réunir les éléments qui permettront de mettre en évidence les performances épuratoires et énergétiques de la station d'épuration. Pour cela, il a été choisi de s'appuyer sur une synthèse bibliographique et d'analyser les données de ce procédé de l'octobre 2016 au mars 2017. La réflexion était enfin amenée à quelques recommandations relatives à une meilleure digestion anaérobie des boues et à une production optimale d'un biogaz plus ou moins pur.

I. Problématique et Méthodologie

Le processus de digestion anaérobie peut être considéré comme inefficace puisque la majeure partie de l'énergie de la matière organique se retrouve dans le méthane contenu dans le biogaz. Les bactéries anaérobies par rapport à leurs homologues aérobies sont très mauvaises pour extraire l'énergie de l'alimentation organique. Seulement environ 5 à 10% de l'énergie transférée des composés organiques complexes vers le méthane est disponible pour les bactéries à utiliser pour la croissance. En conséquence, les bactéries anaérobies ont tendance à être plus lentes et plus sensibles aux changements de conditions qui peuvent entraîner un faible taux d'abattement des MVS et une forte teneur en H₂S du biogaz. Le maintien d'un environnement approprié dans le digesteur est donc essentiel pour un fonctionnement efficace.

L'objectif de l'étude est de suivre les différents paramètres des boues avant et après digestion, ainsi que la production du biogaz afin d'évaluer la performance de la Digestion et d'en tirer les améliorations à apporter et les corrections à faire.

Pour atteindre ces objectifs, on a fait une étude bibliographique pour bien comprendre les caractéristiques des boues d'épuration. On a aussi présenté le Bilan de matière des boues pour citer les attentes de ce processus. Les données des différents paramètres des boues et du biogaz contenues dans les Rapports Mensuels de l'octobre 2016 au mars 2017 étaient utilisées pour faire un suivi de la performance. On a fait une étude comparative entre la situation actuelle et la situation nominale de la digestion afin de donner une conclusion sur la performance de la Digestion Anaérobie de la STEP.

I. Présentation de l'organisme d'accueil

La Régie Autonome de Distribution d'Eau et d'Electricité de Marrakech, connue sous le sigle RADEEMA est un établissement chargé d'assurer la distribution d'eau et d'électricité et le service d'assainissement liquide au sein de la ville de Marrakech. Le périmètre d'intervention de la régie couvre environ 658 km² pour un total de 950 000 habitants.

La RADEEMA a été créée le 01 janvier 1971, en vertu du Décret n°2-64-394 du 29 Septembre 1964 relatif aux Régies communales. Le contrat de construction de la station d'épuration a été signé en 2006. Le fonctionnement de la STEP permet non seulement de traiter les eaux usées mais aussi de produire des Unités de Réduction Certifiées des Emissions de gaz à effet de serre (URCE) qui sont vendues sur le marché international du carbone. Depuis le 22 Février 2013 (notification), la STEP de Marrakech a été inscrite au Mécanisme de Développement Propre par les Nations Unies.

La RADEEMA a obtenu la triple certification QSE ISO 9001 (2008), ISO 14001 (2004), OHSAS 18001 (2007) le 1^{er} mars 2013. Elle a été délivrée par le Cabinet IMANOR.

L'organigramme de la Régie est structuré en quatre niveaux hiérarchiques cumulant 196 postes organiques : Directeur, Chef de département, Chef de division et Chef de service. L'ossature générale de la RADEEMA est articulée autour de 04 Directions et 03 Départements rattachés directement à la Direction (Fig.1).

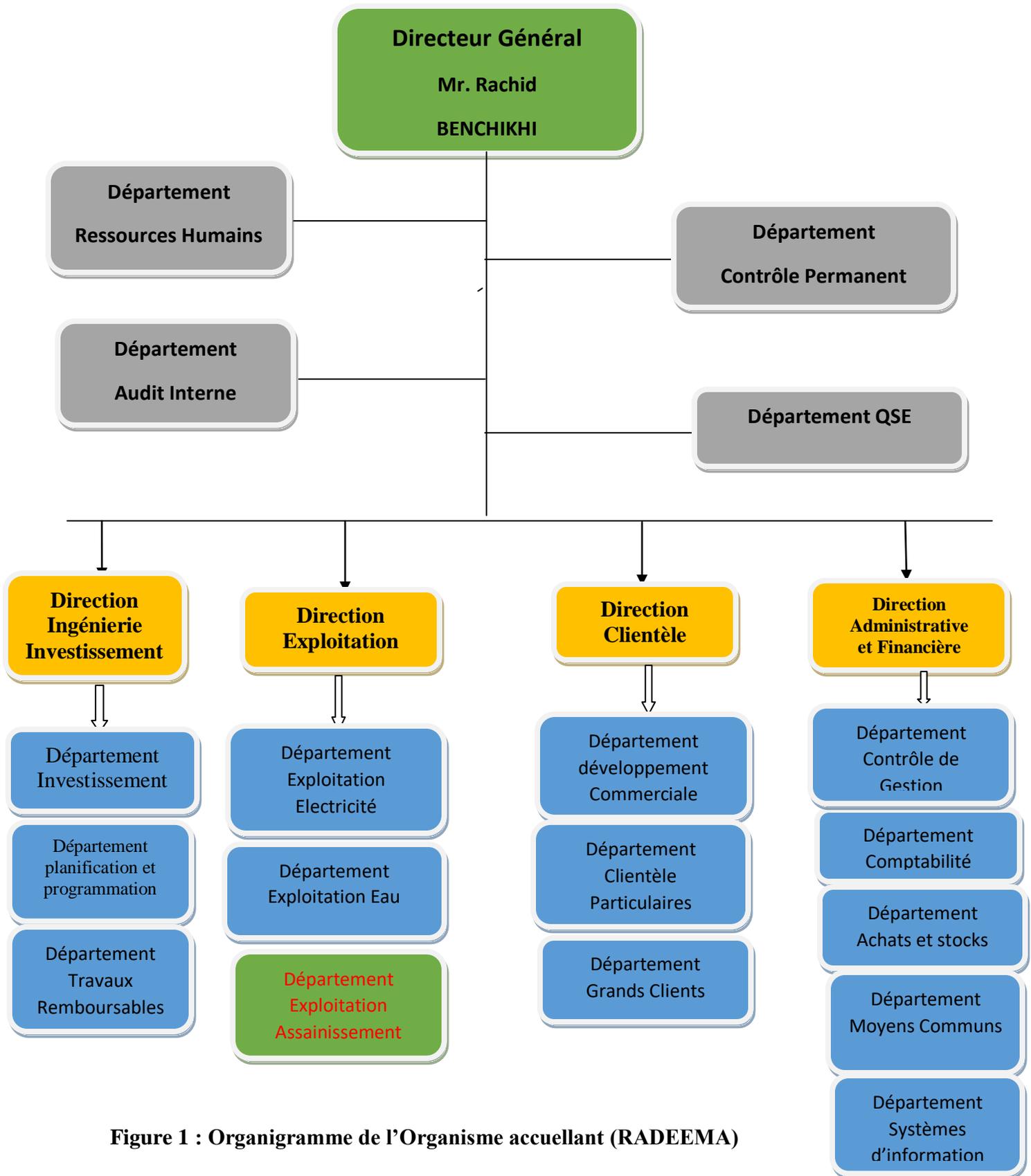


Figure 1 : Organigramme de l'Organisme accueillant (RADEEMA)

I.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE de la STEP

La station d'épuration des eaux usées de la ville de Marrakech est orientée selon un axe Nord / Sud, parallèle à la route de Safi, sur le lit majeur de l'Oued Tensift à proximité du pont longeant la RN7, sur une superficie de 17 ha (Fig.2).

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

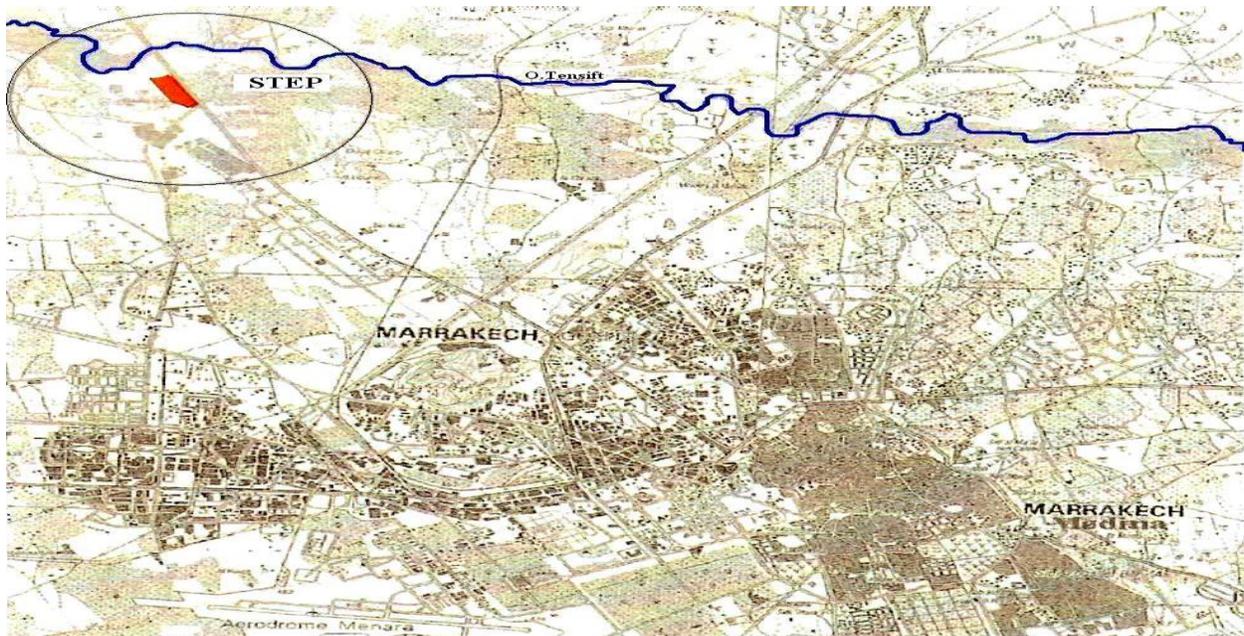


Fig.2- Situation géographique de la STEP de la ville de Marrakech (RADEEMA, 2007)

I.2. Objectif de la STEP de Marrakech

- Protéger le milieu naturel contre la pollution,
- Protéger la santé publique,
- Diminuer le stress hydraulique en mobilisant une ressource en eau non conventionnelles et renouvelable servant à l'irrigation des espaces golfiques existants dans la ville de Marrakech. Le traitement des eaux usées obéit donc à une logique de préservation des ressources en eau,
- Diminuer la quantité de substances polluantes contenues dans les eaux usées,
- Contribuer à la lutte contre les émissions des gaz à effet de serre chaque année,

- Permettre la recharge de la nappe phréatique,
- La station d'épuration de la ville de Marrakech permet le traitement journalier de la pollution de 1.300.000 Equivalents Habitants (tableau1).

Tableau 1 : Les pollutions à traiter

Débit Moyen journalier d'eau	90.720m ³ /jour
MES	53tonnes/jour
DBO5	58tonnes/jour
DCO	144tonnes/jour
NTK	14tonnes/j
Pt	2,6tonnes/j

II. Traitements des eaux usées de la STEP

La station d'épuration des eaux usées rassemble plusieurs dispositifs de traitement. Chaque dispositif est conçu pour extraire au fur et à mesure les différents polluants contenus dans les eaux. Les différentes étapes du traitement des eaux usées sont : le prétraitement, le traitement primaire ou physico-chimique, le traitement secondaire ou biologique et le traitement tertiaire. On peut aussi classer ces traitements en fonctions des types des particules traités- Ligne Eau, Ligne boue et Ligne gaz.

II.1. Prétraitements

Les dispositifs de prétraitement font appel à des procédés mécaniques ou hydrauliques simples et ont pour but d'éliminer les éléments solides ou particuliers les plus volumineux. Le système de dégrillage retient, à l'aide d'une succession de grilles, les déchets volumineux de plus en plus fines (10cm, 8cm 1cm) (fig.3, fig.4, et fig.5). Après cette étape, les eaux usées passent un dessablage et un dégraissage (fig.6) afin d'enlever les sables, les graviers, les graisses et les huiles. Les particules retenues et les sables sont éliminés vers la décharge publique alors que les graisses sont raclées en surface et acheminées vers l'unité de traitement des graisses.



Figure 3. Grille de 10cm



Figure 4. Grille de 8cm



Figure 5. Grille de 1cm

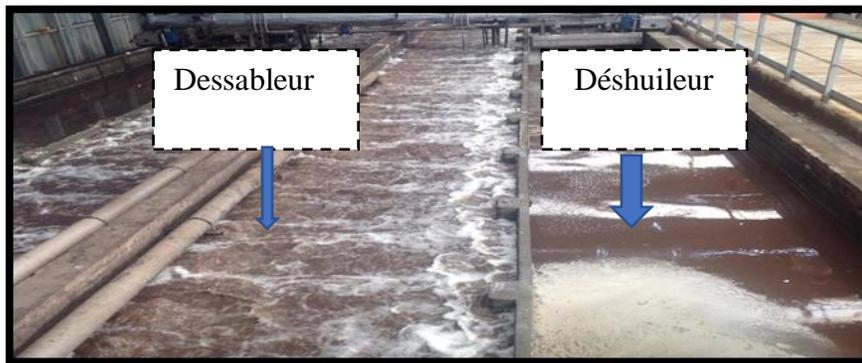


Figure 6. Dessableur / Déshuileur

II.2. Traitement Primaire

Après le prétraitement, il reste dans l'eau une charge polluante dissoute et des matières en suspension. Le traitement primaire ne porte que sur les matières particulaires décantables. Ces traitements se font dans trois décanteurs chacun de diamètres 39m, et de capacité 1200m³ (Fig.7).

Il a pour but d'extraire le maximum de matières en suspension et de matières organiques facilement décantables. Par la voie physique, le principe de séparation solide-liquide est la pesanteur, les matières en suspension ou colloïdales tendent à se séparer du liquide par sédimentation. La décantation nécessite généralement deux heures.

Durant la phase de traitement primaire, une quantité importante de la pollution totale (DBO₅, DCO, MES, NTK, Pt) est éliminée (Tableau 2).

La pollution dissoute n'est que très partiellement traitée. Les matières solides extraites représentent ce que l'on appelle les boues primaires.



Figure 7 : Décanteur primaire

Tableau 2 : Abattement garanti ou estimées pour le traitement primaire

Polluants	Valeurs considérées (%)
DBO5	32
DCO	33
MES	68
NTK	16
PT	10

II.3. Traitement secondaire ou biologique

Au cours de cette phase, les particules organiques (polluants dissous ou solubles) et les nutriments (azote et phosphore) sont éliminés par des microorganismes. L'eau traitée dans les décanteurs entre dans la chambre de répartition et à partir de là l'eau s'écoule par la gravité vers les quatre bassins biologiques où la dégradation biologique prend place (Fig.8).

Le procédé le plus commun est celui des boues activées. L'ajout de micro-organismes permet d'éliminer les polluants notamment l'azote. Pour rendre ce procédé plus rapide, il faut créer des conditions de vie favorable pour les bactéries. Cela a pour but de réduire la « **DBO** » et la « **DCO** ».

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

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

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

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

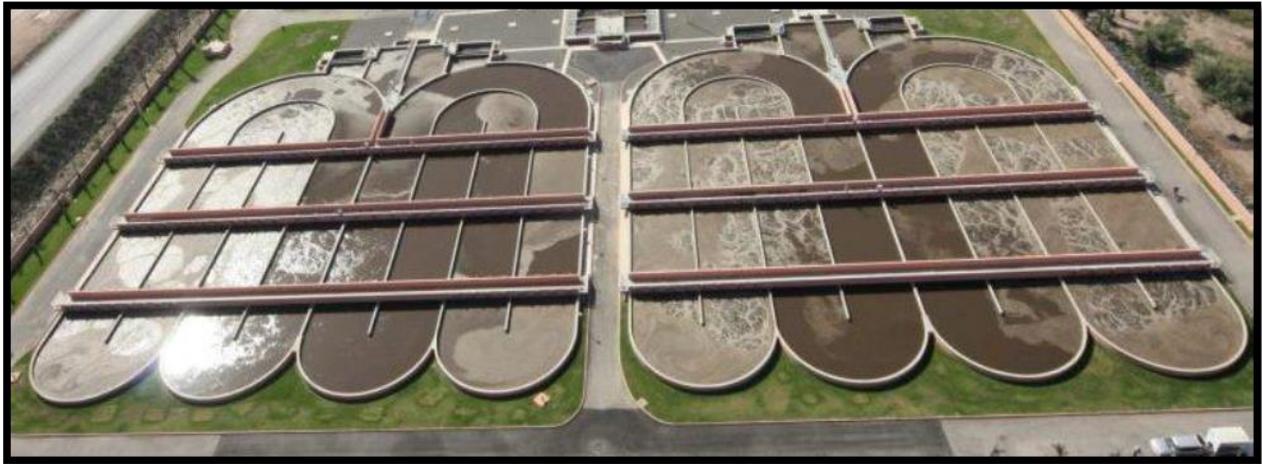


Figure8 : Les quatre bassins biologiques

- **Clarification**

Le mélange « eau-boue » issu du bassin d'aération est mis au repos dans les clarificateurs (fig.9). Les boues, plus lourdes que l'eau, se déposent au fond du bassin par décantation et sont aspirées par un pont tournant, pour être envoyées vers un réservoir spécifique.

Une partie des boues retourne vers le bassin d'aération, afin de maintenir en quantité suffisante la masse bactérienne active. Et l'autre partie des boues (boues secondaires) passent dans le Flottateur où on ajoute des polymères pour les accumuler pour qu'ils puissent être pompés vers les digesteurs.

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



Figure 9 : Clarificateur

II.4. Traitement Tertiaire

Vu les dépenses supplémentaires qu'engendrent le traitement tertiaire, la STEP de Marrakech ne procède à ce traitement qu'en cas de demande pour l'irrigation des golfs. Ce traitement est basé sur une coagulation, floculation, suivie d'une filtration sur des lits de sables puis une désinfection à l'UV.

- **Coagulation-Floculation :**

Ce processus se passe dans les bassins de coagulation-floculation (Fig.10). Il facilite l'élimination des particules solides en suspension et des particules colloïdales. Il est donc utilisé dans l'étape d'une séparation solide-liquide.

- **Coagulation :**

La déstabilisation de particules colloïdales par addition d'un réactif chimique (FeCl_3) appelé coagulant.

- **Floculation :**

L'agglomération de particules déstabilisées en micro-floc et ensuite en flocons plus volumineux que l'on appelle flocs. On peut rajouter un autre réactif appelé floculant ou adjuvant de floculation pour faciliter la formation de flocs.



Figure 10. Bassins de coagulation-floculation

- ***Filtration sur lits de sables :***

C'est une méthode d'épuration biologique qui assure le passage de l'eau à traiter à travers des lits de sables (figure11). Ces lits sont au nombre de 20 à une capacité unitaire de 27,5 m³. Au niveau de ce parcours, la qualité de l'eau est améliorée considérablement par la diminution du nombre de microorganismes (bactéries, virus, kystes), par l'élimination de matières en suspension et colloïdales et par des transformations dans sa composition chimique. A la surface du lit se forme une mince couche appelée « membrane biologique ».

Cette mince couche superficielle est essentielle, car elle effectue le déroulement du processus d'épuration.



Figure 11. Filtres à sables

- **Désinfection à l'Ultra –violet :**

Le traitement par la lumière ultraviolette (UV) est une technologie établie de la désinfection de l'eau en raison de sa très grande capacité à tuer ou à inactiver de nombreuses espèces de micro-organismes pathogènes. Il comprend la circulation de l'eau à travers 2 canaux ayant 2 bancs chacun et contenant 256 lampes UV (Fig.12). Durant le passage de l'eau dans le récipient, les micro-organismes sont exposés à une énergie lumineuse ultraviolette dont la puissance est de 250W qui endommage les molécules génétiques, et empêchent les micro-organismes de se multiplier.

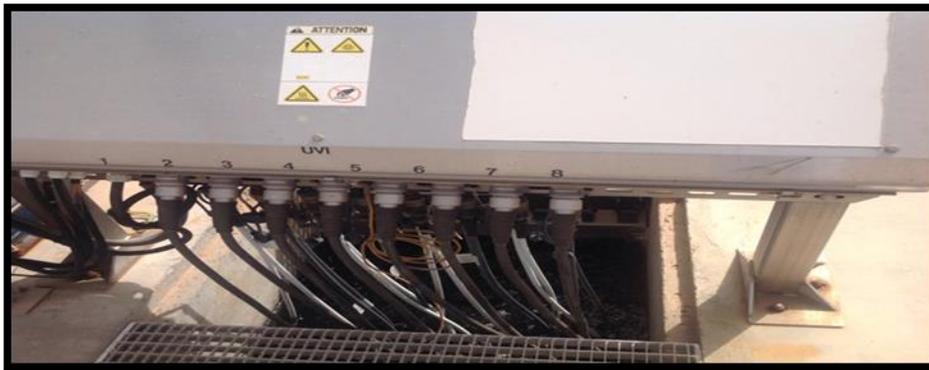


Figure 12 : Désinfection UV

- **Chloration :**

C'est un élément très réactif, et de ce fait il forme rapidement des composés avec les autres substances, c'est un agent oxydant fort qui réagit facilement avec plusieurs substances organiques et inorganiques trouvées dans les eaux usées. Il est particulièrement efficace pour détruire les bactéries (Fig.13). Le chlore est utilisé sous la forme suivante : chlore gazeux contenus dans 16 tanks est de 800 litres chacune, l'injection se fait par deux rampes.



Figure 13 : Chloration

III. TRAITEMENT DES BOUES de la STEP

La ligne eau produit deux types des boues, les boues primaires issue de la décantation primaire et les boues secondaires issues du traitement secondaire. Quel que soit le mode d'épuration des eaux usées, les boues sont initialement constituées d'eau (99%), des matières organiques fraîches très fermentescibles et de matières minérales dissoutes ou insolubles. Elles présentent un potentiel pathogène fort.

En vue de leur valorisation, des traitements sont appliqués aux boues :

III.1. Épaississement

L'épaississement vise à augmenter la siccité des boues sans pour autant modifier le caractère liquide de la boue primaire. Il permet de concentrer la MO contenue dans les boues pour optimiser le contact microorganismes-substrat et mieux exploiter la capacité du digesteur. Cet épaississement peut se faire simplement par voie gravitaire dans un concentrateur ou par des moyens mécaniques (Fig.14). La siccité des boues épaissies ne dépasse pas usuellement 7 % en moyenne et se situe plutôt vers 5 à 6 % /Le temps de séjour des boues mais aussi de l'eau dans l'épaississeur doit être inférieur à 48 h.



Figure 14. Epaississeur gravitaire

III.2. Flottation

Il repose sur le principe d'adsorption des boues sur des fines particules d'air. Les boues sont ensuite récupérées, en surface du système, par l'intermédiaire d'un racleur (Fig.15). Les fines bulles d'air proviennent d'une détente de l'eau soutirée du milieu. C'est un procédé particulièrement adapté aux boues biologiques.

La flottation permet une concentration des boues extraites du système secondaire avant la digestion. Les boues primaires doivent être épaissies jusqu'à une concentration de 70 g.L^{-1} ou plus et les boues secondaires et tertiaires flottées jusqu'à une concentration de 45 g.L^{-1} .



Figure15. Flottateur

III.3. DIGESTION ANAEROBIE

La méthanisation est un procédé anaérobie de dégradation des chaînes carbonées de la partie fermentescible de la MO, produisant sous l'action de microorganismes, d'une part un biogaz riche en méthane et en CO₂, et d'autre part un digestat. Dans ce digestat se retrouve la matière organique non dégradée et pratiquement tout l'azote originel sous forme ammoniacale, le phosphore sous forme insoluble ou fixée et la potasse sous forme soluble.

En outre, la méthanisation permet d'éviter les émanations naturelles de méthane, gaz à fort effet de serre, au niveau du stockage des boues et concourt donc à réduire les émissions de gaz à effet de serre des STEP. L'introduction des boues mixtes dans le digesteur permet d'obtenir un substrat avec un potentiel méthanogène plus important que des boues biologiques seules (Fig.16). En effet ces dernières font déjà état d'un important degré de minéralisation. La station ajoute également les graisses issues du dégraissage, qui permettent un apport en carbone et dispose d'un important pouvoir fermentescible. Le taux d'incorporation est généralement de 10% maximum.

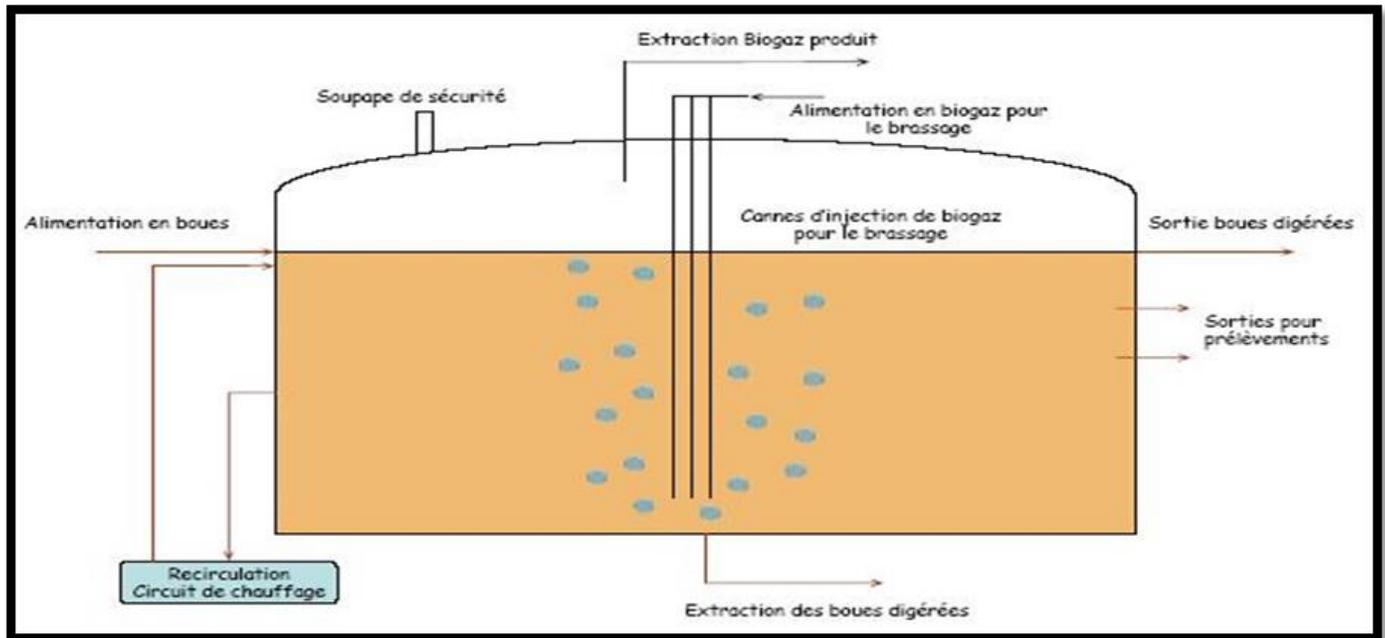


Figure 16 : Fonctionnement des digesteurs de la STEP (SOLAGRO, 2001)

III.4. Déshydratation

La déshydratation, qui correspond en fait à une augmentation forte de siccité, modifie l'état physique des boues, celles-ci passant de l'état liquide à l'état pâteux ou solide.

Les filtres à bandes et les centrifugeuses donnent des boues plutôt pâteuses en raison de performances de déshydratation qui plafonnent à 18-25 % de siccité pour la première famille de matériels, et 20-25 % de siccité pour la seconde. Les filtres presses produisent par contre des boues de structure solide (30 à 35 % de siccité) en raison du conditionnement au lait de chaux et des pressions élevées (Fig.17).

En général, une boue est considérée apte à être déshydratée quand sa concentration est supérieure à 15 g/l. La siccité du produit conditionne la filière d'élimination/valorisation :

- Besoin pour compostage : siccité de l'ordre de 15 à 30 %,
- Incinération sans ordures ménagères : siccité de l'ordre de 25 à 35 %,
- Co-incinération avec ordures ménagères : siccité de l'ordre de 15 à 30 %,
- Mise en décharge : siccité > 30%.



Figure 17 : Déshydratation des boues

IV. Traitement du biogaz

Le biogaz provenant de la stabilisation anaérobique est un mélange composé essentiellement de méthane (CH_4) et de gaz carbonique (CO_2) mais également en moindre proportion d'eau, d'azote, d'hydrogène sulfuré, d'oxygène ainsi que de composés aromatiques organohalogénés et de métaux lourds à l'état de traces. Le cheminement du traitement du biogaz produit est illustré par la figure 18.

Du fait que le biogaz contient des taux plus ou moins élevés de soufre (H_2S) qui a des effets nocifs tels que : la corrosion, l'endommagement des installations ...etc. Une partie du biogaz provenant des digesteurs va être comprimée puis réinjectée dans ces derniers, et l'autre partie va subir **une désulfuration** en éliminant le soufre par lavage (Figure.19).

Le biogaz désulfuré suit deux chemins : en premier lieu vers, les **cogénérateurs** (Figure.20) dont l'utilité est manifestée par la production de la chaleur qui sert au chauffage de la boue au niveau des digesteurs. Ainsi il assure une autosuffisance de 50 % de l'électricité utilisée au niveau de la STEP, finalement il est stocké dans de grands réservoirs circulaires à double membrane appelés **gazomètres** (Figure 21).

Dans le cas où les gazomètres sont pleins, le biogaz en excès va subir une combustion au niveau de la **torchère** (Figure 22).



Figure 18 : Cheminement du Traitement du biogaz produit à la STEP



Figure 19 : Désulfuration



Figure 20 : Cogénérateurs



Figure 21 : Gazomètres



Figure 22 : Torchères

Toutes les opérations de traitement au niveau de la STEP de Marrakech sont supervisées par le département de traitement et de contrôle. Il surveille l'ensemble des opérations de traitement des eaux et des boues dans la station d'où sont organisés les interventions, la régulation et la maintenance. Le niveau d'automatisation de la station permet de contrôler et de commander à distance la plupart des équipements à l'aide des superviseurs.

La station est équipée également d'un laboratoire de contrôle de la qualité de l'eau permettant d'évaluer les performances épuratoires de la STEP.

V. Traitement de l'Air vicié

L'air nauséabond au sein des STEP est collecté et traité. Il passe par trois tours de lavage : une d'acide sulfurique (H_2SO_4), une de Javel et une de soude.

L'air vicié produit par le bâtiment abritant les installations de prétraitement et de traitement de temps de pluies est traité par voie chimique. Celui produit par les bâtiments abritant les installations de traitement biologique et de traitement des boues est traité par voie biologique.

L'air épuré est renvoyé dans l'atmosphère.

DEUXIÈME PARTIE

ANALYSES DE LA PERFORMANCE DU PROCÉDÉ DE LA DIGESTION ANAÉROBIE DES BOUES

II. Caractéristiques des boues d'épuration

II.1. Types des Boues

- **Boues primaires**

C'est une boue qui provient de la décantation primaire qui se caractérise par une densité très importante. Elles présentent des concentrations élevées en matières minérales (sable, terre) mais aussi en matières organique pouvant évoluer.

- **Boues Secondaire ou biologique**

Ce sont des boues activées issues d'un traitement secondaire, qui proviennent des clarificateurs et qui sont caractérisées par une faible densité qui leur confère un pouvoir de flottation. Ces boues sont très organiques car elles sont principalement constituées de corps bactérien et leurs sécrétions.

- **Boue mixte :**

Constituer d'un mélange de boues primaire et secondaires, leurs compositions sont dépendantes de la quantité de boues primaires et secondaires produites. Très fermentescibles, ces boues subissent une digestion anaérobie dans les digesteurs.

II.2. Compositions des boues d'épuration

La composition exacte des boues varie en fonction de l'origine des eaux usées, de la période de l'année et du type de traitement et de conditionnement pratiqué dans la station d'épuration. Les boues résiduelles représentent avant tout une matière première composée de différents éléments (Matière organique, éléments fertilisants (N et P ...), d'éléments traces métalliques, d'éléments traces organiques et d'agents pathogènes) (Tableau 3).

Tableau 3 : composition des boues

Matière Organique	Eléments fertilisants	Les micro-organismes Pathogènes
Lipides Polysaccharides Protéines, Acides aminés, Lignine, Corps microbiens Produits de métabolismes	Azote, Phosphore, magnésie, Calcium, Soufre et les éléments en trace comme le cuivre, le zinc, le chrome, et le nickel	Virus, bactéries, protozoaires, champignons, helminthes,

II.3. Facteurs caractérisant la Nature des boues

- **Matières en suspension (MES g/l) : concentration en boue**

Ceci est la mesure de la quantité de boue anaérobie (partie biologique) dans le digesteur. Dans un traitement anaérobie des boues en excès, la concentration en boue, MES, se situe entre 30 et 50 g/L. Les matières en suspension sont mesurées par pesée après filtration et séchage à 105°C pendant 24h.

- **Résidu en cendres (%) :**

Le résidu en cendres correspond à la partie minérale (= inactive) de la boue. Il est déterminé en brûlant une quantité connue de boue sèche à 550°C. La différence de poids avant et après l'incinération reflète la fraction organique de la boue anaérobie ; le poids restant représente la partie minérale, fraction de cendres inorganiques.

- **Matière sèche (MS % ou g/l) : concentration en boue :**

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 :

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

- **Matière volatile sèche (% MSV)**

La matière sèche est constituée de matière minérale et de matière organique qui sont appelées matière volatile sèche. La concentration en MVS est un taux par rapport à la matière sèche totale. Le suivi de ce taux permet de connaître la stabilité d'une boue sur une échelle.

- **AGV (Acides gras volatiles)**

Les AGV sont des acides gras à chaîne carbonée courte (moins de six atomes de carbone). Les quatre premiers acides gras sont dits volatils : acide acétique ($\text{CH}_3\text{-COOH}$), acide propionique ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-COOH}$), acide butyrique ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-COOH}$), acide valérianique ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-COOH}$). 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 d'une eau usée ou en particulier de l'effluent d'un traitement anaérobie nous permet de savoir si la dégradation est complète ou non.

- **La Siccité**

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

III. Digestion Anaérobie

III.1. Objectif

La méthanisation :

- Réduit de 45% en moyenne les quantités de boues à traiter ;
- Élimine fortement les nuisances olfactives ;
- Produit un digestat stabilisé, débarrassé en grande partie des germes pathogènes (bactéries mais aussi virus et parasites) et présentant un pouvoir fertilisant. La digestion mésophile détruit 99% des germes pathogènes. La digestion a donc un pouvoir hygiénisant très important sur les boues.
- Réduit les teneurs en composés organiques volatiles.

III.2. PROCESSUS de la METHANISATION

La méthanisation est un processus de fermentation anaérobie complexe mettant en jeu plusieurs étapes biochimiques correspondant à l'action de différents groupes bactériens (Figure 23) :

- **Hydrolyse de la matière organique** : étape de solubilisation des macromolécules organiques par lyse. Elles sont transformées en les monomères de glucides, de protéines et de lipides.
- **Acidogénèse** : les monomères formés sont dégradés en acides gras volatils (acide butyrique, propionique, acétique), en alcools, en H₂ et en CO₂.
- **Acétogénèse** : formation d'acétate, d'hydrogène et de gaz carbonique à partir des acides gras.
- **Méthanogénèse** : formation de méthane à partir des produits de la réaction précédente.

La réaction globale reconnue représentative du procédé est la suivante :

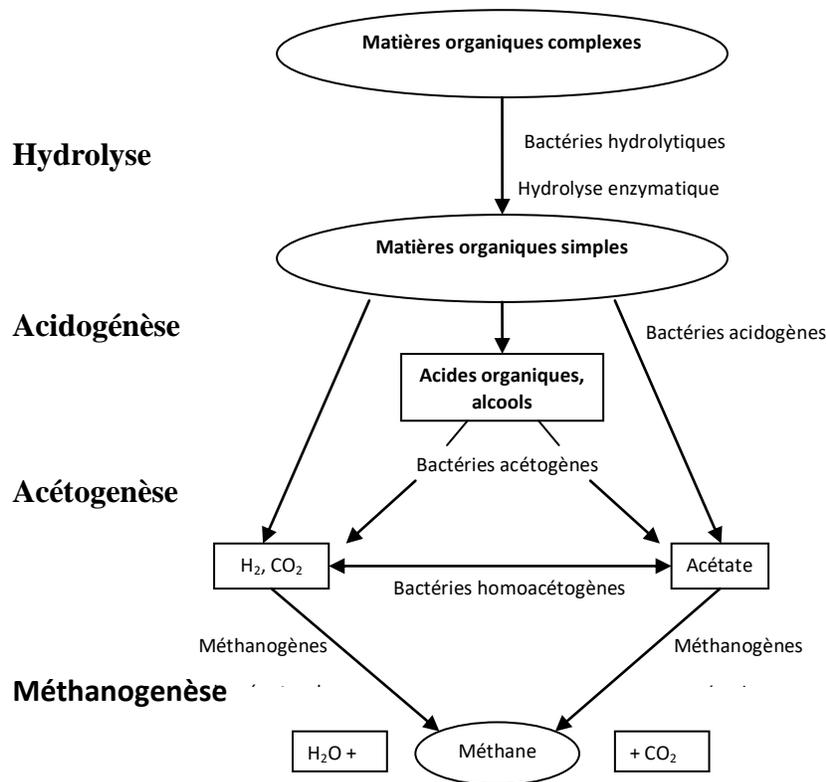


Figure 23 : Etapes des Processus de la méthanisation (Adapté de FREDERIC et LUGARDON, 2007)

III.3. Paramètres de la Digestion Anaérobie

Du fait de sa faible production de boue, le traitement anaérobie a une plus faible capacité d'adaptation et de résistance aux chocs et aux conditions changeantes qu'un système aérobie. C'est pour cette raison que les conditions de procédés d'un traitement anaérobie doivent être particulièrement bien définies et entretenues afin de garantir son efficacité.

Les paramètres les plus importants déterminant la vitesse de la biodégradation anaérobie sont :

- **Charge massique**

Chaque station d'épuration (aérobie et anaérobie) est développée pour être capable de traiter une certaine quantité de matière organique. Cette quantité ou charge organique est généralement exprimée en kg MSV par jour.

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.

- **Acides Gras Volatiles**

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 d'une eau usée ou en particulier de l'effluent d'un traitement anaérobie nous permet de savoir si la dégradation est complète ou non.

- **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. Un TAC minimal de 2 g.L^{-1} est préconisé pour assurer un bon déroulement du processus de méthanisation.

- **pH**

Pour les bactéries méthanogènes, le pH doit être entre 6.5 et 7.8. Les bactéries acidogènes et Acétogénèse 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 ($\text{pH} < 6.5$) !

- **Température**

Une température acceptable pour la dégradation anaérobie peut se situer entre 25 et 40°C (zone mésophile).

La digestion anaérobie de la matière organique ne produit 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 recirculant les boues chauffées par le chaudière.

- **Temps de séjour**

Le temps de séjour hydraulique exprime combien de jours ou heures l'alimentation est présente dans le bioréacteur. Il est généralement entre 18 à 30 jours, ce qui est un compromis entre l'optimisation des performances de la dégradation de la matière organique et le volume du digesteur.

III.4. Paramètres déterminants la Performance de la Digestion Anaérobie

En plus de la création de conditions de procédés optimales, certains paramètres doivent être considérés avec la plus grande attention durant le dimensionnement et l'opération de la STEP en vue d'obtenir les caractéristiques de l'effluent qu'on désire. Les principaux paramètres de procédés sont présentés ci-dessous :

- **Taux de réduction en MSV**

La comparaison des concentrations en matières volatiles en entrée et en sortie des digesteurs, ou taux d'abattement des matières volatiles, est par excellence le paramètre qui permet d'évaluer les performances de la digestion. Ce taux dépend de plusieurs paramètres – nature et fermentescibilité des boues, temps de séjour réel, brassage, température, mode d'exploitation du digesteur. Pour les boues mixtes, il est en moyenne de 45 %.

- **Débit du biogaz produit**

La production de gaz donne une bonne indication de la charge MSV effectivement envoyée vers la digestion. Si la production de gaz varie beaucoup, ça peut indiquer des conditions instables de procédés. Il faut alors identifier la source de ces instabilités et les éliminer.

- **Ratio de biogaz/ kg MSV éliminée**

Ce paramètre nous renseigne sur la quantité de matières volatiles sèches qui sont transformées en biogaz.

- **Teneur en H₂S**

Il forme en outre, avec des oligo-éléments, des sulfures de métal difficilement solubles. Les oligo-éléments sont aussi soustraits aux bactéries de méthane. Ceci entraîne une diminution de la vitesse de dégradation et une réduction de la production de méthane

IV. Bilan Matière Nominal de la Digestion Anaérobie

Les deux types de boues produits, les boues primaires issues de la décantation et les boues secondaires issues du traitement biologique, contiennent énormément d'eau, alors elles subissent un traitement d'épaississement avant d'être dirigées vers la digestion anaérobie.

Les boues primaires sont épaissies par gravité dans deux épaisseurs et les boues secondaire par flottation avec un taux de capture de 92% (Tableau 4).

Tableau 4 : Quantité Nominale des boues avant et après épaissement

Item	Avant Epaissement	Après Epaissement
MS primaire	38,86tonnes/j	35,75tonnes/j
MS secondaire	25tonnes/j	23tonnes/j
MS Total (Boue Mixte)	63,86tonnes/j	58,75tonnes/j

Digestion Anaérobie

L'objectif est d'atteindre une réduction de 45% de la matière Volatile MSV pour la transformer en biogaz. Les digesteurs sont développés pour être capable de traiter une certaine quantité de matière organique. Il s'agit des boues primaires et des boues secondaires (tableau5).

Tableau 5 : Alimentation Nominale de la digestion

Item	Quantité en g/l	Quantité en kg/j
MS primaire	32,95	35.750
MVS primaire	21,41	23.240
MS secondaire	21.19	23.000
MVS secondaire	16.3	17.170
MS total	54,14	58.750
MSV total	37,71	35.250

Débit journalier = 1.085m³/j

MVS primaire= 65% de MS primaire

MVS secondaire= 77% de MS secondaire

La qualité du biogaz est déterminée en considérant les paramètres dans le tableau 6.

Tableau 6 : Bilan Nominal du biogaz

Ratio du biogaz produit	0.8kgNm ³ /kg MSV
Débit du biogaz	17.500m ³ /j
Teneur en H ₂ S	≤ 3000 ppm
Rendement d'élimination	≥ 80%
Autoproduction d'électricité	50%

V. Analyse Statistiques

Le suivi des paramètres depuis octobre de 2016 jusqu'au mars de 2017 a permis de faire une analyse statistique de la performance de digestion anaérobie des boues.

Les matières organiques alimentées dans les six mois sont représentées dans le tableau 7. Les quantités des matières sèches sont tous supérieur aux quantités nominales pendant les six mois.

Tableau 7: Alimentation de la digestion

Items	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Unité
MS primaire	44,4	44,62	41,27	39,10	44,31	45,16	g/l
MSV primaire	28	29	26	26,2	28,8	28,0	g/l
MS secondaire	35,38	30,56	39,13	51,88	48,47	36,03	g/l
MSV secondaire	23	22	27	35,8	34,9	24,5	g/l
Charge massique	55.335	55.335	57.505	67.270	69.115	56.963	Kg MSV/j

VI. Résultats et Interprétation

VI.1. Suivi de paramètres

Le suivi des paramètres a permis d'analyser le fonctionnement du processus pendant les six mois. Chaque digesteur est une installation de fonctionnement indépendant. Alors, le suivi des paramètres de chaque digesteur est nécessaire pour bien analyser d'un manier efficace la performance de la digestion. Les résultats, représentés dans les graphs, sont comparés aux conditions nominales.

VI.1.1 Acide gras Volatile(AGV) : intervalle nominal = 200mg/l-300mg/l

- AGV du digesteur 632A pour octobre, novembre, et décembre (2016) ; janvier, février, et mars (2017)

Les valeurs d'AGV sont plus conformes pendant le mois de novembre (2016), janvier et février. Octobre et mars contiennent les valeurs les moins conformes. Octobre contient les plus faibles et plus grandes valeurs pour ce digesteur. Elle augmente jusqu'à 1884mg/l et diminue à 192mg/l (fig.24 et Fig.25).

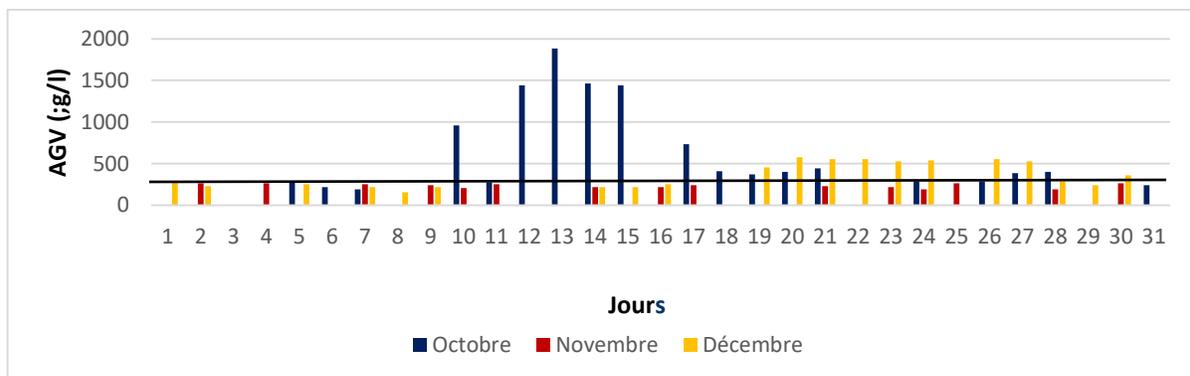


Figure24 : AGV du digesteur 632A pour 2016

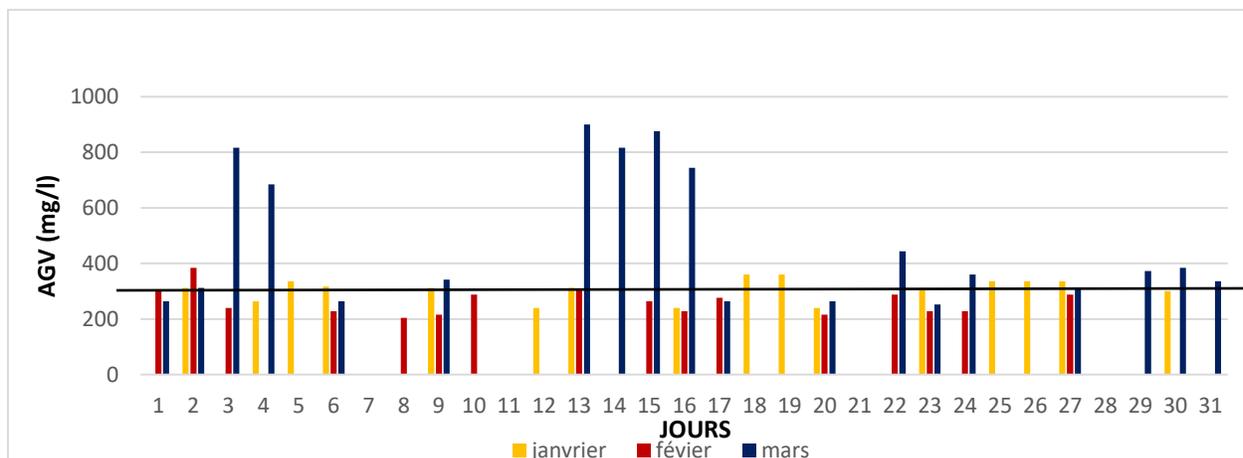


Figure25 : AGV du digesteur 632A pour 2017

- AGV du digesteur 632B pour octobre, novembre, et décembre (2016) ; janvier, février, et mars (2017)

Les valeurs sont plus conformes (200-300mg/l) pendant les mois d'octobre, de novembre et février. La majorité des valeurs d'AGV des autres mois sont inconsistantes et non-conformes. Par exemple, en décembre, la plus grande valeur est 1104mg/l et la plus faible valeur 144mg/l (Fig.26 et Fig.27).

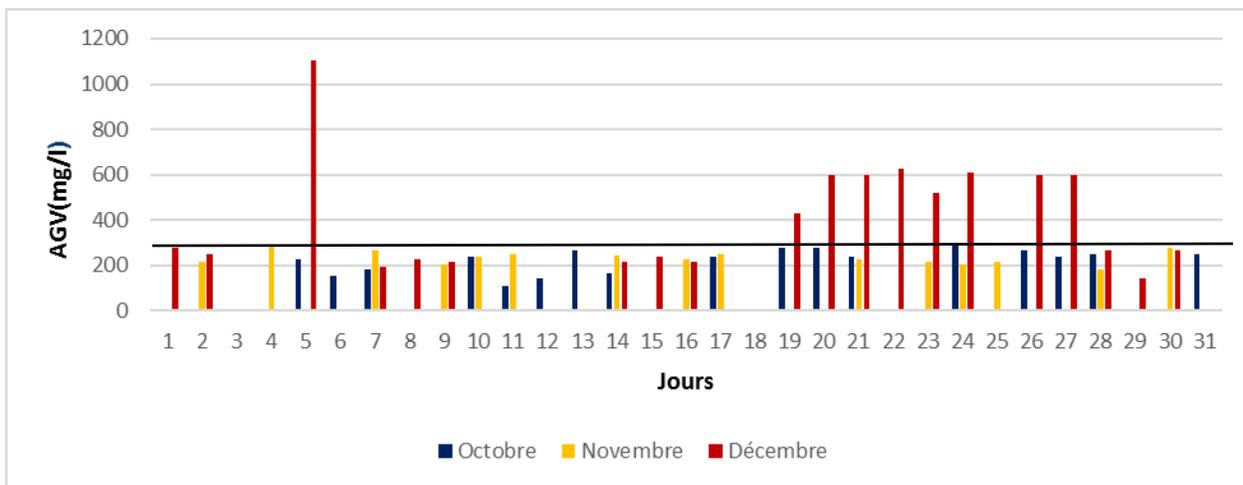


Figure26 : AGV du digesteur 632B pour 2016

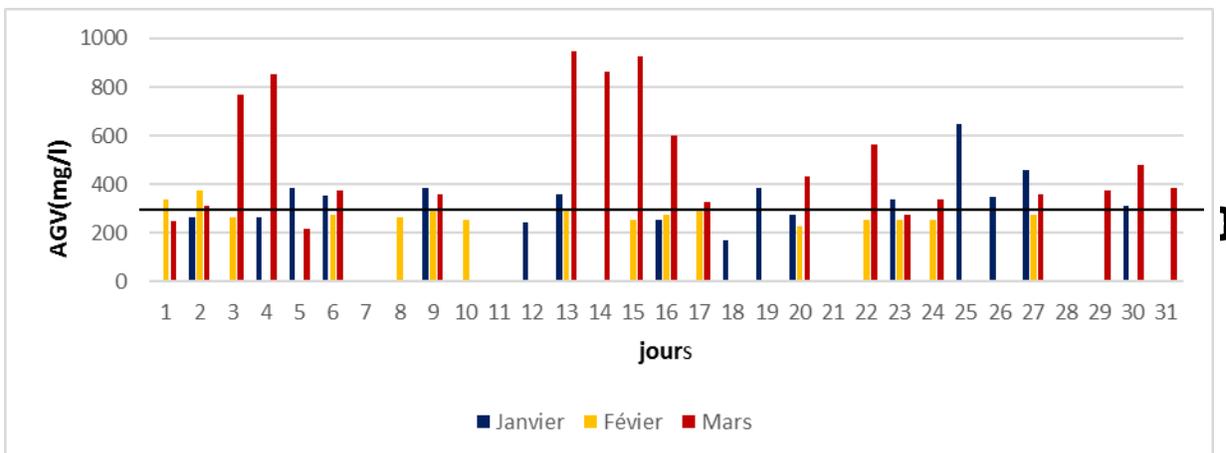


Figure27 : AGV du digesteur 632B pour 2017

- AGV du digesteur *D6301* pour octobre, novembre, et décembre (2016) ; janvier, février, et mars (2017)

La majorité de valeurs sont dans l'intervalle de la valeur nominale. Les mois de janvier et de février sont plus conformes à la nominal. La plus grande valeur est 960mg/l en mars et la plus faible est 168mg/l en décembre (Fig.28 et Fig.29).

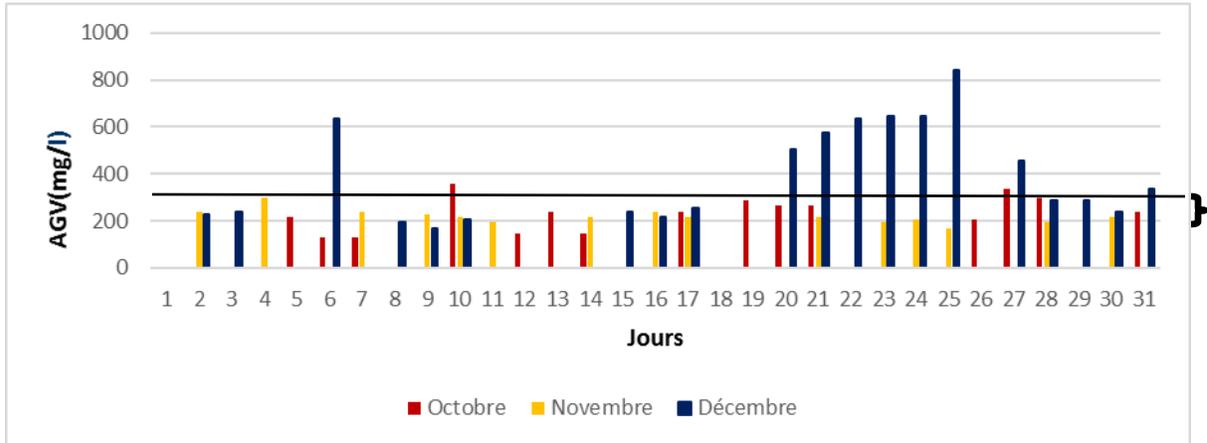


Figure28 : AGV du digesteur D6301 pour 2016

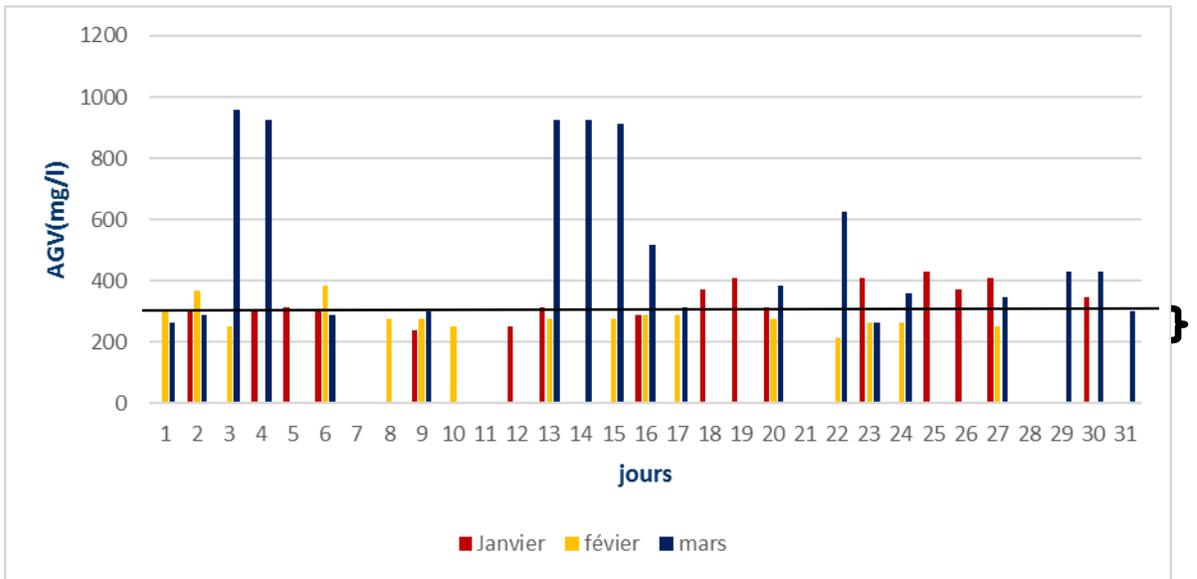


Figure 29 : AGV du digesteur D6301 pour 2017

- AGV du digesteur *D6302* pour octobre, novembre, et décembre (2016) ; janvier, février, et mars (2017)

Octobre, novembre, janvier et février sont les mois avec les valeurs d'AGV les plus conformes au nominal. Mars contient les valeurs les moins conformes. La plus grande valeur est 972mg/l en mars et la plus faible valeur est observée en octobre 144mg/l pour ce digesteur (Fig.30 et Fig.31).

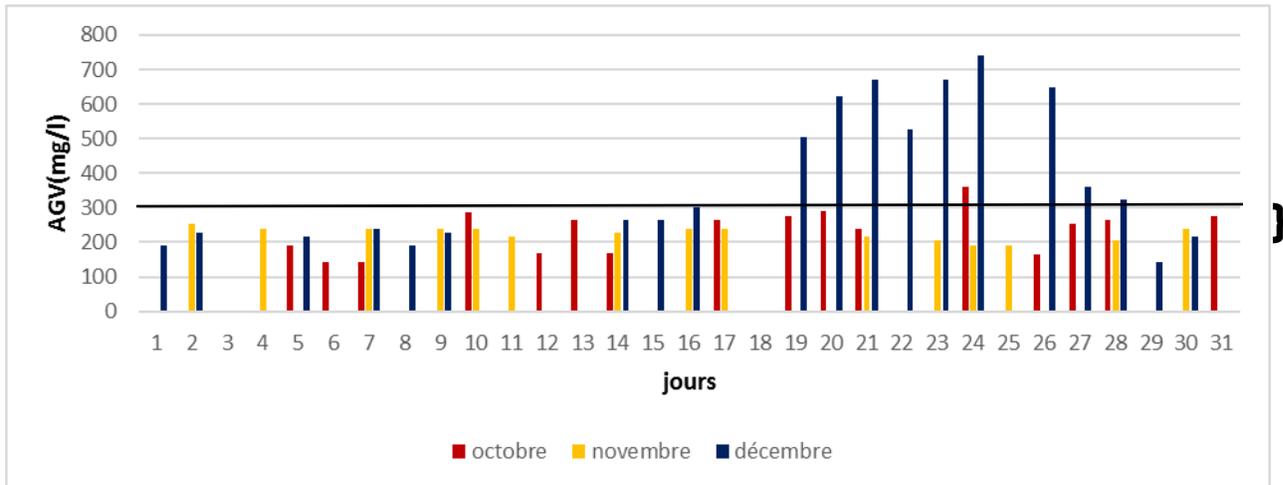


Figure 30 : AGV du digesteur D6302 pour 2016

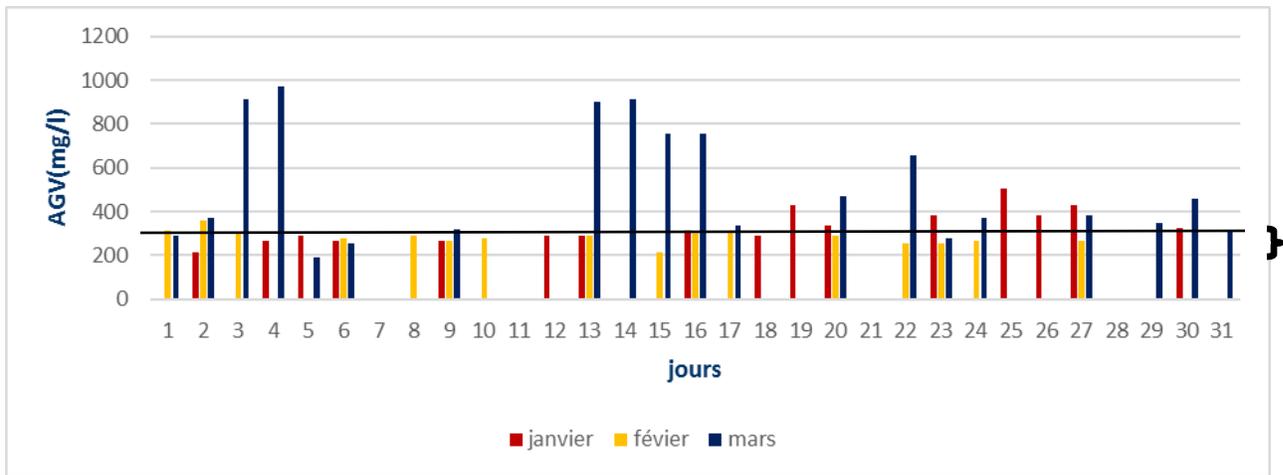


Figure 31 : AGV du digesteur D6302 pour 2017

VI.1.2. Alcalinité : intervalle conforme = 2g/l-3g/l

- Alcalinité du digesteur 632A pour octobre, novembre, et décembre (2016) ; janvier, février, et mars (2017)

La majorité des valeurs d'alcalinité sont comprises entre 2g/l et 3,5g/l. La plus grande valeur d'alcalinité est de 4g/l observée les 9 et 10 mars 2017. Les mois les plus conformes au nominal (entre 2g/l-3g/l) sont novembre 2016, décembre, janvier, février et 2017 (Fig.32 et Fig.33).

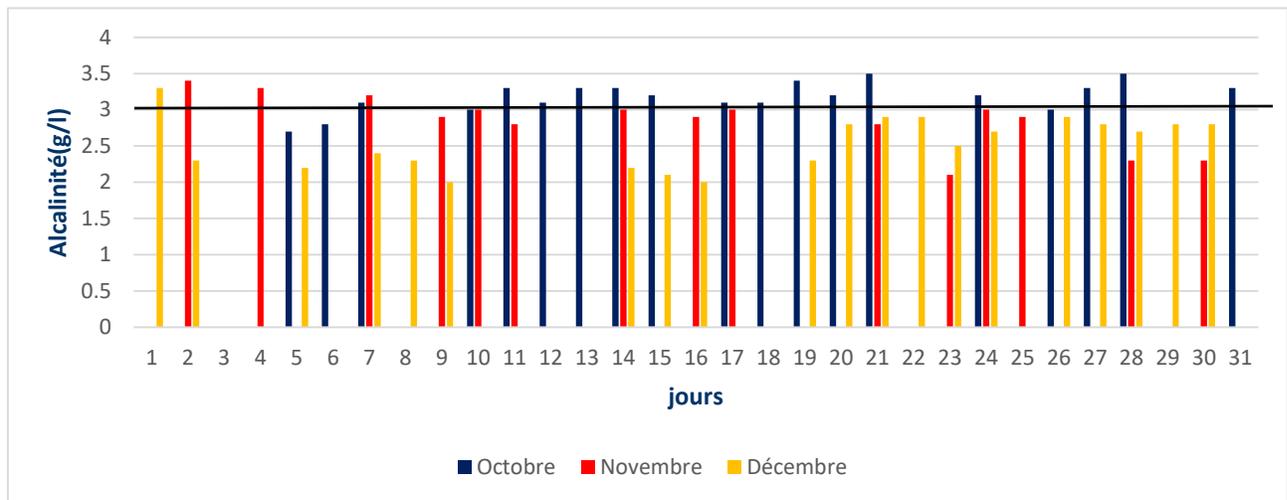


Figure32 : Alcalinité du digesteur 632A pour 2016

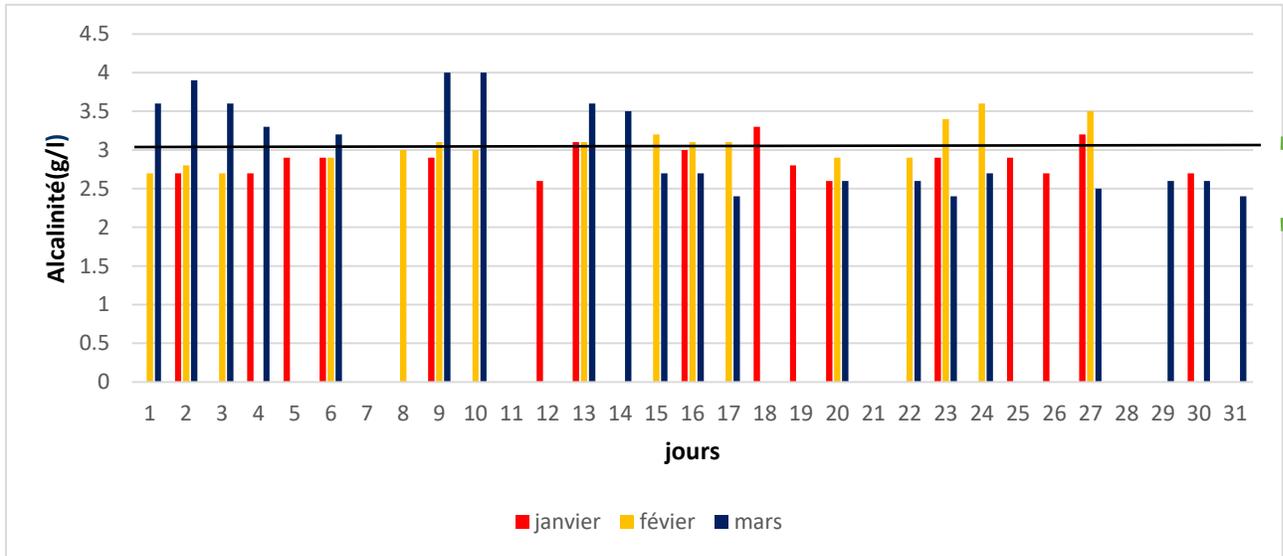


Figure 33 : Alcalinité du digesteur 632A pour 2017

- Alcalinité du digesteur 632B pour octobre, novembre, et décembre (2016) ; janvier, février, et mars (2017)

Comme dans le digesteur précédent, la majorité des valeurs d'alcalinité sont comprises entre 2g/l et 3,5g/l. La plus grande valeur d'alcalinité est de 4,1g/l observée le 10 mars 2017. Décembre est le seul mois qui est conforme au nominal. Les autres mois dépassent la valeur nominale (Fig.34 et Fig.35).

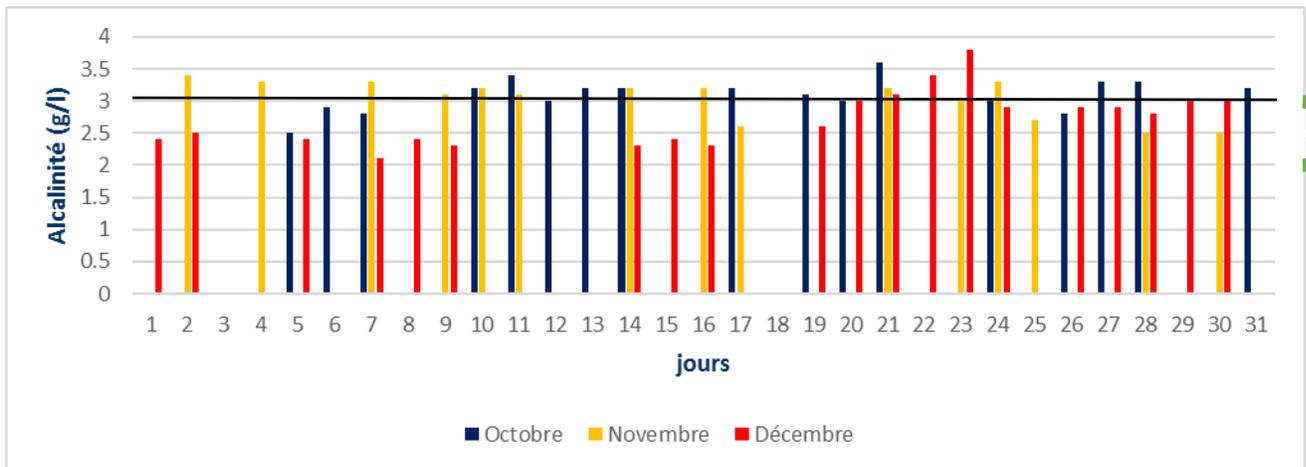


Figure 34 : Alcalinité du digesteur 632B pour 2016

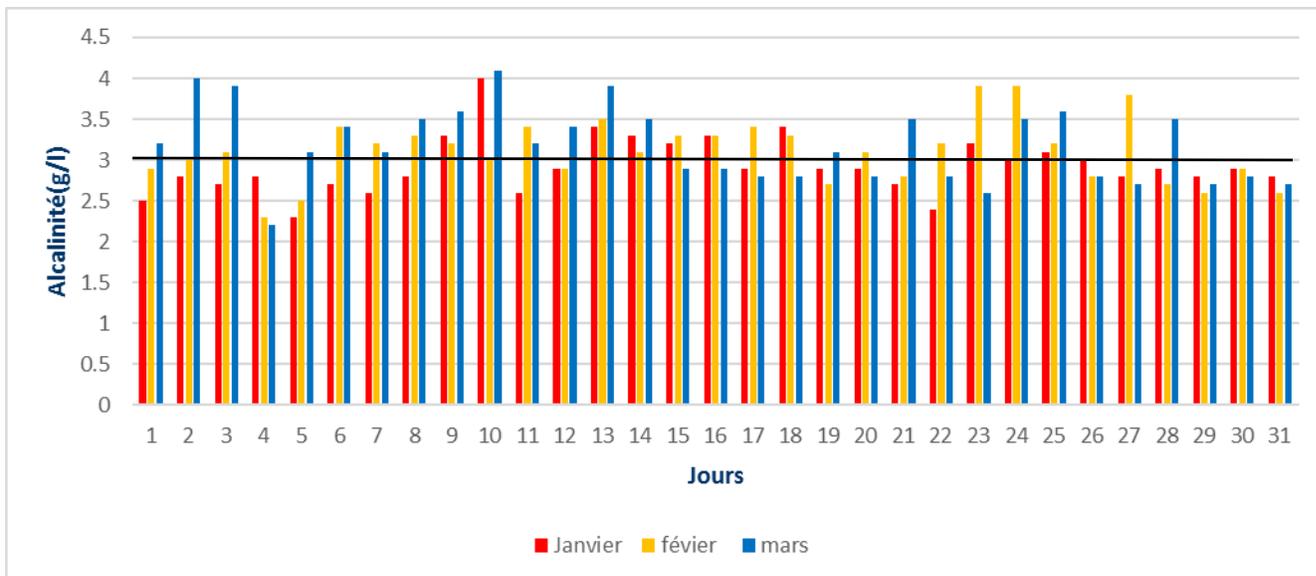


Figure 35 : Alcalinité du digesteur 632B en 2017

- Alcalinité du digesteur *D6301* pour octobre, novembre, et décembre (2016) ; janvier, février, et mars (2017)

La majorité des valeurs d'alcalinité des six mois dépassent la valeur nominale. Les valeurs les plus conformes sont observées en décembre. La plus grande valeur est de 6g/l observée le 13 mars 2017 (Fig.36 et Fig.37).

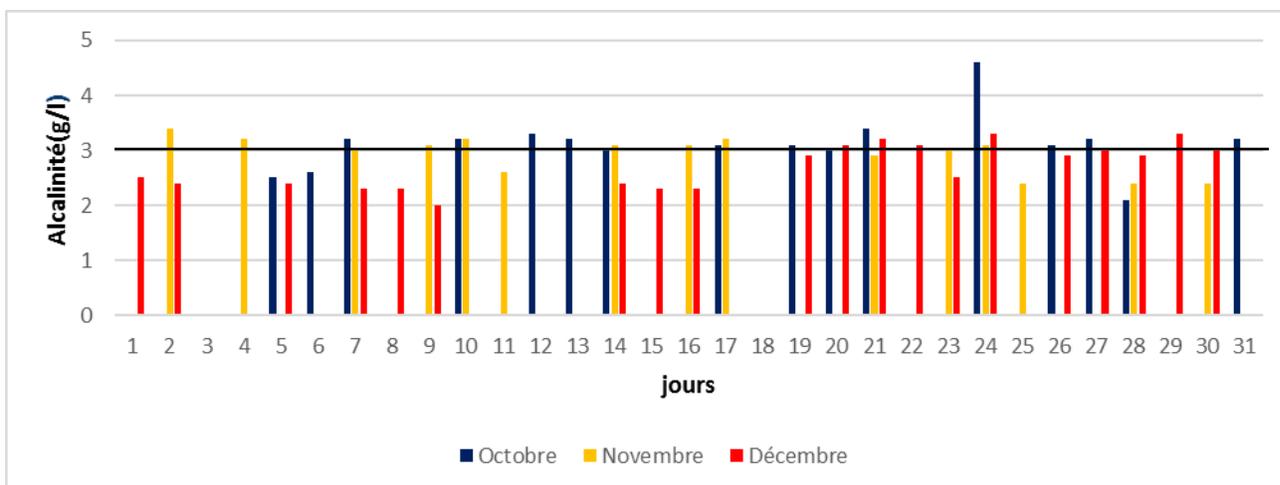


Figure 36 : Alcalinité du digesteur D6301 en 2016

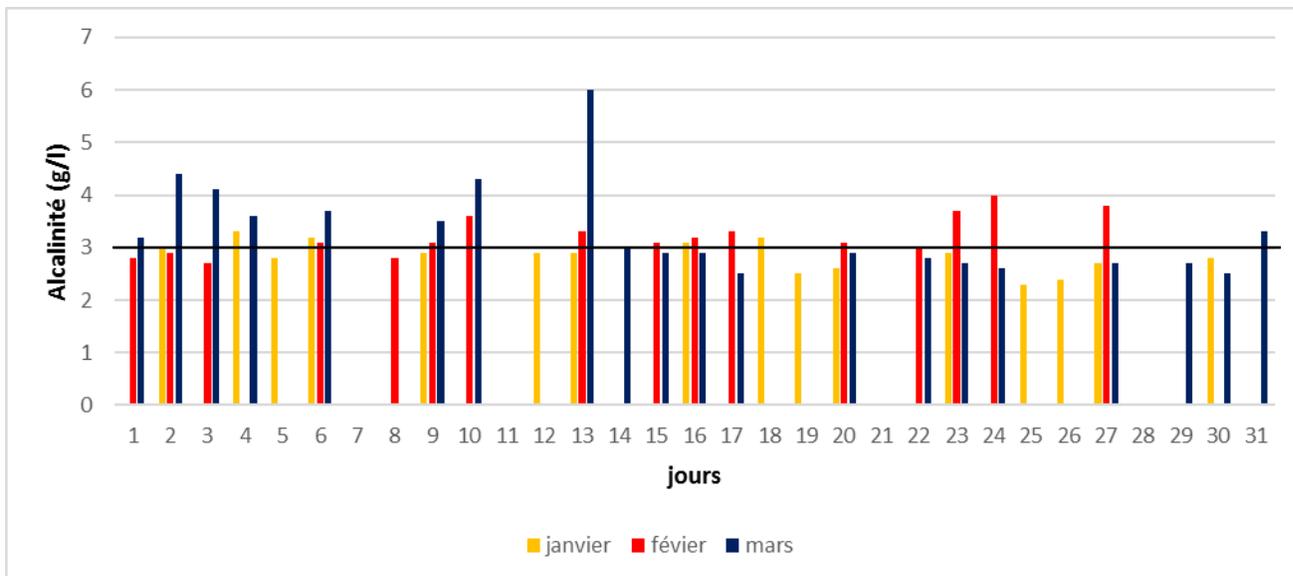


Figure 37 : Alcalinité du digesteur D6301 en 2017

- Alcalinité du digesteur *D6302* pour octobre, novembre, et décembre (2016) ; janvier, février, et mars (2017)

La majorité des valeurs sont hors du nominal sauf pour le mois de décembre qui est la plus conforme. La plus grande valeur (4,5g/l) est observée le 10 mars (Fig.38 et Fig.39).

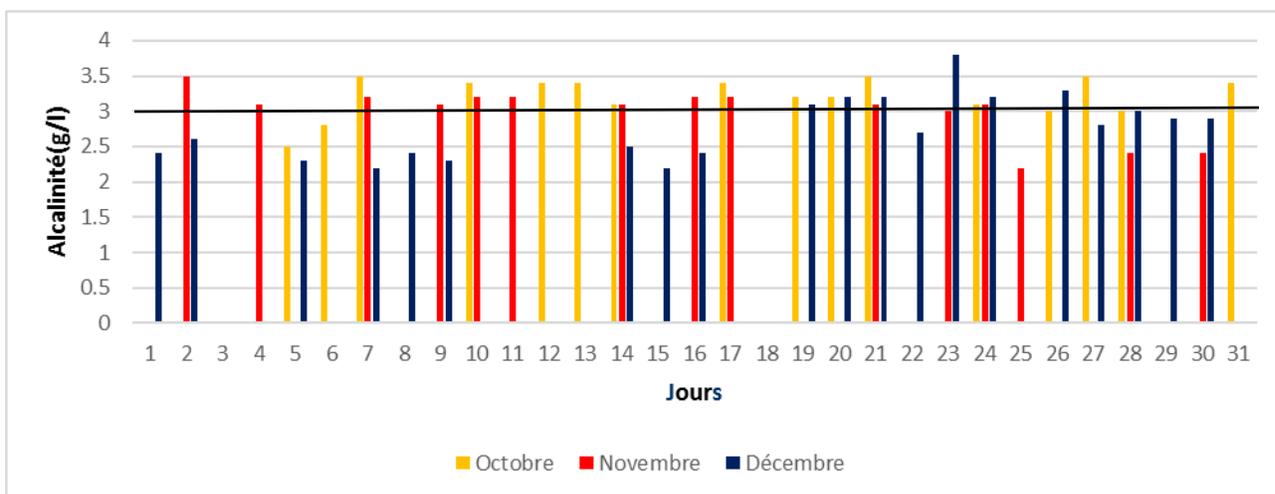


Figure 38 : Alcalinité du digesteur D6302 en 2016

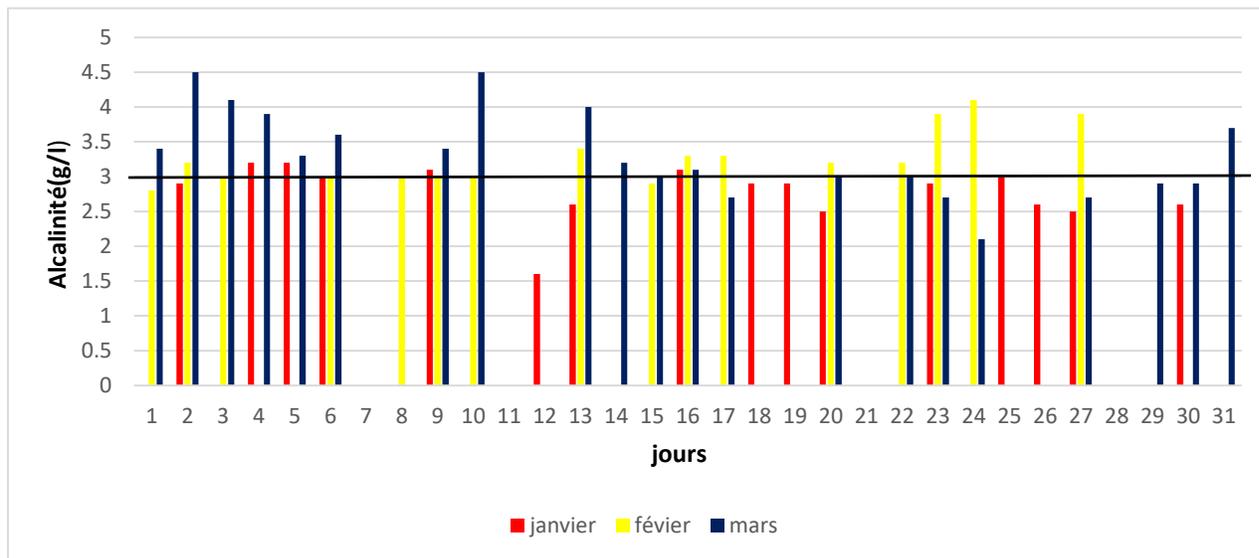


Figure 39 : Alcalinité du digesteur D6302 en 2017

VI.1.3 pH

Les valeurs du pH dans les quatre digesteurs se trouvent entre **7,55-7,69** pour les six mois (Tableau 1-5 de l'Annexe2). Tableau8 représente les pH moyens des quatre digesteurs pendant les six mois.

Tableau 8 : pH moyens des quatre digesteurs pendant les six mois (Octobre-Mars)

Mois	Octobre 2016	Novembre 2016	Décembre 2016	Janvier 2017	Février 2017	Mars 2017
Digesteurs						
632A	7,41	7,38	7,32	7,45	7,52	7,45
632B	7,48	7,42	7,37	7,49	7,53	7,52
D6301	7,50	7,37	7,32	7,39	7,47	7,49
D6302	7,79	7,41	7,33	7,41	7,49	7,52

VI.1.4. Température

Les températures dans les quatre digesteurs se trouvent dans la condition mésophile (25-40°C) pour les six mois (Tableau 5, Annexe 2). Les températures moyennes des quatre digesteurs pour les six mois sont dans le tableau 9.

Tableau9 : Les Température moyennes en °C des quatre digesteurs pendant les six mois :

Mois	Octobre 2016	Novembre 2016	Décembre 2016	Janvier 2017	Févier 2017	Mars 2017
Digesteurs						
632A	37,7	35,4	34,3	37,8	37,8	36,3
632B	38,5	37,6	36,3	38,1	38,1	36,9
D6301	34,1	33,3	32,5	33,5	34,3	35,3
D6302	36,3	33,9	33,5	34,0	34,4	35,5

VI.1.5 Temps séjour

Les temps séjour de ces six mois sont conformes à l'intervalle nominal sauf pour quelque jour. Les temps de séjours pour les six mois se trouvent dans le tableau 6 de l'Annexe 2.

VI.2. Performance du procédé de la Digestion Anaérobie des boues

Les paramètres suivants nous renseignent sur la performance de la Digestion anaérobie de la STEP pendant les six mois. Au niveau de ce procédé, les quatre digesteurs sont divisés en phase I et Phase II, avec l'ajout des graisses dans les deux digesteurs de la phase I (632A et 632B).

Les valeurs de chaque phase sont comparées à la valeur nominale.

VI.2.1. Taux de Réduction de MSV : valeur nominale est 45%

- Taux de réduction de MSV PHASE I & II pour octobre 2016

Une différence entre la phase I et la Phase II est observé. Le taux de réduction de la phase I est généralement supérieur au celui de la phase II (Fig.40), mais ils sont inférieurs à la valeur nominale avec un pic de 61%. La diminution est dû à la hausse de la concentration en AGV au niveau du digesteur 632A. Le bon fonctionnement des digesteurs a été récupéré après cinq jours de limitation de l'alimentation en boues à raison de 18hr par jour. C'était aussi dû à l'arrêt total des équipements de la flottation suite à des alarmes 'variateurs'.

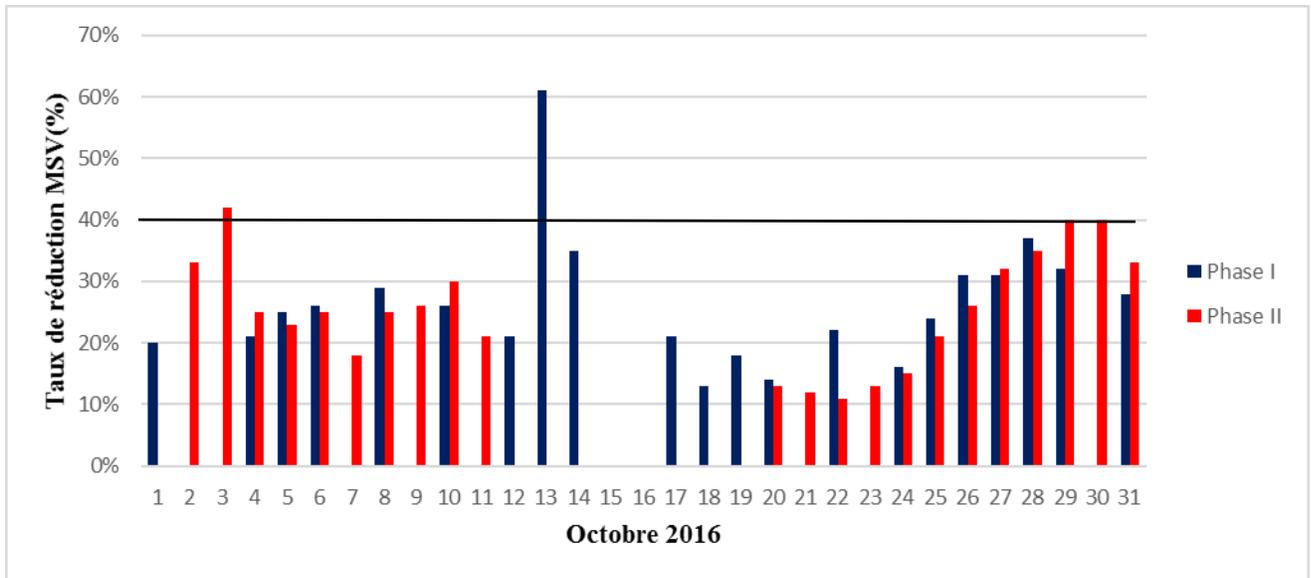


Figure 40 : Taux de réduction de MSV PHASE I & II en octobre

- Taux de réduction de MSV PHASE I & II pour novembre 2016

La différence entre les deux n'est pas évidente. L'abattement de MSV est inférieur à la valeur nominale (>45%). La plus grande valeur est observée le 28 dans la phase II (Fig.41). La cause de la diminution de taux d'abattement de MVS était dû à l'arrêt des pompes d'alimentation des digesteurs en boue primaire épaissie suite à l'intervention de réparation d'une fuite d'air au niveau.

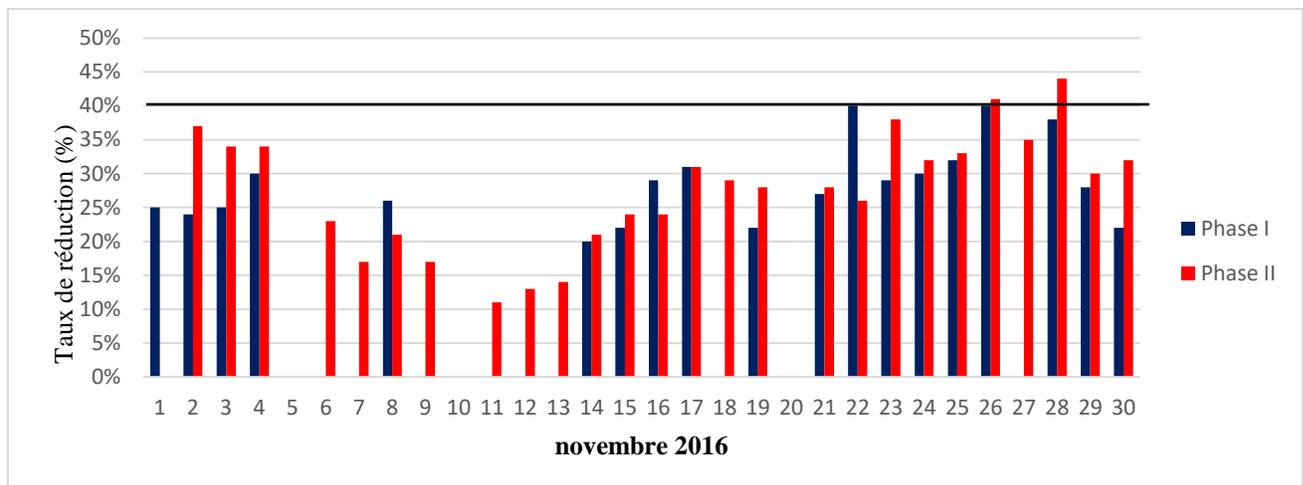


Figure 41 : Taux de réduction de MSV PHASE I & II en novembre 2016

- **Taux de réduction de MSV PHASE I & II pour décembre**

Les taux de réduction de la moitié du mois est supérieur à 30%. Un pic de 61% est observé le 17 dans la phase II (Fig. 42). Il y a eu un by-pass des digesteurs de la deuxième phase suite à la hausse de la concentration des AGV à leurs niveaux.

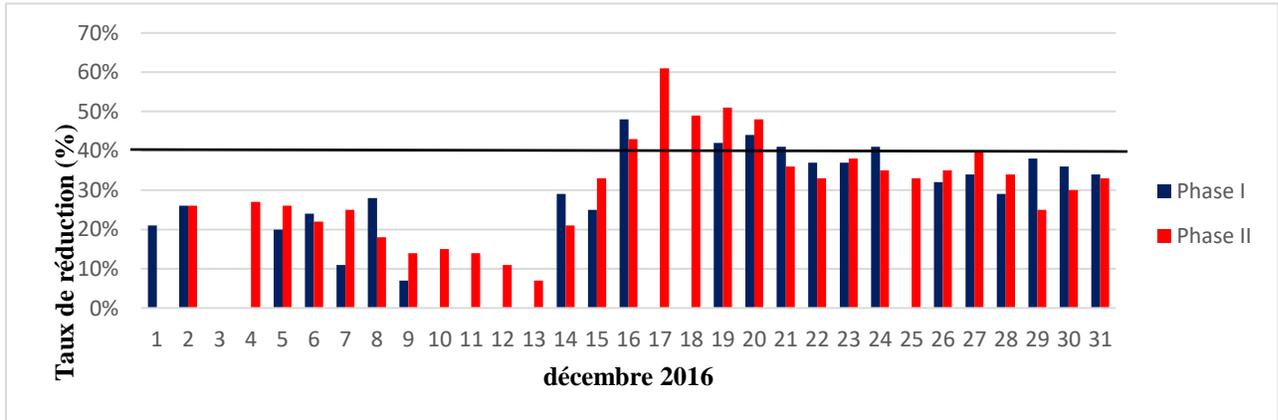


Figure 42 : Taux de réduction de MSV PHASE I & II en décembre 2016

- **Taux de réduction des phases I et II pour janvier 2017**

Les taux de réduction de la majorité des jours dépassent 30%, et pour quelques jours, ils dépassent la valeur nominale (Fig.43).

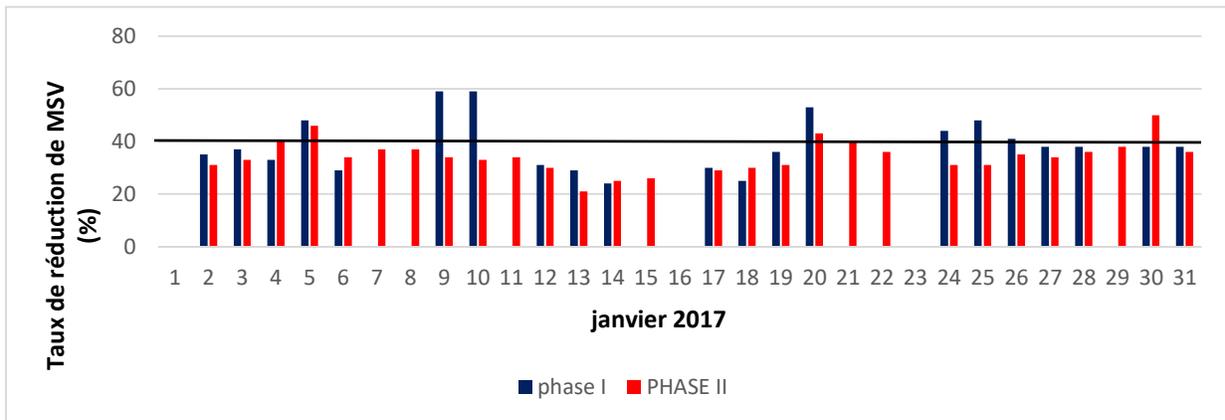


Figure 43 : Taux de réduction des phases I et II en janvier 2017

- Taux de réduction des phases I et II pour février 2017

Les taux de réduction dépassent la valeur nominale pour quelque jour et ils sont à 30% pour la majorité des jours (Fig.44).

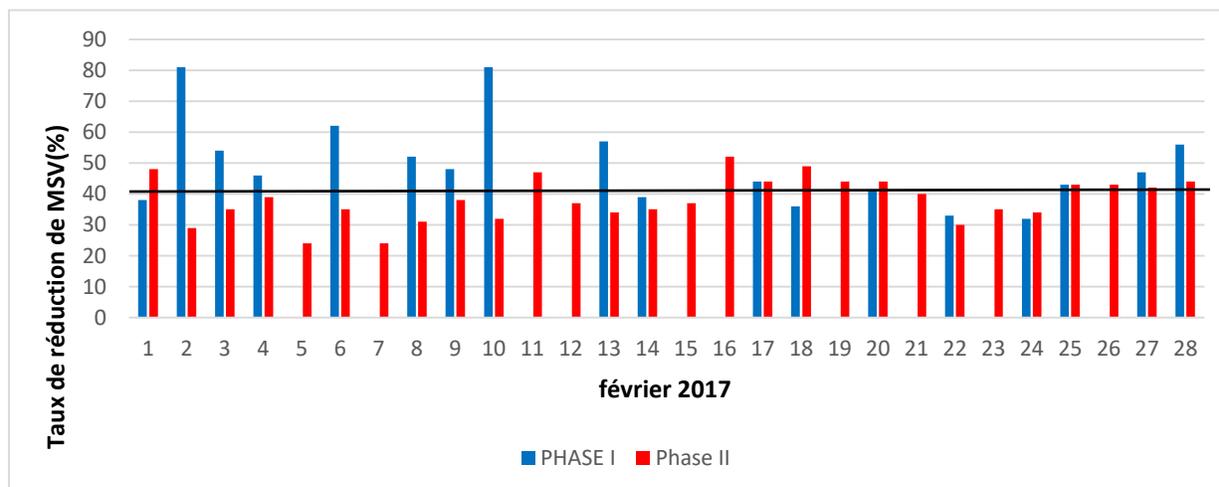


Figure 44 : Taux de réduction des phases I et II en février 2017

- Taux de réduction des phases I et II pour mars 2017

Les taux de réduction pendant ce mois sont inférieurs à la valeur nominale. Un pic de 56% est observé le 15 (Fig.45). La réduction des MSV pour les digesteurs de la première phase a connu une régression par rapport au mois dernier, cela est dû aux à-coups de charge des digesteurs suite à la non-répartition équitable de la boue primaire et secondaire.

A cet effet, il a été décidé de se servir d'un épaissement dynamique (essai par centrifugeuse) pour examiner l'optimisation des étapes suivantes de conditionnement, de stabilisation et de déshydratation.

La centrifugeuse a été déplacé à côté de la fosse de mélange en s'alimentant de cette dernière, et les boues produites sont stockées par la suite au niveau de l'épaisseur A. Une amélioration a été constatée en ce qui concerne la production du gaz et la concentration des boues digérées.

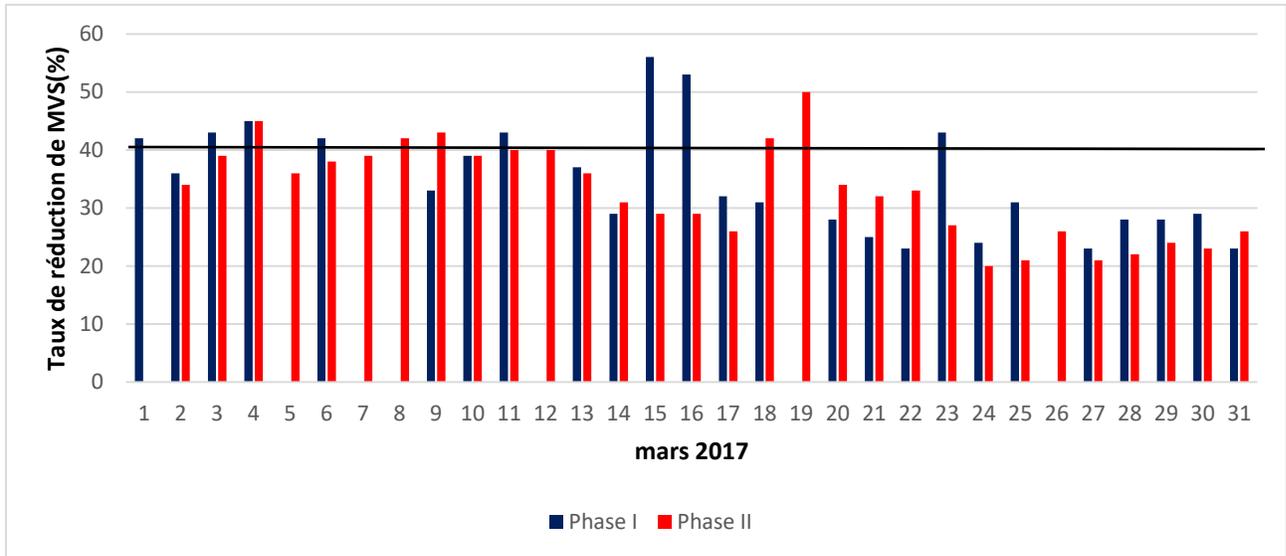


Figure 45 : Taux de réduction des phases I et II pour mars 2017

VI.2.2. Débit du Biogaz produit

- Débit du biogaz produit en octobre 2016

Le volume du biogaz produit est inférieur à la valeur nominale. Le plus grand débit du biogaz produit est de 17.058m³/j observée le 1 octobre et la plus faible valeur est de 12.414m³/j observée le 10 octobre (Fig.46). Ceci est dû à l'augmentation de l'acide gras volatils au niveau du digesteur A. L'autoproduction est de 46%.

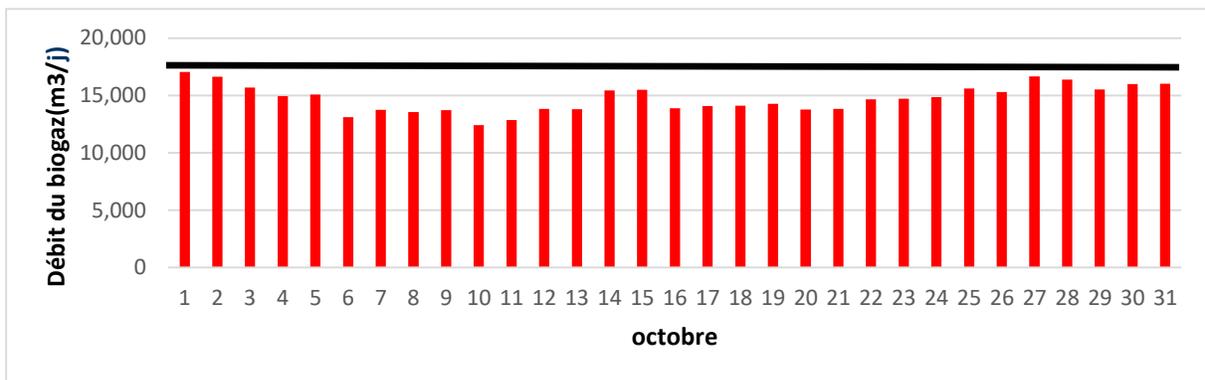


Figure 46 : Débit du biogaz produit en octobre 2016

- Débit du biogaz produit en novembre 2016

Les débits du biogaz produit sont inférieurs au nominal. Le plus grand débit du biogaz produit est de 17.057m³/j observée le 12 et la plus faible valeur est de 10.379m³/j observée le 8 (Fig.47).

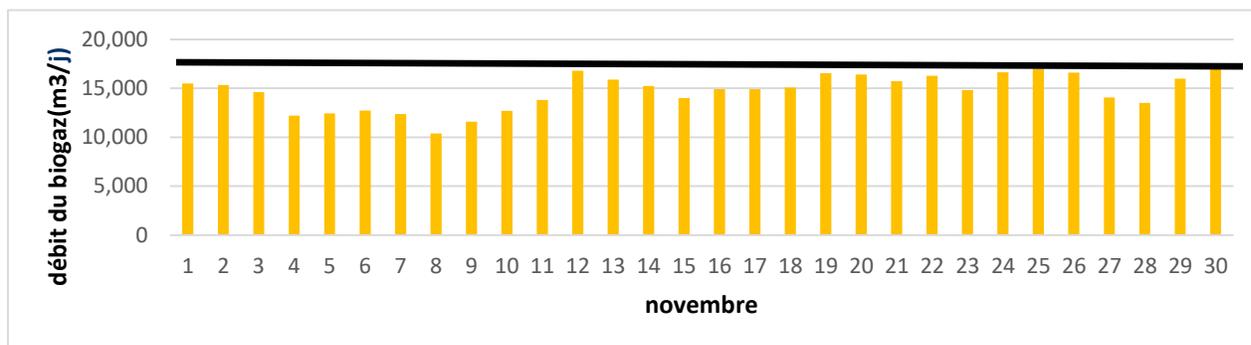


Figure 47 : Débit du biogaz produit en novembre 2016

- Débit du biogaz produit en décembre 2016

Une augmentation du débit du biogaz produit par rapport au mois précédent. Le débit du biogaz dépasse la valeur nominal pour la majorité des jours. La valeur la plus grande observée le 31 est de 20.824m³/j et la plus faible est de 14.116m³/j le 8 (Fig.48).

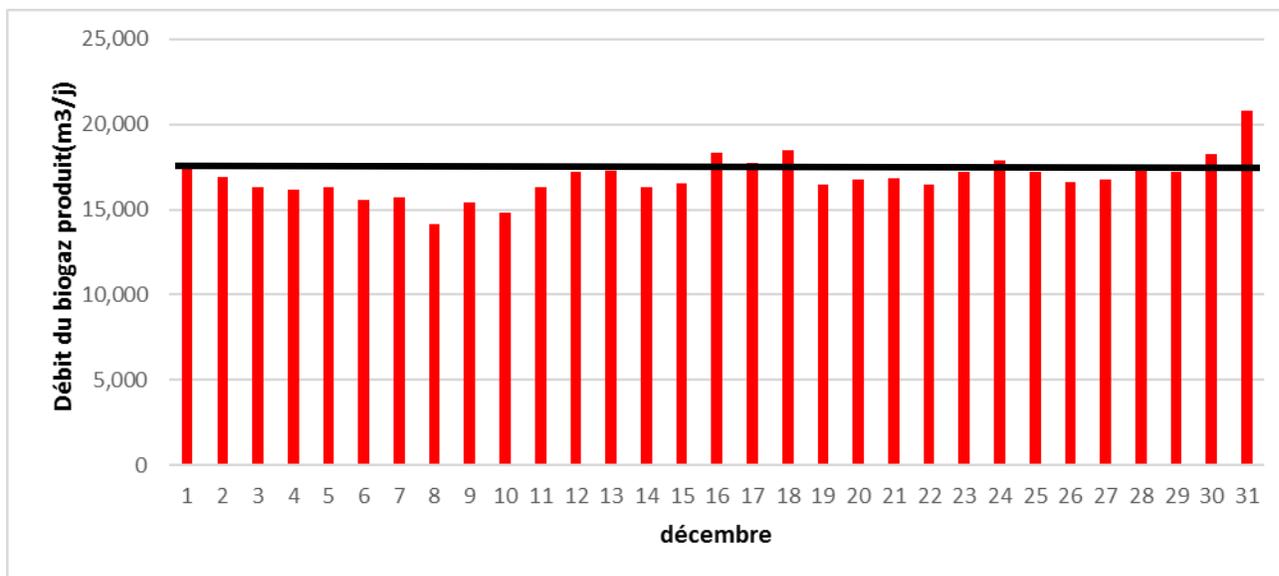


Figure 48 : Débit du biogaz produit en décembre 2016

- **Débit du biogaz produit en janvier 2017**

Les débits du biogaz de ce mois sont tous supérieurs à la valeur nominale. Un pic de 28.430 m³/j est observée le 31(Fig.49).

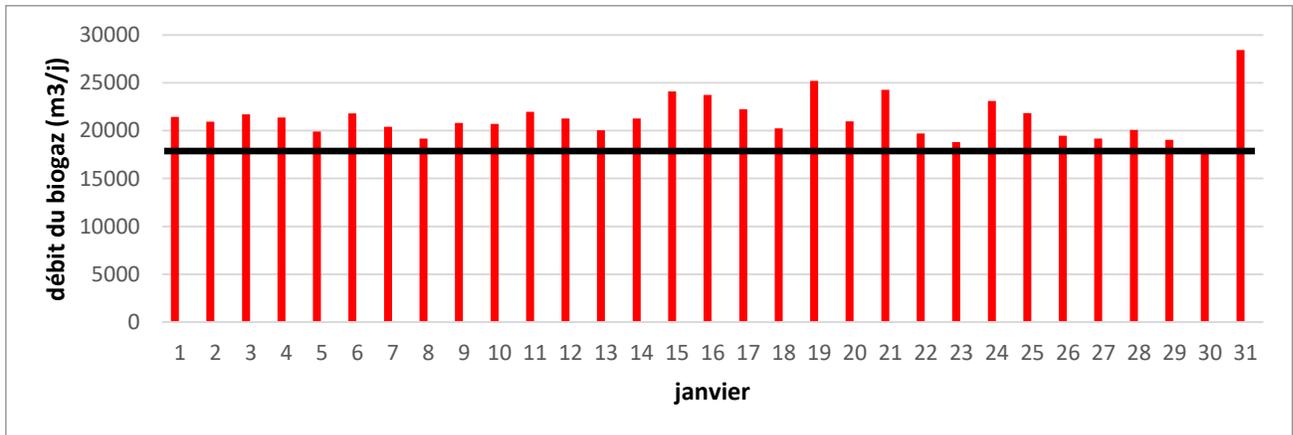


Figure 49 : Débit du biogaz produit en janvier 2017

- **Débit du biogaz produit en février 2017**

Les débits du biogaz dépassent la valeur nominale pendant ce mois. Il atteint jusqu'à 26.547m³/j (Fig.50).

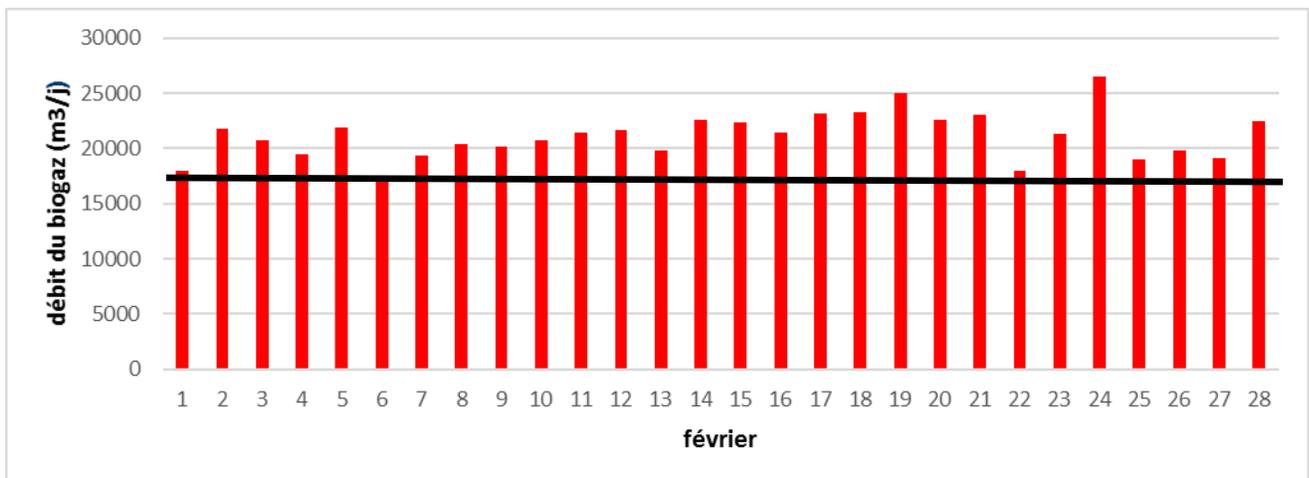


Figure 50 : Débit du biogaz produit en février 2017

- **Débit du biogaz produit en mars 2017**

Les débits dépassent la valeur nominale pour la majorité des jours de ce mois. Le plus grand débit est de 22.751m³/j et la plus faible est de 10.124m³/j (Fig.51).

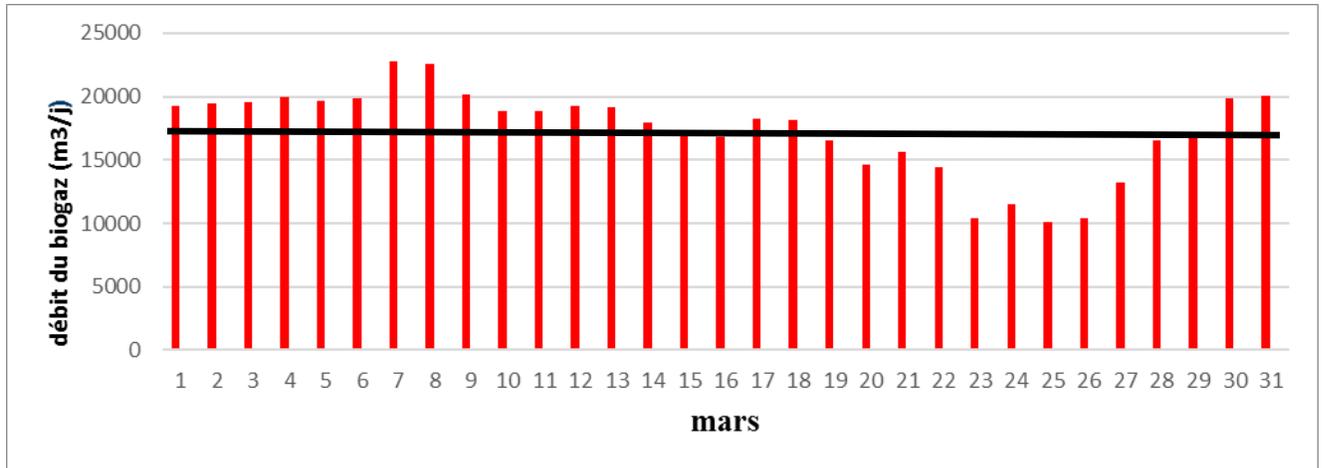


Figure 51 : Débit du biogaz produit en mars 2017

VI.2.3. Ratio du biogaz produit / MSV éliminée

- Ratio du biogaz produit / MSV éliminée en 2016 et 2017

Tous les ratios des productions de biogaz sont supérieurs à la valeur nominale (0,8Nm³/kg MSV éliminée), indiquant une bonne production. Un pic de 10,8Nm³/kg MSV est observé le 23 octobre (Fig. 52 et 53).

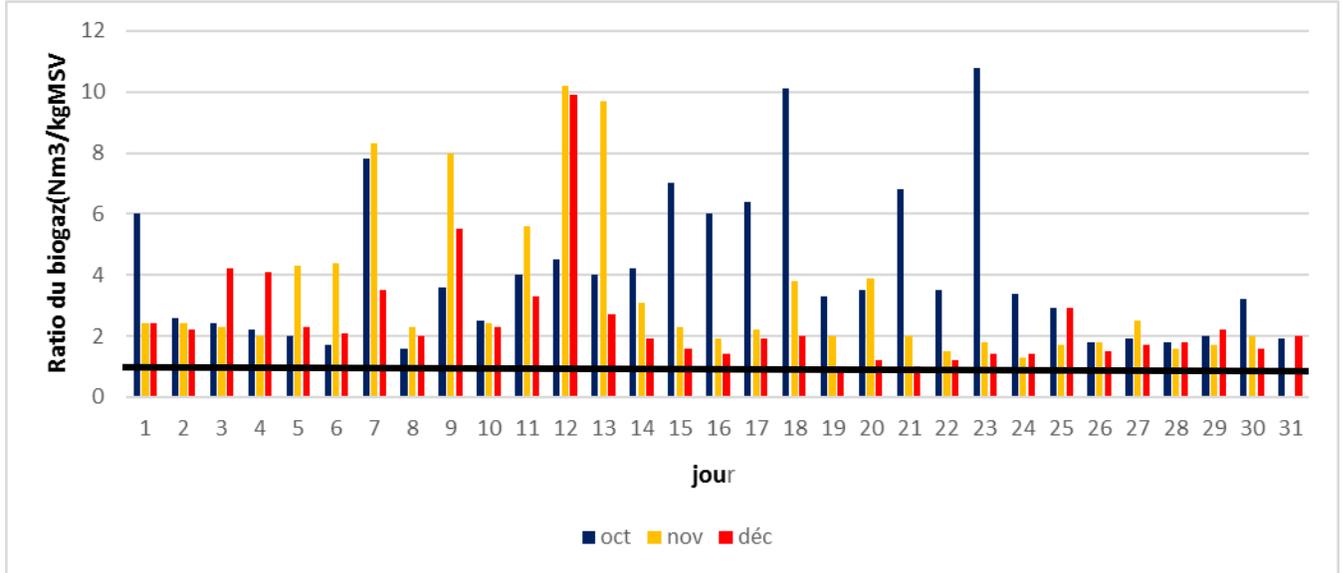


Figure 52 : Ratio du biogaz produit / MSV éliminée en 2016

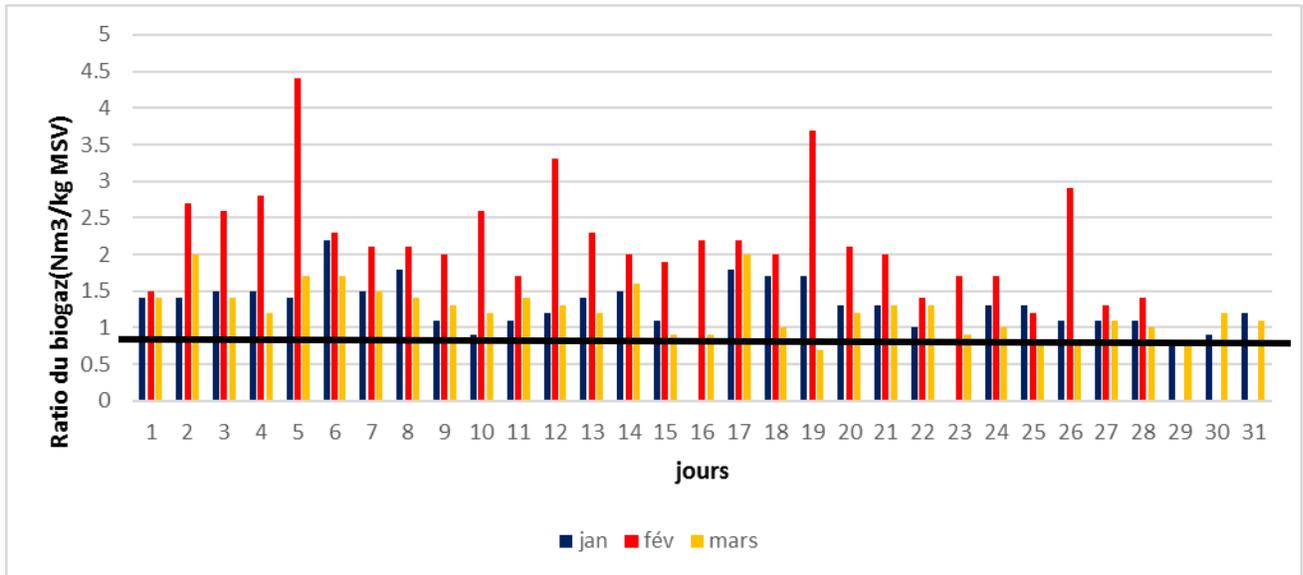


Figure 53 : Ratio du biogaz produit / MSV éliminée en 2017

VI.2.4. Teneur en H₂S :

Les valeurs de teneurs en H₂S dépassent la nominal (3000ppm). Mais tous les rendements d'élimination sont supérieurs au nominal (80%) indiquant une bonne qualité du biogaz désulfuré. Les valeurs du teneur en H₂S et du rendement d'élimination se trouvent dans le tableau 7 et tableau 8 de l'Annexe 2.

VII. Discussion et Recommandation

VII.1. Acides Gras Volatiles (AGV)

La concentration en AGV augmente (cinétique rapide de l'acidogénèse) avec en parallèle une acidification du milieu, ce qui peut inhiber les étapes d'acétogénèse et de méthanogénèse et entraîner un arrêt du réacteur.

L'acidose est le principal problème rencontré dans les unités de méthanisation. Elle correspond à une accumulation d'AGV dans le milieu, qui engendre une baisse du pH. Il en résulte l'inhibition de l'activité des bactéries acétogènes et méthanogènes et une diminution de la production de biogaz (DEUBLEIN et STEINHAUSER, 2008). Les causes de l'acidose sont soit une trop grande quantité de matières fermentescibles introduites dans le digesteur (ration riche en lipides), soit une inhibition des bactéries acétogènes et méthanogènes entraînant une accumulation d'AGV.

Dans le cas de la STEP de Marrakech, l'accumulation d'AGV est due à l'introduction d'une grande quantité de matières fermentescibles dans les digesteurs. Comme observé dans le tableau d'alimentation, les charges massiques des digesteurs dépassent toujours les quantités nominales.

En effet, il y a une augmentation brutale de la production d'AGV par la voie de l'acidogénèse. Les bactéries acétogènes et méthanogènes ne parviennent pas à digérer : acidogénèse > acétogénèse.

VII.2. Teneur en H₂S

La concentration de H₂S au niveau du biogaz produit dépasse pour la majorité des jours des mois les 3000pppm. Cela peut être liée à la réception presque en continue au niveau des eaux brutes des concentrations très élevées en sulfures qui peut atteindre 7, 24 mg/l.

L'hydrogène sulfuré peut poser des divers problèmes au niveau de la station. L'hydrogène sulfuré est le principal responsable de la corrosion des matériaux de construction et des matières d'une installation de biogaz. En présence d'humidité, il y a une formation d'acide, la part l'hydrogène sulfuré est oxydé et il se forme anhydride sulfureux acide :

$2\text{H}_2\text{S} + 3\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$. C'est produit (SO₂), émis dans l'atmosphère, est un gaz à effet de serre.

Ces problèmes sont évités grâce à la désulfuration du biogaz mise en place. Les rendements de la désulfuration sont toujours supérieurs à la valeur nominale (80%), c'est-à-dire, presque la totalité de H₂S produit sont éliminé du biogaz.

Recommandation

Dans le cas d'une accumulation liée à un excès de matières fermentescibles, la première réaction doit être d'arrêter l'alimentation du digesteur. Les bactéries acétogènes et méthanogènes vont consommer les AGV présents et en faire diminuer la concentration totale. Il conviendra aussi de revoir le ratio pour éviter un nouveau dysfonctionnement.

L'ajout d'hydrogénocarbonate de sodium (NaHCO_3), et voire de chaux ou de carbonate de calcium (CaCO_3) constitue une solution curative. L'objectif est de ramener le pH vers les valeurs proche de la neutralité (de l'ordre de 7,8 en général) et renforcer le pouvoir tampon (Alcalinité) des digestats.

VIII. Conclusion

La digestion anaérobie des boues est un procédé plus que centenaire qui permet de réduire les matières sèches des boues à éliminer de l'ordre de 35 à 40 %. Elle permet également de stabiliser la matière organique et donc de diminuer les nuisances olfactives tout en produisant une énergie valorisable, le biogaz. Les installations de méthanisation sont jugées très efficaces pour la gestion des boues. La réduction des volumes de boues (même dans le cas le moins favorable de boues biologiques seules) permet de réduire les coûts de transport et d'élimination.

La station d'épuration de Marrakech est une référence en termes de digestion anaérobie des boues et de production d'électricité à partir du biogaz issu de cette digestion. En effet, le suivi des paramètres de digestion a permis de mettre en évidence un respect des normes requises, en termes de pH, température et temps séjour, malgré un taux d'abattement inférieur à la valeur nominale. A la STEP de Marrakech, les solutions aux problèmes qui empêchent le bon fonctionnement des digesteurs sont déjà employées. En parallèle, il est recommandé de suivre régulièrement les paramètres ainsi que les installations du procédé pour que l'objectif de ce procédé soit atteint. Et en termes de teneur élevée en H_2S , des méthodes d'épuration du biogaz sont employées pour avoir un biogaz répondant aux normes des consommateurs et qui ne nuit pas aux installations.

ANNEXES

Annexe 1. Traitement des eaux usées :

I. Prétraitement

• Dégrillage

La première étape de la station d'épuration des eaux usées est un traitement d'écran. Des composés volumineux comme le papier, les chiffons, les branches, les plastics, sont retenus à l'aide d'une succession de grilles des tailles variantes (prégrille 20cm, grossière 8cm et fine 1cm). Les écrans peuvent être statiques ou en mouvement. Les particules retenues sont éliminées vers la décharge Public.

a. Fosse à bâtard :

Volume : 4,5 m³

b. Pré –dégrillage :

- L'étape du pré-dégrillage est assurée par une grille manuelle
- L'écartement des barreaux : 200 mm - Largeur du canal : 3 m

c. Dégrillage moyen :

- 4 unités dont 1 manuelle -Ecartement des barreaux : 100 mm
- Largeur du canal : 1,5 m -1 vis d'évacuation des déchets dans une benne de 20 m³

d. Dégrillage fin:

- 4 unités dont 1 manuelle ; -Ecartement des barreaux : 10 mm ;
- 1 vis d'évacuation des déchets dans une benne de 20 m³.

• Dessablage – déshuilage

Le sable ou le gravier est un composé inorganique à base de silice, qui peut provoquer l'érosion des pompes, des tuyaux et des vannes. La meilleure façon d'enlever les grains est par sédimentation gravitaire. Il consiste ensuite à faire passer l'eau dans des bassins où la réduction de vitesse d'écoulement fait se déposer les sables et flotter les graisses. Il est toutefois important que seulement les grains se déposent, et non pas les composés organiques, en raison de problèmes d'odeurs par la suite. L'injection des microbulles d'air permet d'accélérer la flottation des graisses. Les sables sont récupérés par pompage alors que les graisses sont raclées en surface.

Les éléments grossiers et les sables de dimension supérieure à 200 μ ainsi que 80 à 90 % des graisses et matières flottantes (soit 30 à 40 % des graisses totales) sont ainsi enlevés de l'eau. Les sables sont récupérés par pompage puis collectés pour être déposée en charge publique alors que les graisses sont raclées en surface et acheminées vers l'unité de traitement des graisses.

e. Dessableur– déshuileur:

- 2 unités doubles
- 1 pont par unité double
- Surface totale : 400 m²
- Volume totale : 1200 m³
- Longueur : 25m
- Largeur : 5m

II. Traitement Primaire

a. Décantation primaire

- 1 ouvrage de répartition
- 3 décanteurs de 39 m de diamètre
- Surface totale : 3.585 m²
- Volume total : 3971 m³
- 3 ponts racler
- 5 pompes à boue (2 au décanteur A et 3 pour les décanteurs B et C)

III. Traitement secondaire

• Bassin d'aération

L'ouvrage est un chenal concentrique autour de la zone de contact. Compte tenu des conditions locales, la nitrification a lieu pendant de 8 à 5 jours avec un effluent à 20°C et à 30°C respectivement. Si la température de l'effluent est inférieure à 20°C par exemple en hiver, la

nitrification ne sera que partielle. Le bassin d'aération dont le nombre est 4, se caractérise par un volume unitaire de 16 250 m³ et un volume air surpressé de 70 000 Nm³/h.

a. Bassin Biologique

- Matériaux béton
- Nombre d'unité : 4
- Volume actif : 16034 m³
- Longueur : 76,6 m
- Largeur : 38 m
- Surface : 2620 m²
- Niveau d'eau : 6,12 m

b. Clarificateurs

- Matériaux béton
- Nombre d'unité : 4
- Volume actif : 10100 m³
- Diamètre : 56,7 m
- Surface : 2525 m²
- Niveau d'eau : 4,00 m

IV. Traitement Tertiaire

a. Bassin de coagulation

- Matériau béton
- Nombres : 2
- Longueur : 4,7 m
- Largeur : 4,7 m
- Surface : 22,1 m²
- Niveau d'eau : 3,47 m
- Volume : 76,7 m³

b. Flocculation

- Matériau béton
- Nombres n = 4
- Longueur : 6,0 m
- Largeur : 6,35 m
- Surface : 38,1 m²
- Niveau : d'eau 3,4 m
- Volume : 129,5 m³

V. Traitement des Boues

a. Epaissement gravitaire

- Type gravitaire

- Diamètre : 15 m
- Surface unitaire : 177 m²
- Hauteur cylindrique : 3,5 m
- L'extraction des boues des épaisseurs se fait par le biais de 3 pompes volumétriques de 7 à 20 m³/j

b. Digestion

- Matériaux béton
- Nombre d'unité : 4
- Volume actif : 6000 m³
- Diamètre : 25,54 m
- Hauteur : 17,78 m
- Hauteur de boues : 12,3 m
- Surface : 460 m

Annexe2. Les paramètres de la performance du procédé de la digestion Anaérobie

Tableau1 : Les pH des quatre digesteurs durant octobre et novembre 2016

Jours	Octobre 2016				Novembre 2016			
	632A	632B	D6301	D6302	632A	632B	D6301	D6302
1	7.44	7.27	7.39	7.14	7.55	7.53	7.57	7.59
2					7.51	7.57	7.49	7.56
3					7.41	7.4	7.39	7.41
4	7.42	7.36	7.47	7.48	7.38	7.54	7.33	7.36
5	7.34	7.54	7.47	7.46	7.35	7.46	7.34	7.42
6	7.38	7.54	7.44	7.34				
7	7.27	7.38	7.36	7.42	7.36	7.43	7.3	7.36
8	7.31	7.35	7.38	7.39	7.41	7.61	7.39	7.38
9					7.3	7.37	7.3	7.35
10	7.21	7.43	7.44	7.49	7.35	7.38	7.37	7.43
11	7.22	7.47	7.51	7.5	7.44	7.49	7.4	7.4
12	7.3	7.59	7.59	7.6	7.4	7.41	7.36	7.4
13	7.35	7.53	7.57	7.57				
14	7.27	7.5	7.54	7.53	7.36	7.39	7.33	7.38
15	7.42	7.42	7.49	7.48	7.48	7.62	7.41	7.37
16					7.45	7.44	7.36	7.38
17	7.66	7.61	7.45	7.5	7.4	7.3	7.27	7.3
18	7.72	7.67	7.58	7.52				
19	7.52	7.48	7.54	7.51	7.36	7.31	7.32	7.37
20	7.38	7.45	7.52	7.46				
21	7.42	7.47	7.51	7.5	7.42	7.4	7.38	7.45
22	7.42	7.5	7.57	7.56	7.3	7.37	7.41	7.34
23					7.36	7.34	7.34	7.38

24	7.52	7.55	7.68	7.57	7.36	7.4	7.33	7.41
25	7.39	7.41		7.52	7.29	7.37	7.32	7.37
26	7.44	7.54	7.52	7.65	7.3	7.36	7.32	7.39
27	7.43	7.44	7.45	7.3			7.32	
28	7.37	7.41	7.49	7.54	7.32	7.39	7.42	7.39
29	7.46	7.47	7.49	7.59	7.39	7.36	7.42	7.56
30					7.24	7.33	7.3	7.4
31	7.53	7.54	7.56	7.52				
Moy.	7.41	7.48	7.50	7.49	7.37	7.42	7.37	7.41

Tableau2 : Les pH des quatre digesteurs durant Décembre

jour	632A	632B	D6301	D6302
1	7.27	7.38	7.35	7.4
2	7.2	7.25	7.22	7.3
3	7.31	7.39	7.28	7.3
4				
5	7.32	7.35	7.32	7.37
6	7.39	7.35	7.26	7.25
7	7.23	7.28	7.21	7.24
8	7.29	7.45	7.28	7.29
9	7.2	7.34	7.35	7.5
10	7.29	7.28	7.27	7.33
11				
12				
13				
14	7.36	7.43	7.3	7.32
15	7.31	7.33	7.25	7.26
16	7.24	7.36	7.22	7.23
17	7.39	7.42	7.33	7.35
18				
19	7.45	7.41	7.33	7.34
20	7.27	7.33	7.3	7.28
21	7.37	7.39	7.24	7.26
22	7.37	7.29	7.34	7.32
23	7.33	7.36	7.3	7.27
24	7.27	7.31	7.3	7.31
25				
26	7.24	7.3	7.31	7.33
27	7.34	7.43	7.36	7.31
28	7.32	7.43	7.5	7.34

29	7.44	7.52	7.5	7.49
30	7.43	7.51	7.42	7.43
31		7.43	7.43	7.46
Moy.	7.00	7.37	7.32	7.33

Tableau 3 : Les pH des quatre digesteurs durant janvier et février

jours	Janvier				Février			
	632Ajan	632B	D6301	D6302	632A	632B	D6301	D6302
1					7.42	7.46	7.43	7.41
2	7.41	7.41	7.32	7.4	7.37	7.48	7.37	7.43
3	7.28	7.24	7.22	7.24	7.47	7.42	7.35	7.37
4	7.61	7.59	7.47	7.52	7.67	7.57	7.38	7.41
5	7.49	7.56	7.4	7.46				
6	7.48	7.54	7.49	7.51	7.47	7.54	7.39	7.44
7	7.45	7.44	7.51	7.42	7.49	7.5	7.37	7.41
8					7.65	7.69	7.44	7.4
9	7.41	7.43	7.39	7.42	7.51	7.47	7.36	7.4
10	7.36	7.41	7.37	7.31	7.65	7.68	7.49	7.44
11					7.71	7.77	7.43	7.45
12	7.27	7.32	7.3	7.31				
13	7.3	7.37	7.23	7.14	7.55	7.57	7.55	7.57
14	7.46	7.52	7.38	7.33	7.51	7.47	7.43	7.45
15					7.56	7.46	7.52	7.49
16	7.37	7.35	7.28	7.34	7.5	7.49	7.46	7.47
17	7.48	7.52	7.43	7.51	7.49	7.5	7.45	7.48
18	7.35	7.45	7.36	7.37	7.44	7.52	7.48	7.49
19	7.6	7.66	7.57	7.57				
20	7.3	7.34	7.26	7.31	7.46	7.52	7.56	7.53
21	7.57	7.48	7.44	7.46	7.59	7.59	7.56	7.59
22					7.57	7.54	7.5	7.52
23	7.49	7.57	7.44	7.46	7.54	7.59	7.58	7.59
24	7.61	7.6	7.44	7.35	7.49	7.52	7.8	7.6
25	7.49	7.54	7.43	7.42	7.43	7.47	7.57	7.63
26	7.42	7.58	7.48	7.48				

27	7.72	7.72	7.37	7.54	7.49	7.54	7.51	7.55
28	7.59	7.67		7.43	7.43	7.43		7.57
29								
30	7.37	7.49	7.42	7.45				
31	7.48	7.51	7.39	7.44				

Tableau 4 : Les pH des quatre digesteurs durant mars

jour	632A	632B	D6301	D6302
1	7.55	7.61	7.63	7.66
2	7.55	7.64	7.56	7.58
3	7.24	7.34	7.33	7.38
4	7.3	7.33	7.38	7.39
5	7.42	7.3	7.3	7.34
6	7.26	7.28	7.31	7.36
7	7.21	7.31	7.33	7.34
8				
9	7.51	7.52	7.54	7.57
10	7.39	7.49	7.48	7.52
11	7.5	7.52	7.52	7.52
12				
13	7.4	7.43	7.43	7.45
14	7.48	7.45	7.47	7.48
15	7.55	7.61	7.56	7.58
16	7.42	7.54	7.48	7.51
17	7.39	7.47	7.4	7.42
18	7.66	7.71	7.66	7.69
19				
20	7.63	7.8	7.73	7.72
21	7.66	7.73	7.68	7.69
22	7.59	7.76	7.71	7.72
23	7.54	7.61	7.6	7.62
24	7.53	7.61	7.59	7.6
25	7.39	7.46	7.49	7.47
26				

27	7.4	7.61	7.55	7.56
28	7.51	7.58	7.33	7.61
29	7.4	7.54	7.33	7.37
30	7.31	7.43	7.42	7.47
31	7.45	7.47	7.38	7.42
Moy.	7.45	7.52	7.49	7.52

Tableau5 : Les températures des quatre digesteurs pendant les six mois

Jours	Oct-16				Nov-16				Dec-16				Jan-17				Feb-17				Mar-17			
	Température en °C																							
	632A	632B	D6301	D6302																				
1	43.6	44	34.2	35.8	37.6	39.8	34.7	34.5	34.7	37.8	31.4	33.3	35.6	36.5	33.8	35.2	39.5	39.7	33.6	34.7	35.5	36.7	35.4	34.9
2	43.6	44.1	33.9	35.8	37.6	39.5	34.6	34.2	34.8	38	31.5	33	35.9	36.8	33.9	35.5	39.5	39.8	33.5	34.6	34.6	36	35.4	35.4
3	42.9	44.2	33.9	35.7	36.6	38.4	34.6	33.9	34.8	38	31.6	33.1	36.2	37	34.1	35.3	39.9	40.1	33.5	34.1	34.7	35.9	35.3	35.6
4	44.2	44.6	33.9	35.8	35.9	37.7	34.7	33.6	35.1	38.3	31.4	33	36.3	37.1	34	35.3	40.4	40.7	33.7	34.1	35.5	36.3	35.2	35.2
5	42.6	43.8	33.9	35.8	35.3	37.2	34.7	34.1	34.9	38.3	31.2	32.6	36.2	36.9	34.1	35.1	40.4	40.6	33.6	34.2	36	37.1	35.1	35.2
6	41	42.2	34.2	36.8	35.9	37.9	34.7	34.4	34.6	37.9	31.1	32.3	36.3	37	34	35	39.8	40.1	33.8	34.4	36.3	37	35.1	35.3
7	40.9	42.5	34.2	37.1	35.1	37.2	34.3	34.5	34.4	37.6	31.4	32.5	36.2	36.9	33.8	34.8	39.4	39.5	34	34.4	36.2	37	35.1	35.5
8	40.4	41.5	34.2	37.4	35.6	37.7	34.3	34.7	33.5	36.7	30.6	31.9	35.9	36.6	33.6	34.6	38.7	39.4	34.1	34.2	36.9	37.8	35.2	35.5
9	39.8	41.6	34.2	37.7	36.3	38.7	32.4	34.4	33.6	36.8	31.8	33.1	36.4	36.9	33.4	34.5	39.4	39.6	34.2	34.2	36.9	37.7	35.3	35.5
10	39	40.4	34	37.6	35.8	37.8	33.8	34.1	33.7	36.7	32.6	33.7	36.8	37.4	33.4	34.4	38.5	38.9	34.2	34	37.3	38	35.2	35.6
11	38.2	39.7	34.2	37.7	35.6	37.5	33.8	34.1	33.5	36.4	33	34.1	37.8	38	33.6	34.2	38.1	38.2	34.4	34.2	37.5	38.2	35.6	36.1
12	37.3	38.9	34.2	37.3	35.6	37.6	33.9	34.2	33.3	36.3	33.1	34.3	38.4	38.3	33.7	34	38.4	38.6	34.5	34.6	38.4	38.9	35.7	36.2
13	37.7	38.8	34.4	36.4	36	38	33.8	34.2	32.8	35.8	33.1	34.2	38.7	38.5	33.7	33.9	37.3	37.4	34.8	34.3	38.6	38.9	35.7	36.2
14	38.2	39.2	34.3	36.3	36.2	38.3	33.7	34.1	32.6	35.5	33.2	34	38.4	38.8	33.7	33.7	38	38.3	34.9	34.7	38.7	38.9	35.6	35.8
15	37.9	38.1	34.4	35.7	35.2	37.1	33.6	34	33.1	36.3	32.9	33.9	38.9	38.8	33.7	33.5	37.3	37.4	35	34.4	38.8	38.8	35.4	35.8
16	37.2	37.4	34.6	35.4	34.4	36.2	33.6	34.1	33.9	35	32.9	33.8	39.2	39	33.7	33.5	37.4	37.8	35.1	34.6	39	39.4	35.2	35.3
17	36.8	36.6	34.7	35.1	34.4	36.3	33.6	34.3	33.6	35	32.9	33.4	39.1	39.2	33.8	33.4	38.3	38.6	34.9	34.3	38.9	39	35	35.2
18	36.3	35.9	34.7	34.9	35.2	37.2	33.4	34	34.3	35.6	32.8	33.4	39.3	39.4	33.8	33.3	37.8	37.9	35	34.4	39.1	39.4	35	35.1
19	35.9	35.5	34.8	35.5	35.3	37.4	33.2	33.9	34.3	35.7	32.6	33.2	39	38.9	33.7	33	36.4	37	35.1	34.6	38.2	38.5	35.2	35.4
20	35.3	34.8	34.8	35.8	35.3	37.5	33.1	34	34.4	35.4	32.3	32.8	38.5	38.7	33.8	33.5	35.6	36.3	35.1	34.6	37.3	37.7	35.2	35.1
21	34.8	34.9	34.8	36.2	35.4	37.8	33.1	34	34	35	32.2	32.7	38.3	38.5	33.6	33.6	36	36.4	35.1	34.4	36.6	37.2	35.2	35.3
22	34.4	34.2	33.6	36	34.6	36.8	33	33.9	34.1	35.2	32.3	33	37.8	38.1	33.4	33.2	35.5	35.8	35.3	34.8	35.9	36.1	35.2	35.4
23	33.6	33.8	32.8	36.8	35.2	37.6	31.1	31.8	34.1	35	32.9	33.5	37.8	37.9	33.2	33.3	35.1	35.8	35.2	34.8	34.9	35.2	35.1	35.2
24	33.3	33.6	32.1	37.1	35.2	37.8	32.5	33.5	34.8	35.5	32.9	33.6	38.5	38.4	33.1	33.4	35.4	35.9	35.2	35	34.8	35.4	35.1	35
25	33.4	33.9	33.6	37.1	35.1	37.8	32	33.3	34.8	35.5	33.2	33.9	38.8	38.8	33.1	33.3	35.6	36	35.1	35.3	34.5	35.1	35.1	35
26	34	35.1	33.8	36.9	34.3	37	31.9	33.3	35.1	35.8	33.3	34.2	38.3	38.1	32.9	33.2	36	36.4	35.2	35.3	34.2	34.9	35	35.2
27	34.4	35.6	34	36.4	33.1	35.6	31.9	33.4	34.4	35.4	32.3	32.8	38.4	38.7	32.8	32.8	36.4	36.7	35.2	34.5	33.5	34	35.1	35.3
28	34.9	36.3	34.3	36	34	36.7	31.8	33.5	35.2	35.8	33.7	34.6	38.4	38.5	33	33.3	37.8	37.6	28.1	32.9	33.5	34.2	35.1	35.6
29	35.4	36.9	34.4	35.7	34.4	37.3	31.7	33.6	35.6	36.1	33.9	34.6	38.8	39.1	32.8	33.4					34.3	35.2	35.2	35.9
30	35.8	37	34.6	35.2	34.4	37.4	31.5	33.5	35.5	36.1	33.8	34.7	39.4	39.7	33.3	33.9					34.3	35.2	35.3	36.1
31	37.3	39.1	34.8	34.9					35.5	36.2	33.8	34.9	39.5	39.7	32.8	33.6					34.6	35.4	35.5	36.4
Moy.	37.7	38.5	34.1	36.3	35.4	37.6	33.3	33.9	34.3	36.3	32.5	33.5	37.8	38.1	33.5	34	37.8	38.1	34.3	34.4	36.3	36.9	35.3	35.5

Tableau 6 : Temps des séjours pour les six mois

jours	octobre	novembre	décembre	janvier	février	mars
1	19	28	18	23	25	19
2	18	29	19	21	16	13
3	20	30	23	20	31	20
4	22	35	19	20	38	24
5	18	37	17	27	16	18
6	26	25	19	14	25	20
7	21	20	21	19	24	22
8	21	36	20	18	17	23
9	19	22	18	29	42	21
10	28	18	23	41	19	21
11	20	22	19	26	30	23
12	22	21	17	20	29	24
13	16	15	15	16	12	20
14	13	17	16	16	20	13
15	20	17	14	1	21	22
16	38	19	27	21	42	42
17	29	25	21	14	29	14
18	39	24	19	15	25	25
19	20	17	22	16	24	50
20	23	18	24	29	30	23
21	22	21	19	22	24	21
22	26	25	19	39	15	18
23	26	25	25	42	22	31
24	17	15	24	23	13	22
25	27	18	15	27	20	29
26	23	29	20	24	20	29
27	24	20	24	28	25	20
28	26	34	24	33	24	24
29	31	19	28	45		29
30	24	19	22	38		22
31	24		22	27		20
moyens	23	23	20	25	24	23

Tableau7 : Teneur en H₂S pour les six mois

Teneur en H2S (ppm) pour les six mois						
Jours	octobre	novembre	décembre	janvier	février	mars
1	3,816	3,257	3,592	3630	4032	4120
2	3,816		3,581	3521	4374	3940
3	3,896		3,600	3618	4150	4020
4	3,896		3,675	3670	4087	3856
5	3,896		3,600	3705	4006	3815
6	3,835	3,146	3,667	3630	3860	3922
7	3,945	3,346	3,636	3658	3940	3789
8	3,930	3,074	3,551	3884	3856	3633
9	4,020	3,316	3,645	3799	3886	3540
10	4,500		3,744	3678	3641	3620
11	5,000		3,846	3864		3507
12	5,000		3,820	3940	3973	3481
13	5,000		3,688	3900	3859	3474
14	3,898	3,910	3,537	4040	3840	3356
15	3,675	3,841	3,642	4027	3800	3245
16	3,673	3,650	3,669	3952	3853	3360
17	5,000	3,750	3,467	3987	3787	3233
18	3,425	3,800	3,337	3854	3650	3261
19	5,000		3,206	4136	3540	3650
20	5,000		3,216	4211	3596	3486
21	3,398		3,200	3994	3646	3574
22	3,889	4,009	3,120	4080	3877	3181
23	5,000	3,931	3,166	3884	4043	3522
24	5,000	3,984	3,186			3368
25	5,000	3,994	3,194	3698	4014	3420
26	5,000	3,850	3,345	3568	3901	2433
27	5,000	3,855	3,420	3985	4011	2835
28	5,000	3,574	3,700	3948	4120	3245
29	5,000	3,579	3,400	3900		3094
30	3,391	3,570	3,548	3970		3426
31	5,000		3,567	3930		3087

Tableau8: Rendement d'élimination de H2S

jour	octobre	novembre	décembre	janvier	février	mars
1	99%	99%	100%	89%	93%	93%
2	76%		99%	88%	93%	92%
3	97%		92%	81%	97%	92%
4	97%		94%	60%	97%	95%
5	95%		98%	81%	93%	94%
6	95%	99%	97%	67%	96%	94%
7	97%	97%	97%	83%	97%	97%
8	93%	99%	95%	85%	96%	96%
9	97%	99%	96%	94%	98%	93%
10	96%		99%	94%	97%	92%
11	98%		90%	74%		96%
12	96%		100%	82%	91%	98%
13	97%		100%	82%	91%	96%
14	93%	90%	100%	92%	98%	98%
15	94%	92%	99%	93%	95%	98%
16	90%	81%	99%	99%	96%	99%
17	85%	99%	100%	98%	95%	99%
18	77%	98%	100%	98%	94%	99%
19	93%		100%	91%	94%	99%
20	86%		100%	95%	92%	99%
21	86%		100%	78%	94%	100%
22	97%	89%	100%	93%	93%	99%
23	96%	99%	100%	93%	92%	98%
24	97%	92%	100%			99%
25	98%	97%	100%	98%	89%	98%
26	99%	90%	100%	98%	89%	99%
27	99%	75%	100%	90%	90%	100%
28	98%	96%	100%	89%	87%	96%
29	98%	97%	100%	91%		97%
30	98%	98%	100%	92%		98%
31	99%		100%	93%		97%
moyens	94%	94%	98%	88%	94%	97%

Bibliographies:

GROUPEMENT GOLDEN STATE, WATERLEAU, SOTRADEMA, EUSEBIOS,
R.A.D.E.E.M.A. – *Réalisation de la deuxième phase et exploitation de la station d'épuration de Marrakech*, Marrakech, 137.p

RADEEMA, GROUPEMENT GOLDEN STATE, WATERLEAU, SOTRADEMA, EUSEBIOS, 2012. *Phase 2. Station d'épuration des eaux usées. Traitement secondaire et tertiaire - Traitement des boues et du biogaz – Traitement de l'air vicié. Manuel processus et opération*, Marrakech

RADEEMA, WATERLEAU, 2016, *Rapport d'Exploitation Mensuel d'Octobre*. Rapport interne inédit, Marrakech, 40.p

RADEEMA, WATERLEAU, 2016, *Rapport d'Exploitation Mensuel de novembre*. Rapport interne inédit, Marrakech, 40.p

RADEEMA, WATERLEAU, 2016, *Rapport d'Exploitation Mensuel de décembre*. Rapport interne inédit, Marrakech, 40.p

RADEEMA, WATERLEAU, 2017, *Rapport d'Exploitation Mensuel de janvier*. Rapport interne inédit, Marrakech, 40.p

RADEEMA, WATERLEAU, 2017, *Rapport d'Exploitation Mensuel de février*. Rapport interne inédit, Marrakech, 40.p

RADEEMA, WATERLEAU, 2017, *Rapport d'Exploitation Mensuel de mars*. Rapport interne inédit, Marrakech, 40.p

RABIBISOA V, 2012. *Digestion anaérobie des boues de la STEP de Marrakech : suivi de la qualité des boues et amélioration de la qualité du biogaz*. Mémoire de fin d'étude (Master), Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech 25.p

Asma ESSAOUIDI Asma & ETTAMIRY Ilham, 2013, *L'amélioration du rendement du réseau de distribution d'eau potable de Marrakech et son impact sur les ressources en eau*. Mémoire de fin d'étude (Licence), Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech,48.p

KHELLALI Majda & OUTAHAR Maryem, 2015, *Caractérisation des boues déshydratées de la Station d'Epuration des Eaux usées de Marrakech. Application à la valorisation*. Mémoire de fin d'étude (Licence), Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech, 54.p

Webographie

<https://www.radeema.ma/step> (Consulté le 19/04/2017)

http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0405/beiere/4/html/binome3/boue_met.htm

(Consulté le 26/04/2017)

<http://saidi.ma/memoires/aityouns-azzouzi.pdf> (Consulté le 02/05/2017)

[http://www.kronosecochem.com/ehome_fr.nsf/Multi%20Media%20Files/711C5065AD8C810985257BC10055872E/\\$File/TI%205_01_FR_hydrog%C3%A8ne%20sulfur%C3%A9-biogaz.pdf?OpenElement](http://www.kronosecochem.com/ehome_fr.nsf/Multi%20Media%20Files/711C5065AD8C810985257BC10055872E/$File/TI%205_01_FR_hydrog%C3%A8ne%20sulfur%C3%A9-biogaz.pdf?OpenElement) (Consulté le 17/05/2017)

http://www.memoireonline.com/11/12/6475/Contribution--la-valorisation-de-boues-de-station-d-epuration-par-l-appreciation-d-une-nouvelle.html#_Toc296435807 (Consulté le 17/05/2017)

http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0405/beiere/4/html/binome3/proc_met.htm (Consulté le 20/2017)