



Compostage-méthanisation des fermentescibles solides urbains de la commune de Chlef (Algérie)

Naima TAHRAOUI DOUMA^{a,*}, Nacéra CHAOUTI^{a,b}, Amina FELLOUH^{a,b}, Serge CHAMBON^{b,c}

^a Laboratoires: Eau et Environnement, université Hassiba Benbouali de Chlef, BP 151 Hay Essalam 02000 Chlef, Algérie. Centre de ressources technologiques pour l'environnement (ODESSOL), Ecole Nationale Supérieure des Ingénieurs de Limoges (ENSIL, 16 rue Atlantis Parc ESTER Technopole 87068 Limoges, France.

^b Université Hassiba Benbouali de Chlef, BP 151 Hay Essalam 02000 Chlef, Algérie.

^c Centre de ressources technologiques pour l'environnement (ODESSOL), Ecole Nationale Supérieure des Ingénieurs de Limoges (ENSIL, 16 rue Atlantis Parc ESTER Technopole 87068 Limoges, France.

Résumé

A Chlef, la gestion des bio-déchets solides urbains se limite à « tout à la décharge contrôlée ou sauvage ». Ces bio-déchets peuvent être traités par compostage-méthanisation. Dans cette optique, deux régimes de températures ont été choisis, le régime mésophile (35 °C) et le régime thermophile (55 °C). Le choix d'un pH neutre, est une valeur optimale indiquant la stabilité et le bon déroulement de la digestion anaérobie. Ainsi qu'un suivi des paramètres du processus de compostage. Les résultats du compostage, montrent que les valeurs de la température (35 °C à 62 °C), du pH (5 à 8), le taux d'humidité (60 % et 40 %) et le pourcentage de la matière organique (74 % à 41 %) montrent le bon déroulement de la fermentation. Le compostage rentre en phase de refroidissement au bout du 60^{ème} jour de fermentation. Alors, que les résultats de la méthanisation montrent qu'un substrat dont, le taux en matière organique de 73 % provoque une accumulation d'acides dans le digesteur et un arrêt de la réaction dans des conditions mésophiles. Donc, le mode thermophile est plus approprié pour la dégradation anaérobie des biodéchets bruts. Les tests étaient concluants par l'obtention d'un biogaz inflammable. Les valeurs des rapports AGV/TAC inférieur à 0,1 montrent le bon fonctionnement de la méthanisation. La méthanisation de deux masses du substrat au début et au cours de la phase de refroidissement du compostage permet un gain de temps de séjour, donc un coût moindre en énergie.

Mots-clés : Fermentescibles solides urbains ; Compostage ; Méthanisation ; Compost ; Biogaz.

Abstract

In Chlef, the management of urban solid bio-waste is limited to "all in controlled landfill or in wild landfill". This bio-waste can be treated by composting-methanization. With this in mind, two temperature regimes were chosen, the mesophilic regime (35°C) and the thermophilic regime (55°C). The choice of a neutral pH is an optimal value indicating the stability and the good progress of the anaerobic digestion. As well as monitoring the parameters of the composting process. The results of the composting process show that the values of temperature (35°C to 62°C), pH (5 to 8), moisture content (60% and 40%) and percentage of organic matter (74% to 41%) indicate that the fermentation process is going well. The composting process enters the cooling phase after 60th day of fermentation. While the results of the methanization show that a substrate with an organic matter content of 73% causes an accumulation of acids in the digester and a stop of the reaction in mesophilic conditions. Therefore, the thermophilic mode is more suitable for the anaerobic degradation of raw bio-waste. The tests were conclusive in obtaining a flammable biogas. The values of the VFA (Volatile Fatty Acid)/ACT (Alkalimetric Title) ratios below 0.1 show the good functioning of the anaerobic digestion. The methanization of two masses of substrate at the beginning and during the cooling phase of composting allows a gain in residence time, thus a lower energy cost.

Keywords: Fermentable urban solids; Composting; Methanization; Compost; Biogas.



1. Introduction

D'après les travaux de N. Tahraoui Douma [1], une quantité de plus de 160 tonnes de déchets urbains solides sont produites quotidiennement par les habitants de Chlef. La gestion de ces déchets par les autorités locales, se résume à la collecte, le transport et à l'enfouissement dans deux centres deux décharges contrôlées (Oum-Drou et Meknassa), ce qui provoque la génération de grands volumes de lixiviat ainsi que l'émission des gaz à effet de serre. Néanmoins, certaines quantités sont déposées dans des dépotoirs sauvages. Ces déchets contiennent dans les 50 % à 70 % de fermentescibles. L'absence des traitements biologiques (anaérobie et aérobie) de ces quantités importantes, aura un impact direct sur l'environnement et la santé (pollution des sols et de l'atmosphère).

Plusieurs travaux [2-4] ont montré que les fermentescibles peuvent être traités par tri compostage. En tenant compte de la faisabilité du compostage à petite échelle afin d'éviter l'incinération, l'enfouissement des bio-déchets, la mise en place d'un traitement par compostage et/ou par méthanisation doit prouver son intérêt économique, agronomique et écologique. Ce travail se penche sur une contribution de trouver une solution de traitement de ces derniers. Etant donné que les bio-déchets et les composts sont riches en matières organiques [1, 4], il existe une possibilité de produire le biogaz de manière beaucoup plus rentable économiquement et écologiquement.

Le but principal de cette expérience est la vérification de la production de biogaz à partir des fermentescibles à leurs états bruts et les composts produits à partir de ces bio-déchets. La méthanisation est un procédé de diminution de grandes quantités de déchets organiques et un allègement des coûts des autres filières de traitement des déchets.

Cette expérience est basée sur la dégradation aérobie de fermentescibles solides urbains et la fermentation anaérobie en deux régimes de températures (mésophile et thermophile) de plusieurs quantités de substrats pendant la phase mésophile et la phase de refroidissement du processus de compostage (substrat initial, substrat initial + compost).

Selon le pourcentage en matière organique de ces deux substrats différents, l'expérience s'est déroulée en deux parties : par compostage des fermentescibles puis

par méthanisation des substrats et méthanisation de substrats additionnés aux composts.

D'un point de vue économique, les traitements biologiques (compostage et/ou méthanisation) des bio-déchets solides urbains et ruraux, peuvent réduire les coûts de chauffage et des engrais. Et par la suite, une faible nuisance de l'environnement.

2. Situation géographique, démographique et socio-économique de Chlef

La wilaya¹ de Chlef est située au nord-ouest de l'Algérie et comptait 1 098 166 habitants en 2022 avec une superficie de 4074 km². La wilaya compte 13 daïras et 35 communes [5]. La commune de Chlef, chef-lieu de wilaya éponyme, est située à 200 km à l'ouest de la capitale Alger. La région de Chlef, appelée pleine du moyen Chelif, dont l'altitude varie entre 100 à 200 m, est caractérisée par un climat semi-aride, présentant une longue période estivale sèche et chaude, avec une saison hivernale, pluvieuse et froide. Elle s'étend sur une superficie de 125,83 km², avec un périmètre urbain qui s'étend sur une superficie de 1793,25 hectares.

La ville compte en outre un nombre d'usines et d'entreprises commerciales, à l'exemple de groupe agroalimentaire, de laiteries des usines d'aliments de bétail, d'entreprises de production et distribution de produits pharmaceutiques et parapharmaceutiques, du secteur étatique, et des zones industrielle et d'activités dont la ZI d'Oued-Sly est la plus importante en regroupant un certains nombre d'usines telles que l'[entreprise des Ciments et Dérivés \(ECDE\)](#)²; l'[usine de fabrication et d'installation de groupes Électrogènes \(GMI\)](#)³; La [briqueterie \(CTS\)](#)⁴; l'[Entreprise nationale des plastiques et caoutchoucs \(ENPC\)](#)⁵ et [NOVER](#)⁶, entreprise spécialisée dans le verre, et un [centre d'incinération des déchets hospitaliers \(GREEN SKY\)](#)⁷ [6].

La wilaya a une vocation agricole. Les terres agricoles se localisent essentiellement au nord de la commune (El Quoasmia, Bokâat El Mekhatria, Hay El

¹ Subdivision territoriale

² <http://www.ecde.dz>

³ <https://gmi-groupe.com/>

⁴ <http://www.ctsrahmoune.com/>

⁵ <https://www.enpc-dz.com>

⁶ <https://www.nover-dz.com>

⁷ <http://www.greensky.dz>

Ramlia et Tegagra). La superficie agricole totale couvre environ 75 km² (7 500 ha) soit 60 % de la superficie de la commune.

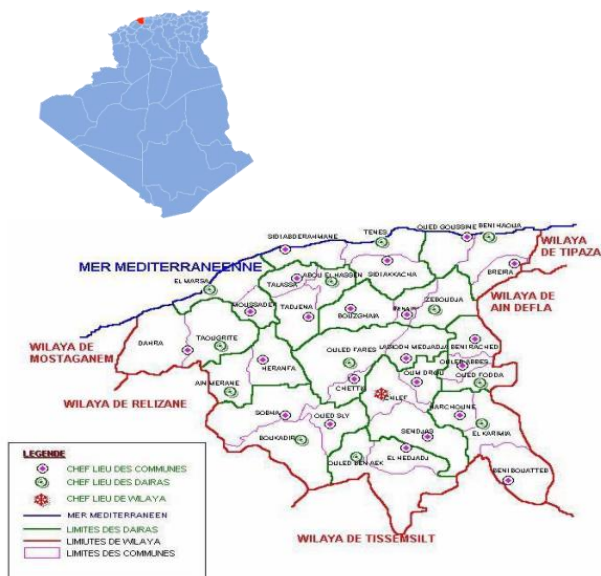


Figure 1 : Situation de la Wilaya de Chlef avec découpage administratif et limites [6]

3. Gestion des déchets à Chlef

Plus de 160 tonnes de déchets solides ménagers et autres sont collectés quotidiennement au niveau de la commune de Chlef par les autorités locales. Ces déchets sont transportés par des bennes et directement enfouis dans deux centres d'enfouissements techniques. Elles sont situées aux extrémités de la commune, une à Meknassa qui accueille quotidiennement 140 tonnes de déchet et une autre dans la commune d'Oum Drou [7].

4. Résultats et discussions

4.1. Compostage des bio-déchets

4.1.1. Composition physique des fermentescibles

Selon la méthode de caractérisation des ordures ménagères [8], les résultats de la caractérisation physique d'une tonne (en %) de résidus solides urbains de la commune de Chlef sont répertoriés dans le tableau 1.

Tableau 1
Tri par catégorie et sous-catégories des résidus solides urbains de la commune de Chlef.

| Zones | Centre-ville | Sud | Est | Nord | Ouest | |
|---------------------|--------------------|------|------|------|-------|------|
| Catégories | Sous-catégories | % | | | | |
| Putrescibles | | 58,2 | 64,6 | 51,8 | 55 | 65,9 |
| Papiers | | 4 | 4,4 | 3,7 | 4 | 3,6 |
| Cartons | | 3,4 | 3,6 | 6,1 | 5,1 | 5,7 |
| Composites | | 1,5 | 2,8 | 1,5 | 1,2 | 3,6 |
| Textiles | | 4,3 | 3,1 | 2,2 | 3 | 3,2 |
| Textiles sanitaires | | 4,7 | 5,7 | 6,7 | 8,6 | 8,3 |
| Plastiques | Films | 6,4 | 7 | 7,6 | 5,1 | 8,6 |
| | Bouteilles en PET | 2,2 | 1,6 | 4,3 | 3,2 | 2,8 |
| | Bouteilles en PVC | 1 | 1 | 0,1 | 0 | 0,4 |
| CNC | | 1,2 | 0,3 | 0,8 | 1 | 0,1 |
| Verre | | 0,9 | 1,1 | 3 | 3,1 | 0,7 |
| Métaux | Métaux ferreux | 2 | 1,6 | 1,8 | 0,9 | 1 |
| | Métaux non ferreux | 0,9 | 0,6 | 0,5 | 0,6 | 0,8 |
| INC | | 2 | 1,5 | 0,7 | 0,6 | 1 |
| Déchets dangereux | | 0,7 | 1 | 0,5 | 0,4 | 1,3 |
| Fins (< 20 mm) | | 8,2 | 2 | 1,3 | 1,7 | 1,8 |

CNC : Combustibles Non Classés ;

INC : Incombustibles Non Classés.

4.1.2. Mise en tas des déchets compostables

Les fermentescibles (putrescibles, papiers, cartons, CNC, matière fine) ont été mis en andain trapézoïdale (Figure 2). Il s'agit globalement de putrescibles, de papiers, de cartons, de combustibles non classés et matière fine. L'expérience s'est déroulée au niveau de la plate-forme de compostage de 200 m² au niveau de la station expérimentale agronomique de [l'université de Chlef](https://www.univ-chlef.dz)⁸.

⁸ <https://www.univ-chlef.dz>

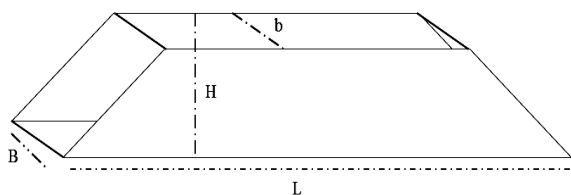


Figure 2 : Forme géométrique de l'andain.

L'andain trapézoïdal possède d'une part une bonne aptitude au stockage de l'eau en cas de sécheresse et d'autre part une bonne aptitude à l'absorption de l'eau en cas de fortes précipitations [9]. Ce type d'andain

Tableau 2

Paramètres de suivis du compostage

| | |
|----------------------|--|
| T (°C) | La température est retenue comme principal paramètre de suivi de la dégradation aérobie du substrat. La température a été mesurée par un thermomètre à mercure. |
| pH | Une masse de 10 g des déchets ménagers après séchage tamisé est mélangée à 100 mL d'eau distillée suivant la norme AFNOR NF ISO 10-390 de novembre 1994. Le mélange est homogénéisé pendant une heure d'agitation magnétique. La valeur du pH est mesurée à l'aide d'une électrode de verre combinée à un pH-mètre |
| % H | 100 g de substrat dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures (Equation 1) : $\% H = \frac{M_{\text{initiale}} - M_{\text{finale}}}{M_{\text{initiale}}} \times 100 \quad (1)$ |
| % MO | d'un échantillon de 10 g à 550 °C pendant deux heures (norme NF U 44-160) dans un four à moufle (Equation 2) : $\% MO = \frac{M_{\text{séchée}} - M_{\text{calcinée}}}{M_{\text{séchée}}} \times 100 \quad (2)$ |
| % C Organique | Le carbone organique dans les déchets est estimé à partir de la formule 3 [9] : $\% CO = \frac{\% MO}{2,0} \times 100 \quad (3)$ |

4.1.4. Evolution de la température

D'après le tableau 3, les résultats montrent que la température atteint 60 °C au bout du 6^{ème} jour de fermentation et atteint 62 °C au 16^{ème} jour. Cette augmentation montre que les micro-organismes sont en activité, qu'ils oxydent la matière organique des substrats et libèrent ainsi l'énergie contenue dans les liaisons chimiques des molécules constitutives. Une partie de cette énergie est récupérée par le métabolisme

peut être adapté par les pays en voie de développement (PED).

4.1.3. Evolution des différents paramètres physico-chimiques de compostage

Les paramètres physico-chimiques suivis lors de la fermentation sont : la température (T), le pH, le taux d'humidité (% H) et le taux de la matière organique (% MO) (tableau 2).

des liaisons chimiques et l'autre partie étant libérée dans l'atmosphère.

Au bout de la troisième semaine (20^{ème} jour), la température diminue pour atteindre 45 °C. Cette diminution se traduit par un processus long de dégradation. La température varie entre 37 et 33 °C jusqu'au 45^{ème} jour. Lors de cette phase, les micro-organismes dégradent les matériaux carbonés biodégradables [10]. Il y a dégagement de CO₂ et formation de H₂O. Cette étape est suivie par une étape de refroidissement (étape lente à partir du 60^{ème} jour).

Tableau 3
Variation de la température du tas parallèlement à la température ambiante.

| Temps (jours) | 1 | 2 | 4 | 6 | 16 | 20 | 35 | 40 | 45 | 60 |
|---------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|------|----|
| Température Andain (°C) | 35 | 35 | 45 | 60 | 62 | 45 | 37 | 34 | 33,2 | 31 |
| Température Ambiante (°C) | 35 | 34 | 34 | 33 | 33 | 30 | 33 | 31 | 33 | 31 |

D'après ces résultats, une température supérieure à 55 °C permet l'hygiénisation. Selon Liang *et al.* [11], une température située entre 45 °C et 55 °C favorise la biodégradation et une température entre 35 °C et 40 °C améliore la diversité des micro-organismes.

4.1.5. Evolution du pH

Les résultats de mesures du pH (tableau 4) montrent qu'il est acide (5,20) pendant le premier jour. Cette valeur se traduit par un état non-dégradé des déchets. Au cours du processus, le pH augmente progressivement pour devenir basique au 60^{ème} jour.

Tableau 4
Evolution du pH au cours de la dégradation du substrat.

| Temps (jours) | 1 | 2 | 4 | 8 | 16 | 20 | 35 | 40 | 45 | 60 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| pH | 5,20 | 6,55 | 6,89 | 7,19 | 7,39 | 7,40 | 7,43 | 7,77 | 8,1 | 8,9 |

Globalement, les déchets initiaux ont une acidité légèrement plus forte que les composts finis. Mais, beaucoup de travaux [1-3, 10] ont mis en évidence une phase d'acidification au début du compostage. Cette phase d'acidification est principalement due à la production anaérobie d'acides organiques et à l'immobilisation de l'ammonium dans la biomasse microbienne durant la phase mésophile. Ensuite, durant la phase thermophile, les acides organiques sont dégradés entraînant une alcalinisation du compost, phénomène accentué par la minéralisation de l'azote.

Au début du compostage, le taux d'humidité est de 60 % (tableau 5), ce qui explique la masse importante des putrescibles (70 %) déposée dans l'andain. Au cours du compostage, le taux d'humidité baisse durant les premiers jours. L'évaporation de l'eau provoque l'assèchement des déchets. L'humidité est réajustée par arrosage afin de maintenir les conditions favorables au déroulement du processus de compostage. Le taux d'humidité doit être maintenu entre 40 % et 50 % par arrosage de l'andain pendant les premières semaines de la fermentation.

4.1.6. Evolution du taux d'humidité

Tableau 5
Variation du taux de l'humidité.

| Temps (jours) | 2 | 4 | 8 | 16 | 20 | 35 | 40 | 45 | 60 |
|---------------|----|----|----|------|-------|-------|-------|------|------|
| % H | 60 | 58 | 56 | 54,7 | 46,40 | 42,43 | 41,77 | 40,9 | 40,1 |

4.1.7. Evolution du pourcentage de la matière organique

Le taux de la matière organique diminue pendant les premières semaines de fermentation. La majeure partie de cette matière organique volatilisée porte naturellement sur les substances riches en carbone, puisque ce dernier est éliminé sous forme de gaz carbonique. Ces résultats sont conformes avec ceux du carbone organique (tableau 6). La diminution relative de la matière organique (rapport entre la masse de matière organique perdue et la masse de matière

organique initiale) est très variable et dépend des conditions de compostage et de sa durée.

Tableau 6
Teneur de la matière organique et du carbone organique/Matière Sèche.

| Temps (Jours) | % MO/MS | % C _{organique} /MS |
|---------------|---------|------------------------------|
| 1 | 74,45 | 37,22 |
| 2 | 73,68 | 36,84 |
| 4 | 72,14 | 36,07 |
| 8 | 71,41 | 35,70 |
| 16 | 55,86 | 27,93 |
| 20 | 51,60 | 25,80 |
| 35 | 49,60 | 24,80 |
| 40 | 47,90 | 23,95 |
| 45 | 45,20 | 22,60 |
| 60 | 41,20 | 20,60 |

4.2. Méthanisation

4.2.1. Mesure du potentiel méthane ou BMP

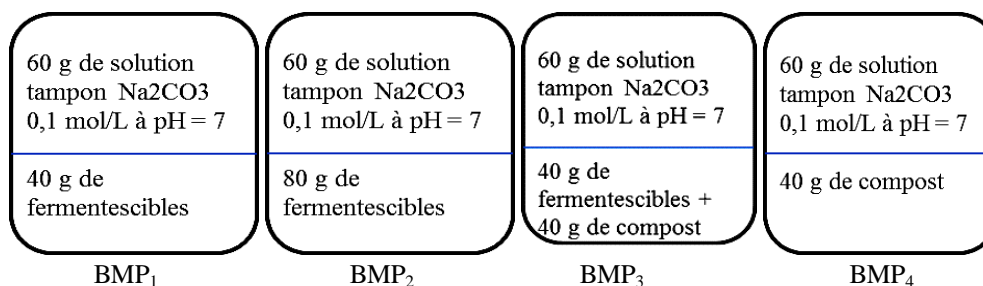


Figure 3 : Différents BMP

Les différents BMP sont placés dans deux étuves à différentes températures (Mésophile (37 °C) et thermophile (55 °C)). Ces BMP sont agités à différents moments pour homogénéiser le substrat. Le volume du

Le test de potentiel méthanogène ou BMP (Biochemical Methane Potential) permet de déterminer la production maximale de biogaz d'un échantillon de biomasse.

Dans ce contexte, deux expériences de méthanisation ont été réalisées avec différentes masses, de déchets ménagers solides et de composts.

Les différents déchets sont pesés et remplis dans des bouteilles dont les bouchons sont munis de manomètres (figure 3). L'étanchéité est prise en compte parce que les différentes bouteilles vont être placées dans des étuves à différentes températures 37 °C et 55 °C. L'ajout d'une solution tampon de carbonate de sodium (Na₂CO₃) à pH=7 permet de maintenir pH constant pendant la décomposition des déchets au cours de leurs dégradations.

biogaz dégagé est estimé par relevé de pression sur chaque BMP (Figure 4).



Figure 4. BMP placés dans des étuves à différentes températures

4.2.2. Caractérisation des substrats initiaux des BMP

Le pH, le taux d'humidité, le taux de la matière sèche, le taux de la matière organique, le taux du carbone et le taux de la matière minérale sont les principaux paramètres des substrats initiaux, qui doivent être mesurés au cours de cette expérience.

a. pH

La vitesse de production du biogaz décroît très rapidement en dehors d'une zone de pH située entre 6 et 8. Les bactéries mésophiles et thermophiles ont des domaines de pH de croissance optimale différents. Le pH dans le digesteur se situe entre 7 et 7,5 ce qui correspond aux plages favorables à l'acétogenèse et à la méthanogenèse d'où l'importance de la connaissance du pH des substrats avant la méthanisation.

La valeur du pH a été calculée selon la méthode citée dans le paragraphe 4.3.b. Le pH du compost est de 7,97. Cette valeur explique son état de maturité. Par contre, le PH des fermentescibles est de 5,31 ce qui indique qu'ils sont en état non-dégradés. Les fermentescibles sont essentiellement des fruits, des légumes et de faibles quantités de papiers et de cartons. Ces masses expliquent leurs acidités élevées par rapport au compost qui a une valeur basique (8,9).

b. Taux de la matière sèche

La teneur en matière sèche est déterminée selon la norme NF ISO 11465, le taux est calculé par l'équation suivante [12]. Les résultats de mesure de ce paramètre sont répertoriés dans le tableau 7.

Tableau 7
Pourcentage de la matière sèche.

| Substrats | Compost | | Fermentescibles | |
|-----------------|--------------|--------------|-----------------|--------------|
| | BMP 37 °C | BMP 55 °C | BMP 37 °C | BMP 55 °C |
| % Humidité | 54,7 | 50 | 79,74 | 86,32 |
| % Matière Sèche | 45,3 | 50 | 20,26 | 13,68 |

c. Taux de la matière organique, carbone organique total et matière minérale

Après 2 heures dans l'incinérateur, on obtient un résidu inorganique sous forme de cendres. La masse du déchet après calcination à 550 °C (M_2) est la matière minérale. En conséquence, le poids de la fraction des cendres résiduelles par perte au feu permet de déterminer le pourcentage de la fraction minérale dans le déchet [13]. Le taux de la matière minérale est déterminé selon l'équation 5 :

$$\% M_M = \frac{M_2}{M_1} \times 100 \quad (4)$$

Les résultats des mesures du taux de la matière organique sont classés dans le tableau 8

Tableau 8
Taux de la MO/MS, % COT/MS et %MM/MS des différents substrats.

| Substrats | Compost | | Fermentescibles | |
|-----------|--------------|--------------|-----------------|--------------|
| | BMP 37 °C | BMP 55 °C | BMP 37 °C | BMP 55 °C |
| % MO/MS | 55,86 | 41,6 | 73 | 72,75 |
| % COT/MS | 27,93 | 20,8 | 36,5 | 36,38 |
| % MM/MS | 44,14 | 58,4 | 27 | 27,25 |

Une charge organique trop importante peut provoquer une accumulation d'acides dans le digesteur et un arrêt de la réaction (l'acétogenèse ne pourra pas

suivre le rythme de l'acidogénèse qui sera richement nourrie en matière). A l'inverse, une charge trop faible ne permettra pas aux bactéries de se développer correctement [14]. D'après les teneurs de la matière organiques des différents substrats initiaux (mis dans le même volume), les composts produisent beaucoup plus de biogaz par rapport aux fermentescibles.

4.2.3. Production du biogaz

Le volume du biogaz dégagé est estimé par relevé de la pression sur chaque BMP. La pression est prélevée chaque jour pendant le temps de séjour.

a. Production du biogaz dans les BMP à 37 °C

Au cours de la digestion anaérobie, la production journalière du biogaz (CH_4 , CO_2 , petites quantités en NH_3 et H_2S) est supérieure à 10 mL dans tous les BMP. On remarque également que dans le BMP₁, la production du gaz oscille entre 10 et 50 mL, alors que dans le BMP₂, le volume atteint 120 mL au 10^{ème} jour. Ces différences dans le volume de biogaz peuvent s'expliquer, d'une part, par la différence de la quantité des fermentescibles (40 g et 80 g) et d'autre part, par la charge organique qui dépasse 70 % (Figures 5 et 6).

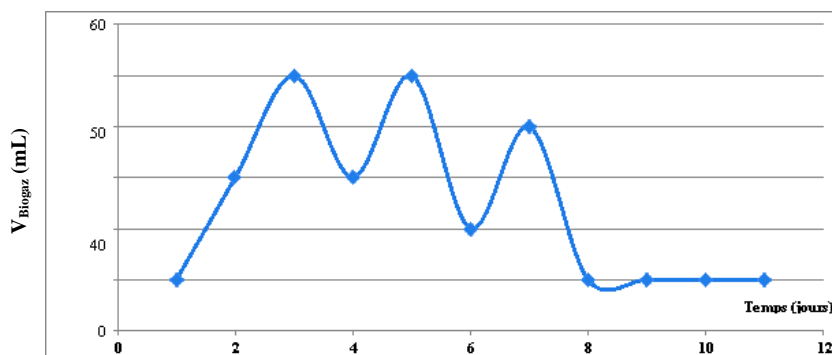


Figure 5. Production du biogaz dans le BMP₁.

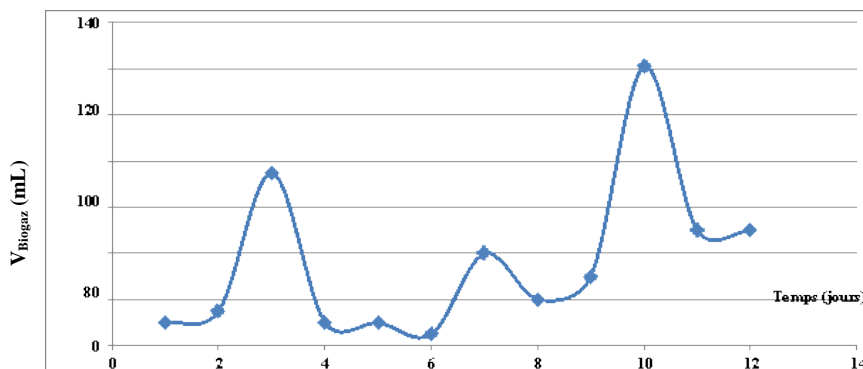
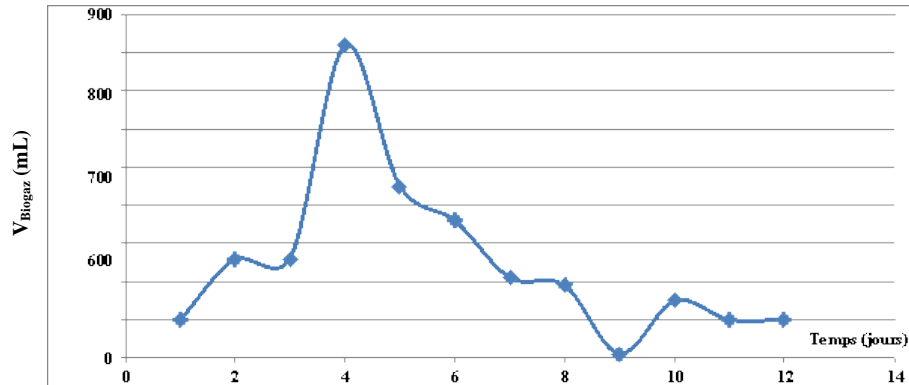
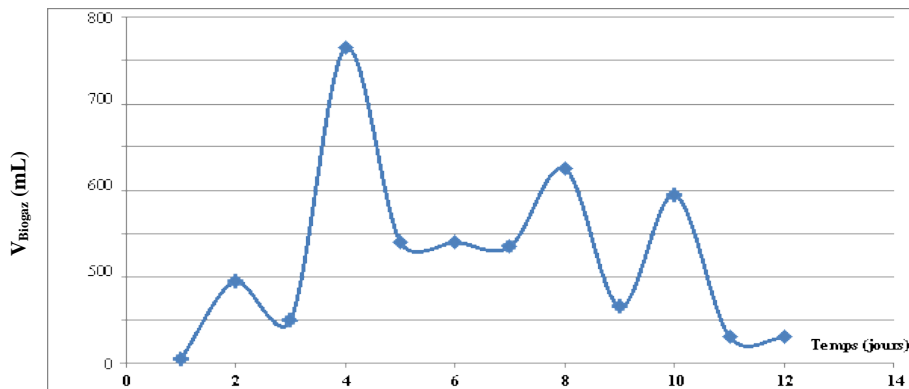


Figure 6. Production du biogaz dans le BMP₂.

Dans le BMP₃, le volume du biogaz atteint 100 mL à partir du 1^{er} jour de la digestion. Il augmente pour atteindre 820 mL au 4^{ème} jour de la digestion. Par contre dans le BMP₄, le volume du biogaz est de 190 mL à

partir du 2^{ème} jour de la digestion. Le volume augmente brusquement pour atteindre 730 mL au 4^{ème} jour de la digestion. Ce taux de production diminue et reste autour de 150 mL et 100 mL (Figures 7 et 8).

Figure 7. Production du biogaz dans le BMP₃.Figure 8. Production du biogaz dans le BMP₄.

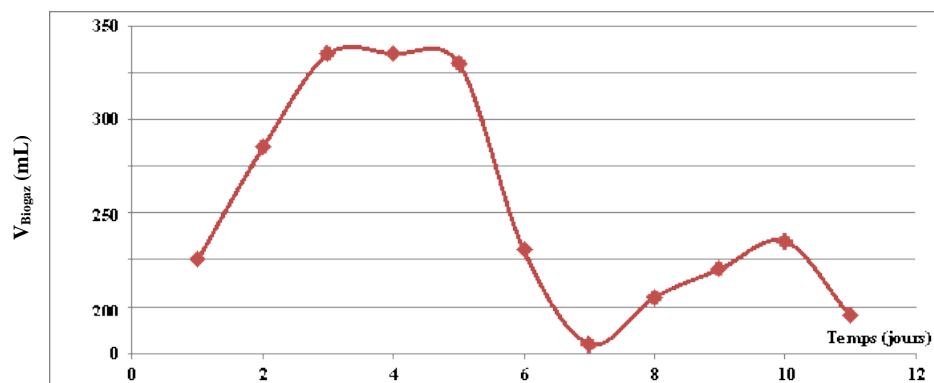
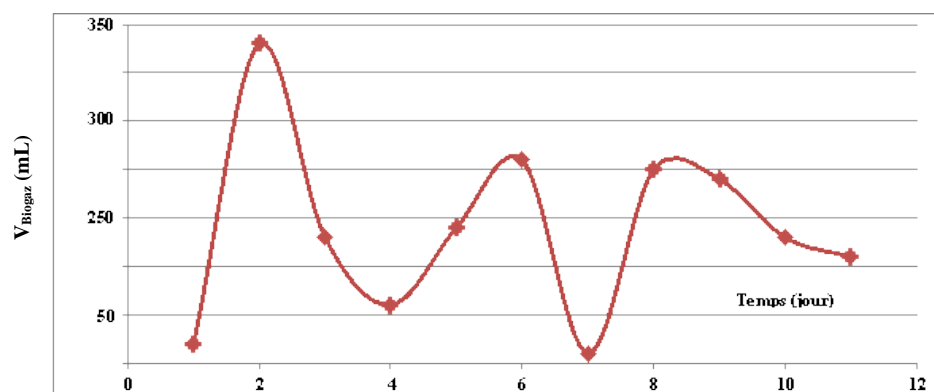
D'après les résultats, les fermentescibles présentent une teneur importante en humidité et en matière organique (80 % et 70 %). Un pH neutre, une valeur idéale pour une gestion anaérobie. Cette valeur indique la stabilité et le bon déroulement du phénomène. Si le pH n'est pas ajusté à 7, il résulte une acidification du milieu par accumulation d'acides gras volatils. Cette acidification bloque la production de méthane. Une température de 37 °C (mésophile) est une température idéale pour la production du biogaz, la vitesse de croissance des micro-organismes et la performance de la dégradation du substrat [15].

D'après les résultats, on remarque que dans les mêmes conditions de température et pH, le compost produit beaucoup plus de biogaz par rapport aux fermentescibles. Ce constat montre qu'il faut une hygiénisation du substrat (casser la matière organique) avant la méthanisation, c'est-à-dire un prétraitement des

déchets. Ce traitement vise à augmenter l'efficacité de la phase d'hydrolyse. Donc, une température de 37 °C est plus favorable pour la méthanisation de substrats plus stables (compost dans la phase mésophile). C'est le mode le plus utilisé, à cause de la stabilité et la bonne production du biogaz [16]. Le temps de séjour moyen est de trois semaines [17].

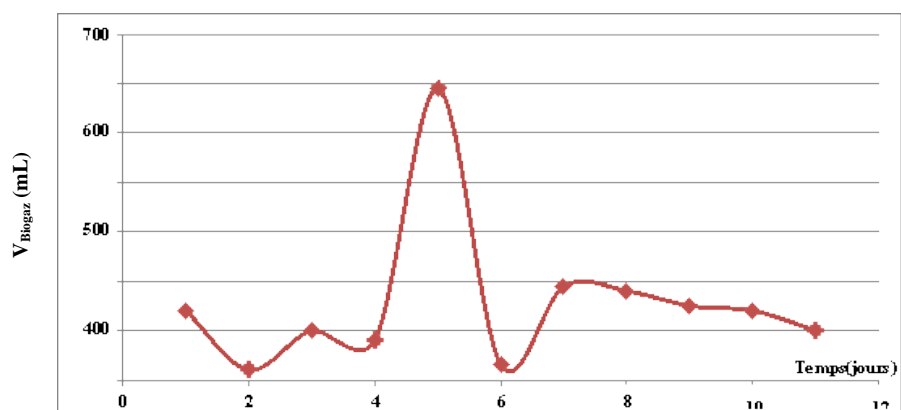
b. Production du biogaz dans les BMP à 55 °C

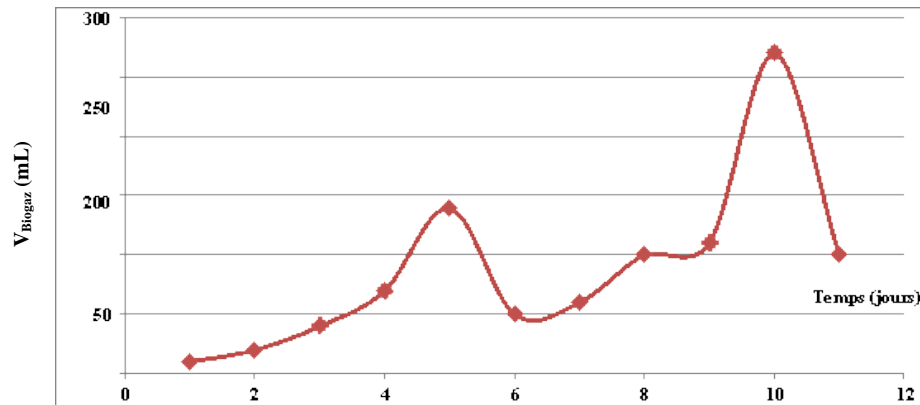
Les résultats montrent qu'il y a une variation du volume de biogaz dans les deux digesteurs (BMP₁ et BMP₂). Sauf que, dans le BMP₁, le volume du gaz est constant entre le 1^{er} et le 5^{ème} jour de la digestion. Par contre, dans le BMP₂, le volume du biogaz atteint plus de 300 mL le deuxième jour de la dégradation (Figures 9 et 10).

Figure 9. Production de biogaz dans le BMP₁.Figure 10. Production de biogaz dans le BMP₂.

Dans le BMP₃, le volume du biogaz atteint 600 mL à partir du 5^{ème} jour de la digestion. Il diminue pour atteindre 200 mL au cours de la 2^{ème} semaine de la

digestion. Par contre dans le BMP₄, le volume du biogaz oscille entre 150 et 260 mL pendant la deuxième semaine de la dégradation (Figures 11 et 12).

Figure 11. Production de biogaz dans le BMP₃.

Figure 12. Production de biogaz dans le BMP₄.

D'après les résultats, on remarque une diminution de biogaz dans les trois premiers BMP au cours de la 2^{ème} semaine de la dégradation. Ce constat serait dû à la présence d'un grand volume de NH₃ et de H₂S. Ces deux gaz au-delà de quelques grammes par litre peuvent inhiber la phase méthanogène et de la digestion anaérobie. D'après Bernet et Buffiere [15], ces deux gaz peuvent être causés par un apport élevé de matières riches en protéines (viande et déchets agroalimentaires).

D'après les résultats (figures 9 et 10), le mode thermophile est plus efficace avec la dégradation anaérobie des déchets urbains solides. Une température élevée améliore la vitesse de l'hydrolyse et une meilleure dégradation par rapport au mode mésophile. Le temps de séjours moyen pour les systèmes thermophiles, varie entre 10 et 15 jours [17].

4.2.4. Test d'inflammabilité du biogaz

A chaque essai de production de biogaz, ce dernier est retiré à l'aide d'une seringue et est soumis à une flamme discontinue à l'aide d'un briquet.

La qualité et la valorisation du biogaz sont très importantes dans la méthanisation. La concentration de méthane se situe entre 50 et 70 %. Cette dernière étant la valeur la plus fréquemment rapportée. En plus du méthane, l'autre gaz principal formé est le CO₂. Les gaz présents en faibles concentrations sont le H₂S, le NH₃ et de la vapeur d'eau.

Au cours de cette expérience, la seule utilisation qui était envisageable est de brûler le biogaz produit au cours de la digestion anaérobie (tableaux 9 et 10).

Tableau 9
Tests d'inflammabilité du biogaz à 37 °C.

| Temps (J) | Inflammabilité du biogaz | | | |
|-----------|--------------------------|------------------|------------------|------------------|
| | BMP ₁ | BMP ₂ | BMP ₃ | BMP ₄ |
| 1 | - | - | - | - |
| 2 | - | - | - | - |
| 3 | - | - | - | - |
| 4 | - | - | - | - |
| 5 | - | - | - | - |
| 6 | - | - | - | - |
| 7 | - | - | - | - |
| 8 | - | - | - | + |
| 9 | - | - | - | + |
| 10 | - | - | - | + |
| 11 | - | - | - | + |

Tableau 10
Tests d'inflammabilité du biogaz à 55 °C.

| Temps (J) | Inflammabilité du biogaz | | | |
|-----------|--------------------------|------------------|------------------|------------------|
| | BMP ₁ | BMP ₂ | BMP ₃ | BMP ₄ |
| 1 | - | - | - | - |
| 2 | - | - | - | - |
| 3 | - | - | - | - |
| 4 | - | - | - | - |
| 5 | - | - | - | - |
| 6 | - | - | - | + |
| 7 | - | - | - | + |
| 8 | - | - | - | + |
| 9 | - | - | - | + |
| 10 | + | + | + | + |
| 11 | + | + | + | + |

En premier lieu, cette solution est envisageable, si on veut un traitement et une stabilité de la matière putrescible. La destruction du méthane est importante à cause de la puissance de réchauffement climatique du méthane comme gaz à effet de serre.

Deuxièmement, la méthanisation procure une création nette d'énergie grâce au biogaz. Ce gaz peut être transformé en électricité ou en chaleur. Aussi, il peut être converti en gaz naturel. De cette façon, en profitant de ce traitement clos des matières organiques, une source locale d'énergie renouvelable, pérenne et propre est produite à partir de matières antérieurement considérées comme « déchets ».

4.2.5. Concentrations des Acides gras Volatils (AGV) et des Titres d'Alcalimétriques (TAC) au cours des deux modes [18]

a. Détermination du titre alcalimétrique complet (TAC)

Le titre alcalimétrique complet permet de connaître les doses de carbonates d'hydroxydes et d'hydrogencarbonates alcalins ou alcalino-terreux, responsables du pouvoir tampon du fermenteur vis-à-vis des acides organiques et acides gras volatils. Cette alcalinité permet au pH de rester aux alentours de la neutralité malgré la présence d'acides [18].

Pour déterminer le TAC, un échantillon est prélevé des BMP à la fin du processus de la méthanisation. Ce dernier est centrifugé pendant 15 minutes. Après centrifugation, le pH de l'échantillon est mesuré, soit un volume de 6 mL. L'ajout de l'acide sulfurique (H_2SO_4) 0.1 N jusqu'à un volume V, permet d'obtenir une solution de pH = 4. Le TAC est calculé par l'équation 5 :

$$TAG = V \times 16,666 \times 12 \text{ (mg.L}^{-1}\text{)} \quad (5)$$

b. Détermination des acides gras volatils (AGV)

Le contrôle des acides gras volatils, stade intermédiaire obligatoire de la digestion anaérobie, est indispensable. Leur accumulation traduit un ralentissement de l'activité des bactéries méthanogènes et peut provoquer le blocage du processus fermentable, raison pour laquelle le suivi de la concentration des AGV lors de la digestion devient très important [19].

Pour déterminer la concentration totale en acides gras volatils, l'acide sulfurique est ajouté à un échantillon ($V_{\text{échantillon}}$) prélevé des BMP après le processus de la méthanisation, jusqu'à une valeur de pH = 3,5. Par la suite, le liquide est chauffé jusqu'à

ébullition, pendant 3 minutes, de manière à dégazer le dioxyde de carbone. La solution est ensuite refroidie à la température ambiante ; après le refroidissement et à l'aide d'une burette, la soude (NaOH) 0.01 N est ajoutée jusqu'à une valeur de pH = 4 jusqu'à un volume V_2 . Puis on continue jusqu'à une valeur de pH = 7 avec un volume V_3 . La valeur des AGV est calculée par l'équation 6 :

$$AGV = (V_3 - V_2) \times 0,1 \times 1000 / V_{\text{échantillon}} \text{ (mg.L}^{-1}\text{)} \quad (6)$$

4.2.6. Concentrations des TAG et des AVG pendant le mode mésophile

Les résultats montrent une variation dans les concentrations des AGV et le TAC (tableau 11).

Tableau 11
Concentrations des acides gras volatils et des titres alcalimétriques à 37 °C.

| Digesteur | TAC (mg.L ⁻¹) | AGV (mg.L ⁻¹) | AGV/TAC |
|------------------|---------------------------|---------------------------|---------|
| BMP ₁ | 519,97 | 69 | 0,13 |
| BMP ₂ | 359,98 | 30,41 | 0,08 |
| BMP ₃ | 299,97 | 30 | 0,10 |
| BMP ₄ | 100,99 | 56,66 | 0,005 |

Le rapport entre les AGV et les titres alcalimétriques (TAC) a été reporté comme étant un paramètre important pour le contrôle de la stabilité des systèmes. Il existe trois valeurs du rapport AGV/TAC [20] :

- AGV/TAC = 0,1 : fonctionnement normal ;
- AGV/TAC = 0,5 : début de dysfonctionnement ;
- AGV/TAC = 1 : blocage du système.

Des valeurs du rapport AGV/TAC des différents BMP on constate un fonctionnement assez optimal du processus de biodégradation au cours de la digestion anaérobie.

4.2.7. Concentrations des TAG et des AVG pendant le mode thermophile

En mode thermophile, les résultats sont répertoriés dans le tableau 12.

La méthanisation commence par une phase d'acidogénèse au cours de laquelle la matière organique est d'abord hydrolysée. Les longues chaînes polymères des glucides, lipides et protéines sont décomposées en fragments plus petits qui seront eux-mêmes transformés

au cours d'une phase d'acidification. Il y a alors formation d'acides gras à chaînes courtes tels que l'acide acétique, l'acide propénoïque ou l'acide butyrique. Si la quantité de la biomasse apportée est excessive, cette phase peut aboutir à une formation trop importante d'acides gras volatils.

Tableau 12
Concentrations des acides gras volatils et des titres alcalimétriques à 55 °C.

| Digesteur | TAC (mg.L ⁻¹) | AGV (mg.L ⁻¹) | AGV/TAC |
|------------------|---------------------------|---------------------------|---------|
| BMP ₁ | 569,97 | 73,33 | 0,12 |
| BMP ₂ | 379,98 | 33,16 | 0,08 |
| PMB ₃ | 315,98 | 30 | 0,09 |
| PMB ₄ | 200,98 | 21,66 | 0,10 |

Les valeurs des AGV dans les BMP confirment la théorie. Dans le BMP₁, une forte concentration en matière organique donne une concentration élevée en AGV.

5. Conclusion

La méthanisation est une digestion anaérobie, ou fermentation méthanique, qui transforme la matière organique en méthane (CH₄), gaz carbonique (CO₂) et un digestat par un écosystème microbien complexe fonctionnant en absence d'oxygène.

La méthanisation des ordures ménagères solides et de leurs composts a permis de mettre en évidence les points suivants :

- La température est un des paramètres importants de la digestion anaérobie. En effet, la vitesse des réactions qui intervient augmente avec la température. Donc, une température thermophile est préconisée pour les bio-déchets ;
- Deux régimes de températures sont souvent considérés : le régime mésophile et le régime thermophile et sont de ce fait sont les plus utilisés. La fermentation mésophile se déroule dans des gammes de températures comprises entre 35 °C et 45 °C.

Le régime mésophile assure une vitesse constante et une bonne stabilité de la digestion anaérobie et le régime thermophile permet une meilleure hygiénisation du digestat tout en assurant une amélioration de la phase d'hydrolyse par comparaison avec la digestion mésophile. De plus, il permet une élimination d'agents

pathogènes et une meilleure vitesse de dégradation du substrat et de production de biogaz. Cependant, le fonctionnement thermophile est réputé moins stable qu'en mésophile ;

- Le choix d'un pH neutre (pH 7), est une valeur optimale indiquant la stabilité et le bon déroulement de la digestion anaérobie ;
- Une charge organique trop importante peut provoquer une accumulation d'acides dans le digesteur et un arrêt de la réaction dans des conditions mésophiles. Donc, le mode thermophile est plus approprié pour la dégradation anaérobie des bio-déchets dans leur état brute ;
- Des valeurs des rapports AGV/TAC qui ne dépassent pas la valeur 0,1 au cours de la digestion favorisent le bon fonctionnement de la méthanisation.

Selon cette étude expérimentale, les déchets compostables et/ou méthanisables de la commune de Chlef sont estimés à 31 755 tonnes/an, alors que, ceux de la wilaya sont de 200 385 tonnes/an.

Le compost produit est estimé dans la commune de Chlef à 8 680 tonnes/an et celui produit dans la wilaya est estimé à 54 772 tonnes/an. Selon le marché algérien, le prix d'un sac de 20 kg oscille entre 515 DA et 574 DA.

En tenant compte des résultats de cette expérience à l'échelle laboratoire, la digestion anaérobie des fermentescibles solides urbains constitue a priori une solution adéquate pour alléger la poubelle de 50 à 80 % (selon la saison) et par la suite minimiser la pollution de l'air, du sol et de l'eau.

L'optimisation d'un digesteur à l'échelle industrielle pour un traitement de grande quantité de déchets à Chlef et la caractérisation physico-chimique du digestat sont des perspectives d'une étude comparative à ce travail.

Références

- [1] Tahraoui-Douma N., (2013). « Valorisation par compostage des déchets solides urbains de la commune de Chlef, Algérie ». Thèse d'état en science, 2013. Université de Limoges, France. HTML : <http://www.secheresse.info/spip.php?article32280> (consulté le 16/04/2013)
- [2] BOUHADIBA B., AISSANI N., MEKKAKIA-MEHDI M., LOUNIS Z. et GUETARNI I. HM., (2022). « Perspectives conceptuelles et méthodologiques pour la mise en œuvre de la gestion des déchets ménagers et assimilés dans la ville d'Oran (Algérie) ». Oran 2 University Journal. Disponible en ligne :

- <https://www.asjp.cerist.dz/en/downArticle/705/7/2/205717>
(consulté le 11/02/2023)
- [3] MEZOUARI F., (2011). « *Conception et exploitation des centres de stockage des déchets en Algérie et limitation des impacts environnementaux* » Thèse en 2011. Université de l'EPAU à Elharch en Algérie et Université de Limoges. Disponible sur : <http://aurore.unilim.fr/ori-oai-search/notice/view/unilim-ori-28483> (consulté le 17/01/2023)
- [4] KOLEDZI E., BABA G., FEUILLADE G et MATEJKA G., Caractérisation physique des déchets solides urbains à Lomé au Togo, dans la perspective du compostage décentralisé dans les quartiers. Revue francophone d'écologie industrielle : Environnement, Ingénierie & Développement, 59 (2011) : 14-22. <https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.2851>
- [5] <https://www.dcw-chlef.dz/fr/index.php/wil34?showall=1&limitstart> (consulté le 19/01/2023)
- [6] ANIREF : Monographie de la wilaya de Chlef <https://www.aniref.dz/DocumentsPDF/monographies/MONOGRAPHIE%20WILAYA%20Chlef.pdf> (consulté le 10/04/2023)
- [7] Ministère des Ressources en Eau et de l'Environnement. <https://www.mh.gov.dz/?p=1037> (consulté le 15/09/2017)
- [8] MODECOM (1993). Méthode de Caractérisation des Ordures Ménagères/ 2ème édition, ADEME éditions Angers, Paris, 64 pages
- [9] GROSSMANN J., (2003). « *Mesures d'urgences pour une remise à niveau de la station de compostage de Blida* » Rapport de la coopération technique Algéro-allemand entre le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE) et la Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH (Entreprise de coopération internationale pour le développement durable) - Programme Gestion de l'Environnement. Mars 2003. 56p.
- [10] AFNOR, (2005). « Norme NF XP X30-466 – Déchets ménagers et assimilés – Méthodes de caractérisation- Analyse sur produit sec, norme expérimentale, Mars 2005 ».
- [11] WAKSMAN S.A., CORDAN T.C & HULPOIN N., Influence of temperature upon the microbiological population and decomposition processes in compost of stable manure soil. Soil science, 47 (1939): 83-114. <https://doi.org/10.1097/00010694-193902000-00001>
- [12] LIANG C., DAS K.C. & MCLENDON R.W., The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a solids composting blend. Bioresource Technology, 86 (2003) : 131-137. [https://doi.org/10.1016/s0960-8524\(02\)00153-0](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(02)00153-0)
- [13] BOLLON JULIEN., (2012). « *Etude des mécanismes physiques et de leur influence sur la cinétique de méthanisation en voie sèche: essais expérimentaux et modélisation* ». [Thèse]. INSA de Lyon, France. <https://theses.hal.science/tel-00770658/document> (consulte le 19/01/2023)
- [14] APHA (2005) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st Edition, American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC.
- [15] MOLETTA R., (2008). « Technologie de la méthanisation de la biomasse ». Déchets ménagers et agricoles. In Moletta R. La méthanisation (chapitre 8, P. 181-204) Paris, Edition Tec et Doc.
- [16] BERNET N. et BUFFIERE P., (2008). « Caractérisation de la mise en œuvre de la méthanisation. In Moletta R. La méthanisation (chapitre 4, p. 87-113). Paris, Edition Tec et Doc.
- [17] OSTREM K., (2004). "Greening Waste: Anaerobic digestion for treating the organic fraction of municipal solid wastes". Mémoire de maîtrise. Columbia University, New York. Disponible sur : <https://gwccouncil.org/category/publications/theses/2004/> (consulte le 24/03/2023)
- [18] ADEME., (2003). « Réalisation d'un référentiel technique et économique d'unités de traitement de déchets organique par méthanisation avec et sans valorisation du biogaz ».
- [19] SOW A., (1990). « *Contribution à la conduite de la méthanisation dans des bioréacteurs à film mix fonctionnant à forts taux de charge* ». [Thèse], Ecole Centrale de Paris.
- [20] BERTHE C., REDON E. et FEUILLADE G. (2006). Fractionation of the organic matter contained in leachate resulting from two modes of landfilling leachate recirculation and mechanical and biological pre-treatment. Proc. of 4th International Landfill Research Symposium, Lulea University, p. 242. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.022>
- [21] MANUEL RODRIGUEZ S., (2005) « *Etude d'un bioréacteur anaérobie à membranes immergées pour le traitement des eaux résiduaires* ». [Thèse], Toulouse : INSA. Disponible en ligne. <https://core.ac.uk/download/pdf/35285176.pdf> (consulte le 27/03/2023)