



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
Université de Blida1
Département des énergies renouvelables



MEMOIRE DE MASTER
Spécialité : Energies renouvelables.
Option : Habitat bioclimatique.

**Digestion anaérobie des macro-algues saharienne
d'eau douce de la région d'Adrar sud de l'Algérie
codigestion avec les déchets des dromadaires.**

Présenter par :

- ✓ ADDADI KHALIL EDDINE.
- ✓ TIHAL KADDA.

Devant le jury composé de :

- Mr HAMID.A
- Mr LAFRI.D
- Mr DJAAFRI.M
- Mme FERRADJI F

Président.
Examineur.
Encadreur.
Co-encadreur.

Blida, Septembre 2021

REMERCIEMENT

En premier lieu, nous exprimons nos profonds remerciements au DIEU « **Allah** » le tout-puissant pour la force, le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

Nous tenons à remercier nos familles, pour le soutien continu qu'elle m'a apporté tout aux longs de ces années d'études.

Nous tenons à exprimer ma très grande considération et ma vive reconnaissance à Mes encadreurs Monsieur le Docteur Djaafri Mohammed Maître de recherche au niveau de l'URER.MS d'Adrar et Mme Docteur Ferradji enseignante au niveau de l'université de blida1 au département des énergies renouvelables, pour leur patience, ses précieux conseils, suivi et orientation toute au long de ce projet de fin d'étude.

Nous exprimons nos profonds remerciements à tous les membres de l'équipe bioconversion de l'URERMS d'Adrar et surtout Dr. Kaidi Kamel, Mme Bella S. Melle Salem F. Mr. Djaber Abdelkrim et Mr. Khellafi Mostefa.

Nos remerciements sont adressés aussi à Mr. Dr. Mouhadjer Samir Directeur de l'URERMS. D'Adrar, Mr Dr. Laarbi Amine Directeur de division DCTT au niveau de l'URERMS d'Adrar et à tous les responsables, les chercheurs et les personnels de l'URERMS d'Adrar.

Nous tenons à remercier Monsieur Professeur HAMID.A président de la spécialité énergie renouvelable et habitat bioclimatique à l'université de Blida1.

Nous adressons également nos plus vifs remerciements aux membres de jury pour avoir examiné avec attention ce travail.

Nos sentiments de reconnaissance et nos remerciements vont également à toute personne qui a participé de près ou de loin, directement ou indirectement à la réalisation de ce travail.

DEDICASE

Je dédie ce travail à mes
parents, ma famille, mon oncle
ADDADI ABDELKADER, la
famille Harkatti, Mahjoubi,
Sadek, Zeibak, Ben zydor,
Ariallah, boussaid et à mon
maitre du coran Mr Hadj
Nouari

Merci d'être toujours là pour
moi.

Je dédie ce travail à mes
parents, mon frère Mokhtar,
Mes amis proches amine,
zemouri oussama pour leur
encouragement permanent, et
leur soutien moral.
Merci d'être toujours là pour
moi.

ملخص:

ان الغاز الحيوي أصبح اليوم من ضمن الحلول الرئيسية لتحقيق عملية الانتقال الطاقوي نحو طاقة نظيفة. حيث شملت دراستنا الهضم اللاهوائي المشترك للطحالب الكبيرة مع فضلات الجمل مع استعمال عدة تركيزات مختلفة من الركيزة (100% طحالب+0% بقايا الجمل. 90% طحالب+10% بقايا الجمل. 75% طحالب+25% بقايا الجمل. 50% طحالب+50% بقايا الجمل. 25% طحالب+75% بقايا الجمل. 10% طحالب+90% بقايا الجمل. 0% طحالب+100% بقايا الجمل) الهدف هو تقييم النسبة المئوية للطاقة التي ينتجها هذا النوع من الركيزة. للقيام بذلك تمت مراقبة حجم الميثان المنتج خلال التجربة. اين سجلنا اعلى نسبة في الهاضم المتكون من 100 بالمئة طحالب مع 0 بالمئة بقايا الجمل اين سجلنا نتائج جيدة مقارنة بالطرق السابقة اين استعمل روث البقر وبقايا النخيل وحماة الصرف الصحي.

وتمت الاستفادة من الطاقة الناتجة في طريقتين ملئى قارورة غاز بوزن 18كغ واستعمالها في جهاز تسخين المياه هذه الأخيرة شكلت نتائج جيدة بالنسبة للأولى.

كلمات مفتاحية: المواد العضوية. الهضم اللاهوائي. فضلات الجمل. الغاز الحيوي.

Résumé :

Le biogaz est devenu aujourd'hui l'une des principales solutions pour réaliser le processus de transition énergétique vers une énergie propre. La présente étude comprenait la Co-digestion anaérobie des Macro-algues (MA) avec les déchets des dromadaires (DD) en utilisant plusieurs concentrations différentes du substrat à savoir (100% MA+0%DD ; 90% MA+10%DD ; 75% MA+25%DD ; 50% MA+50%DD ; 25% MA+75%DD ; 10% MA+90%DD ; 0% MA+100%DD). L'objectif a été d'évaluer le pourcentage d'énergie produite par ce type de substrat. Pour cela, un suivi du volume du méthane produit durant toute l'expérience a été effectuer. Les résultats obtenus montrent que le cosubstrat contenant « 100%MA+0%DD » à donner le pourcentage le plus élevé d'énergie produite estimé de 2.98Wh/g MO.

Concernant l'application en a utilisé pour 2 scénarios différents l'un de remplie une bouteille de CH₄ type 18kg et l'autre pour la chauffe bain qui est la meilleure optimisation de l'énergie produit.

Mots clés : biomasse algale, digestion anaérobie, déchets des dromadaires, l'intégration de biogaz.

Abstract:

Biogas has today become one of the main solutions for carrying out the process of energy transition towards clean energy. The present study included the anaerobic co-digestion of Macroalgae (MA) with dromedary waste (DD) using several different concentrations of the substrate namely (100% MA + 0% DD; 90% MA + 10% DD; 75% MA + 25% DD; 50% MA + 50% DD; 25% MA + 75% DD; 10% MA + 90% DD; 0% MA + 100% DD). The objective was to assess the percentage of energy produced by this type of substrate. To do this, the volume of methane produced throughout the experiment was monitored.

The results obtained show that the co-substrate containing "100% MA + 0% DD" gave the highest percentage of energy produced estimated at 2.98Wh / g MO.

Regarding the application, it was used for 2 different scenarios, one for filling an 18kg type CH₄ bottle and the other for the bath heater which is the best optimization of the energy produced.

Key words: algal biomass, anaerobic digestion, dromedary waste, biogas integration.

Abréviation :

C° : degré Celsius.

DCO : demande chimique en oxygène (mg/l).

DD : Déchets des dromadaires

MA : Macro algues

g : gramme.

MO : matières organiques

MS : matières sèche.

ml : millilitre.

mg : milligramme.

PCI : pouvoir calorifique inférieur.

PCS : pouvoir calorifique supérieur.

pH : potentiel d'hydrogène

UV : radiations ultraviolettes.

V : volume.

Liste des figures :

Figure 1.1 : Technologies de conversion de la biomasse et des déchets.	4
Figure 1.2 : Source de biomasse.	5
Figure 1.3 : ressource/production.	5
Figure 1.4 : Constituants de la matière lignocellulosique et les résultats schématiques du procédé.	6
Figure 1.5 : 3 ^{ème} génération.	7
Figure 1.6 : Photo-bioréacteurs.	11
Figure 1.7 : Ecologique studio Milano.	11
Figure 1.8: Productivité en huile des microalgues par rapport à d'autres plantes Oléagineuse.	13
Figure 1.9 : Méthodes biologiques de production d'hydrogène.	14
Figure 1.10 : Structure de Lewis CH ₄ .	15
Figure 1.11: Processus de production du biométhane.	15
Figure 2.1 : Les étapes de la digestion anaérobie.	17
Figure 2.2 : La conversion de la matière organique dans la digestion anaérobie.	18
Figure 2.3 : Central de production biogaz.	24
Figure 2.4 : équivalence énergétique.	25
Figure 2.5 : Epuration de biogaz avec adsorption.	27
Figure 3.1 : Substrat « Macro-algue » (bassins).	30
Figure 3.2 : Substrat « déchets des dromadaires ».	31
Figure 3.3 : Substrat « Macro-algue » avant et après nettoyage.	31
Figure 3.4 : Substrat « Déchets des dromadaires » avant et après nettoyage.	32
Figure 3.5 : Substrat utilisée après le broyage.	32
Figure 3.6 : Les matériaux utilisés pour la préparation des réacteurs.	33
Figure 3.7 : Photo des réacteurs dans un bain marie chauffer et régulé à 37°C.	34
Figure 3.8 : Autoclave.	35
Figure 3.9 : balance.	36
Figure 3.10 : Photo de l'étuve utilisée.	37

Liste des figures

Figure 3.11 : Photo du four à moufle.	38
Figure 3.12 : Photo du PH mètre.	39
Figure 3.13 : Dispositif de mesure du volume du biogaz produit.	40
Figure 3.14 : photo de Teste d'inflammabilité du biogaz produit.	41
Figure 4.1 : Taux de la matière organique.	42
Figure 4.2 : Taux de la matière sèche.	43
Figure 4.3 : Histogramme présente la variation de pH.	44
Figure 4.4: Histogramme présente la variation de pH (Substrat traité).	45
Figure 4.5: Histogramme présente la variation de pH (Substrat non traité).	46
Figure 4.6 : Teneur en sucre pour les substrats non traités.	47
Figure 4.7 : Teneur en sucre pour les substrats prétraité.	47
Figure 4.8 : Les valeurs de la DCO des cosubstrats avant et après prétraitement.	48
Figure 4.9: Les valeurs de la DCO (substrat traité).	49
Figure 4.10: Les valeurs de la DCO (substrat non traité).	50
Figure 4.11 : CH ₄ quotidien pour les substrats non traités.	51
Figure 4.12 : CH ₄ quotidien pour substrats prétraité.	52
Figure 4.13 : CH ₄ Accumulative pour substrats non traité.	53
Figure 4.14 : CH ₄ Accumulative pour substrats prétraité.	54
Figure 4.15 : Energie Accumulative pour substrats non traité.	55
Figure 4.16 : Energie Accumulative pour substrats prétraité.	56

Liste des tableaux :

Tableau 1.1 : les générations de la biomasse	8
Tableau 1.2 : Le bioéthanol de troisième génération	13
Tableau 2.1 : Les concentrations limites de quelques éléments	22
Tableau 2.2 : Techniques d'élimination du dioxyde de carbone.	28
Tableau 3.1 : les proportions des réacteurs.	34
Tableau 4.1 : Détail des proportions de Codigestion en pourcentages et en gramme en termes de MO et poids de substrat brut.	43
Tableau 4.2 : taux des lipides de substrat.	48
Tableau 4.3 : Energie total à la cour du temps de production.	55
Tableau 4.4 : Energie total à la cour du temps de production.	56

Sommaire :

Remercîment.

Dédicace.

Résumé.

Abréviation.

Liste des figures.

Liste des Tableaux.

Introduction générale. 1

 **Partie 1 : Etude bibliographique.**

➤ **Chapitre 01 : Biomasse et bioénergie.**

1.1. Introduction 3

1.2. Biomasse 3

1.2.1. Définition 3

1.2.2. Ressources de la biomasse 4

1.2.3. Générations de la biomasse 6

1.2.4. Biomasse de la troisième génération 9

1.2.4.1. Les macro-algues 9

1.2.4.1.1. Définition 9

1.2.4.1.2. Caractéristique 9

1.2.4.2. Les microalgues 10

1.2.4.2.1 Principales méthodes de
production 10

1.3. Avantages 10

1.4. Un modèle (exemple) 11

1.5. Biomasse algale pour la production de la bioénergie 12

1.5.a Bioéthanol 12

1.5.b Biodiésel	13
1.5.c Bio-hydrogène	13
1.5.d Biométhane	14
3. Conclusion	15
➤ CHAPITRE 02 : Digestion anaérobie.	
2.1. Introduction	16
2.2 Digestion anaérobie ou méthanisation	
2.2.1. Définition	16
2.2.2. Etapes de la méthanisation	16
2.2.2.1. Hydrolyse	17
2.2.2.2. Acidogènes	18
2.2.2.3. Acétogenèse	18
2.2.2.4. Méthanogenèse	18
2.3. Les différents paramètres influençant la méthanisation	19
2.3.1. Surface spécifique du substrat	19
2.3.2. Rapport C/N	19
2.3.3. Dilution	19
2.3.4. PH	20
2.3.5. Température	20
2.3.5.1 Thermophiles	20
2.3.5.2 Mésophiles	20
2.3.5.3 Psychrophiles	20
2.3.6. Taux de chargement	21
2.3.7. Temps de rétention	21
2.3.8. Toxicité	21
2.3.9. Les besoins en nutriments	21
2.3.10. Agitation	22
2.3.11. Pathogènes	23
2.3.12. Lumière	23

2.4. La Co-digestion	23
2.5. Biogaz	
2.5.1. Définition	24
2.5.2. Composition	24
2.5.3. Valeur énergétique	25
2.5.4. Purification du biogaz	25
2.5.4.1. Absorption physique	25
2.5.4.2. L'absorption avec réaction chimique	26
2.5.4.3. L'adsorption	26
2.5.4.4. La séparation membranaire	26
2.5.4.5 Séparation par cryogénie	26
2.6. Les avantages et les inconvénients de la digestion anaérobie	
2.6.1 : Les avantages	28
2.6.2 : Les inconvénients	29
2.7. Conclusion	29
🚧 Partie 2 : partie expérimentale.	
➤ CHAPITRE 03 : Matériel et méthode.	
3.1. Introduction	30
3.2.1. Origine et caractérisation du substrat utilisé	30
3.2.2. Prétraitement du substrat	31
3.2.2.1. Le nettoyage	31
3.2.2.2. Le broyage	32
3.2.3. Description du digesteur et dispositif utilisé	32
3.2.4 Conditions opératoires	34
3.2.5 Prétraitement thermique et acide des substrats	
3.2.5.1 Prétraitement thermique	34
3.2.5.2 Prétraitement acide	35
3.2.6. Méthodes d'analyses	

3.2.6.1. Détermination de la matière sèche (MS)	35
3.2.6.2. Détermination de la teneur en matière organique (MO)	37
3.3. Paramètre suivis	38
3.3.1. pH	39
3.3.2. Volume de biogaz produit	40
3.3.3. Détermination de la DCO	40
3.3.4. Détermination de la teneur en sucre	41
3.3.5. Teneur en matière grasse	41
3.3.6. Inflammabilité du biogaz	41
➤ CHAPITRE 04 : Résultats et discussions	
4.1. Introduction.	42
Caractérisation du substrat.	
4.2. Taux de la matière sèche et organique.	42
4.3. Quantité de substrat utilisé.	43
4.4. Évolution du pH durant le prétraitement.	44
4.5. La teneur en sucre.	46
4.6. La teneur en matière grasse.	48
4.7. La DCO avant et après prétraitement.	49
4.8. Production du biométhane.	50
4.9. Energie.	54
4.10. Valorisation énergétique.	57
4.11 Présentation des voies envisageables.	
Scénario 01 : Utilisation pour la cuisson ou chauffage.	57
Scénario 02 : La consommation de gaz pour l'eau chaude sanitaire.	59
Conclusion générale.	61
Référence bibliographique.	
Annexes.	

Introduction générale :

La croissance démographique qu'a connue le monde dans le courant du siècle dernier, ainsi que le développement industriel et l'accélération de l'urbanisation, ont été accompagnés d'une demande accrue en énergie, surtout les énergies fossiles (pétrole, gaz naturelle, charbon) qui sont considérés comme la première source d'énergie et qui représentent environ 80% de la production mondiale d'énergie [1]. Ces réserves de combustibles fossiles sont limitées et ne dureront pas éternellement, elles seront épuisées dans un avenir proche et par conséquent la pénurie d'énergie va progressivement s'installer. Face à cette demande en hausse, il y a une élévation de la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère qui est l'un des gaz à effet de serre entraînant le réchauffement climatiques et d'autre pollutions environnementales [2].

L'importance des énergies renouvelables, plus précisément à travers la valorisation énergétique de la biomasse apparaît clairement comme une alternative intéressante. L'une des techniques, considérée comme étant la plus efficace et la plus avancée : la digestion anaérobie.

La digestion anaérobie et la production de biogaz peuvent constituer un moyen efficace d'atteindre de nombreux objectifs politiques liés à la gestion de l'énergie, de l'environnement et des déchets. Le biogaz contient du méthane (60 %) et du dioxyde de carbone (40 %) comme composant principal. A l'exception du méthane, les autres gaz présents dans le biogaz sont considérés comme polluants. L'élimination de ces impuretés, en particulier du dioxyde de carbone, augmentera la qualité du biogaz pour une utilisation ultérieure. [2].

L'utilisation de la biomasse algale aujourd'hui c'est parmi les méthodes de donner le plus à l'énergie renouvelables.

Dans notre projet de fin d'étude qui contenue 04 Chapitres tels que :

- Chapitre 01 : étude bibliographique ce chapitre discute la biomasse en générale et basé sur la biomasse algale ainsi que sur l'utilisation de cette biomasse pour la production de la bioénergie.
- Chapitre 02 : Digestion anaérobie ce chapitre identifié toute les chausse concernant La DA paramètre qui influent, valeur énergétique, composition de biogaz.
- Chapitre 03 : Matériel et méthode est basé sur la nature de travail au niveau de laboratoire URER-MS adrar.

Introduction générale

- Chapitre 04 : Résultats et discussion tels les valeurs de DCO, Volume produit au cours de production, l'intégration de l'énergie produits exemple d'une chauffe bain et bouteille en acier type 18kg.

Par la fin conclusion et perspectives le taux d'énergie de la biomasse algale par rapport d'autre source de la biomasse.

PARTIE 01 :
ETUDE
BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 01 :

Biomasse et bioénergie

1.1. Introduction :

Par rapport aux énergies fossiles (comme le charbon, le pétrole, le gaz naturel et l'uranium), les énergies renouvelables sont en principe liées à des sources d'énergie inépuisables telles que le soleil, le vent, les marées, l'hydroélectricité, la géothermie, la biomasse et les déchets. Contrairement aux combustibles fossiles, leur fonctionnement s'accompagne d'émissions minimales de déchets et de polluants [3]. Ce chapitre discute la biomasse en générale et basé sur la biomasse algale ainsi que sur l'utilisation de cette biomasse pour la production de la bioénergie.

1.2. Biomasse

1. 2.1 Définition :

La biomasse est définie comme tout matériau produit biologiquement à base de carbone, d'hydrogène et d'oxygène. **Il** comprend une variété de matériaux, y compris le bois, les résidus forestiers, la paille, les engrais, les déchets agricoles verts, les boues d'épuration, les déchets animaux, les déchets alimentaires, etc. Par conséquent, contrairement à l'énergie éolienne et solaire, la disponibilité continue de l'énergie de la biomasse peut toujours être garantie [3]. *Ghosh* a estimé en **1997** que le recyclage des déchets organiques et des eaux usées industrielles pourrait réduire le réchauffement climatique de 20%. En effet, il existe de nombreuses façons intelligentes d'utiliser la biomasse. **Il** peut être directement brûlé pour générer de la chaleur, ou il peut être utilisé indirectement après avoir été converti en diverses formes de biocarburants [3], comme le montre la figure *1.1*.

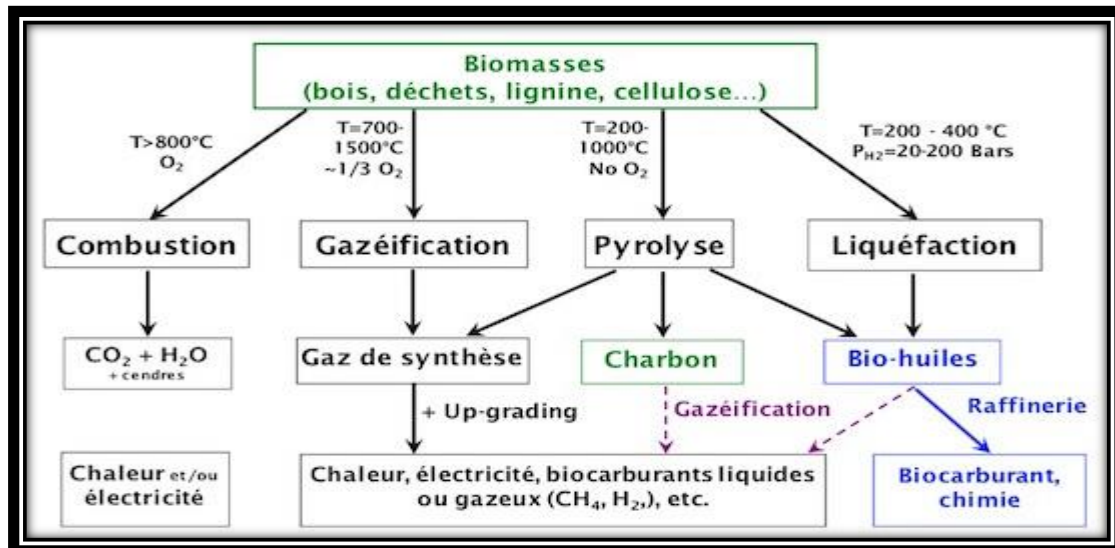


Figure 1.1 : Technologies de conversion de la biomasse et des déchets [4].

1.2.2 Ressources de la biomasse :

D'une manière générale, les ressources de la biomasse accessibles issues de grands domaines de production, peuvent être classées de la manière suivante :

- ✓ Les co-produits et résidus de l'agriculture et de l'élevage : pailles, pulpes, drèches, tourteaux, fumier de bovins, lisier de porcs, fientes de volailles.
- ✓ Les ressources halieutiques : produits animaux de la mer et des zones humides et leurs déchets, algues et microalgues, ces dernières promises à un grand avenir car très riches en énergie.
- ✓ Le bois des forêts qui fournit en majeure partie les ressources de bois-énergie, utilisées pour la cuisson des aliments, le chauffage des logements et des collectivités que complètent aussi les plantations d'arbres à vocation énergétique, comme le peuplier, le pin, l'eucalyptus ou les taillis à courte rotation (TCR), soit quelques années, en saule notamment.
- ✓ Les déchets naturels du bois et de la sylviculture (plaquettes, sciure) ainsi que ceux des industries du bois de construction (copeaux, sciure) et du bois d'emballage (cagettes, palettes, tonnellerie), à l'exception de ceux traités par des produits chimiques toxiques.
- ✓ Les déchets issus des industries agro-alimentaires, des habitations et des collectivités urbaines, souvent humides ou même liquides, parmi lesquels les boues des eaux usées, les ordures ménagères et résidus organiques des déchetteries, les résidus de la distribution et des cafés-restaurants ou ceux des espaces verts [5].

Il y a aussi la possibilité de cultiver du maïs et d'autres plantes, notamment exotiques, en vue de produire le biogaz par méthanisation. Ce biogaz peut être consommé dans l'industrie, distribué dans des réseaux ou utilisé comme carburant dans des véhicules.

Les deux figures suivantes montrent les différentes ressources de la biomasse.



Figure 1.2 : Source de biomasse [6].

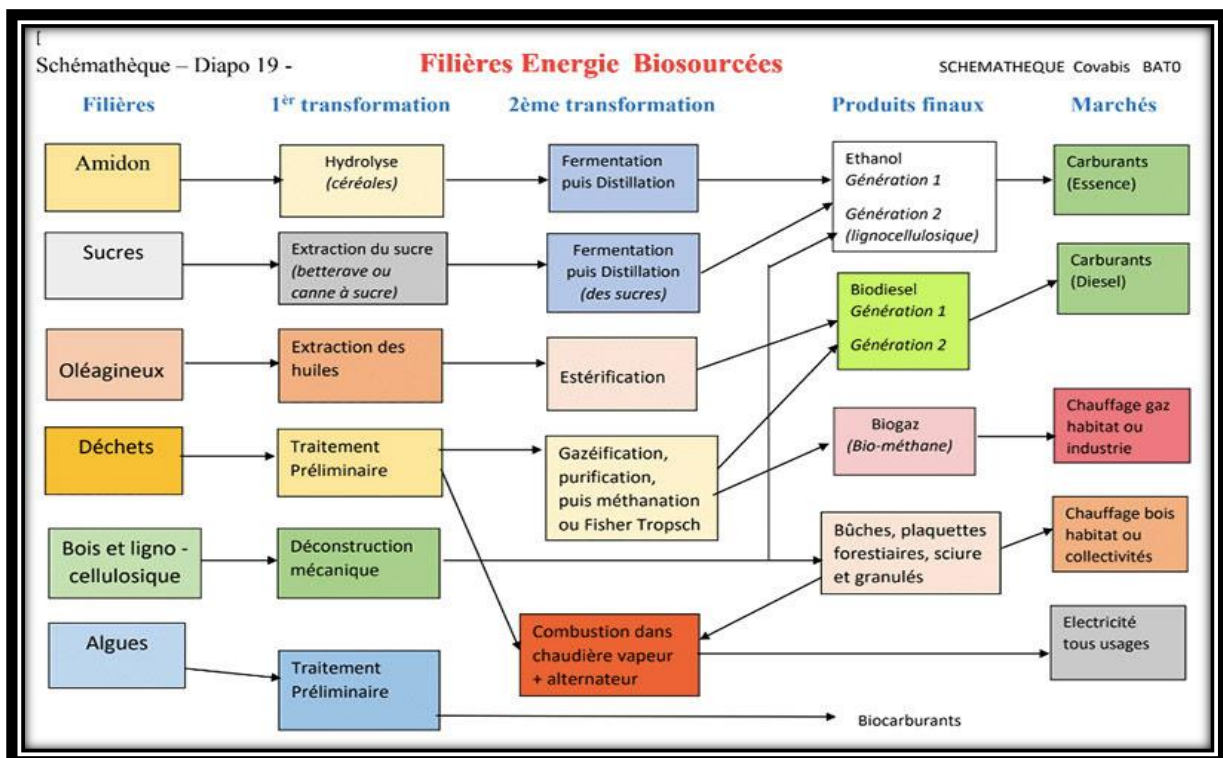


Figure 1.3 : ressource/production [7].

1.2.3 Générations de la biomasse :

D'une manière générale, les types de les générations de la biomasse sont classées comme suit :

- ✚ **1^{ère} génération** : Ce type de biomasse basé sur des produits tels que les graines oléagineuses, la canne à sucre et d'autres huiles alimentaires et végétales destinées à l'alimentation animale. Les deux principales filières des biocarburants liquides sont aujourd'hui la production de bioéthanol obtenu par fermentation de produits végétaux (blé, maïs, betterave et canne à sucre) et de biodiesel à partir d'huiles (colza, tournesol, soja et palme principalement). C'est aussi une filière dédiée au biogaz (biométhane) qui peut remplacer le gaz naturel. Les produits qui peuvent être obtenus grâce à cette génération sont : le biodiesel, le biométhane et le Biobutanaol [8].
- ✚ **2^{ème} génération** : Ce type de biomasse est différent à la première génération. Il est basé sur des produits non alimentaires. Cette génération peut être classées en quatre groupes selon le type de ressource, le premier groupe comprend les résidus forestiers, le second contient les déchets solides municipaux, le troisième groupe contient les déchets de papier, et le dernier groupe comprend les ressources des résidus de cultures.[8].

Les boues et les fumiers de bétail aussi considérés comme des résidus non comestibles peuvent être ajoutés à cette génération. Les cultures énergétiques spécialisées cultivées dans les terres arables, possèdent une productivité énergétique plus élevée que les cultures destinées aux biocarburants de première génération (et coproduits) produites sur les mêmes terres. Les produits qui peuvent être obtenus grâce à cette génération sont : Biodiesel, Bioéthanol, Biobutanaol, Biogaz et Gaz de synthèse

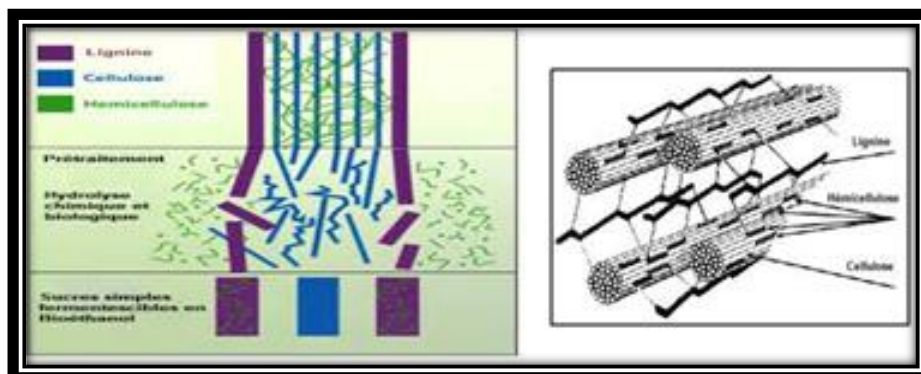


Figure 1.4 : Constituants de la matière lignocellulosique et les résultats schématiques du procédé [9].

✚ **3^{ème} génération (biomasse algale) :** Les contraintes rencontrées dans la première et la deuxième génération poussent les chercheurs vers une nouvelle ressource de la biomasse qui est la biomasse algale. Ce type de biomasse basé sur les espèces microbiennes telles que les levures, les champignons et les algues peuvent être utilisées comme ressource de biomasse pour la production de biocarburants récemment.

Les algues ont suscité un grand intérêt en tant qu'alternative de la biomasse de la première et de la deuxième génération en raison de leur taux de photosynthèse et de croissance plus élevé que toute autre plante.

Il existe une possibilité de produire de l'huile microbienne à partir de riz traité avec suffisamment d'acide, en cassant la paille en cultivant des micro-organismes tels que (fermentation de *Trichosporon*) et sur la base de leurs découvertes, cet organisme est capable de se développer et de bénéficier de la décomposition de la paille de riz pour s'accumuler lipides dans la biomasse de la cellule Haut débit, il y a aussi production microbienne de biocarburant à partir des déchets de mélasse afin que les levures puissent bien se développer sur la biomasse lignocellulosique prétraitée favorise efficacement l'accumulation de lipides dans les produits pouvant être obtenus grâce à cette génération de biodiesel bioéthanol Biobutanaol gaz Biosynthétique (bio-hydrogène et biométhane)[8].

La figure suivante montre 3^{ème} génération de la biomasse.



Figure 1.5 : 3^{ème} génération [10].

✚ 4^{ème} **génération** : Le développement technologique et la nécessité d'améliorer le rendement de la biomasse algale étaient la raison pour laquelle la quatrième génération de la biomasse est apparue. Ce type de biomasse utilise les microalgues modifiées génétiquement : Au cours des deux dernières décennies, la révolution de la technologie de la biologie cellulaire a conduit au développement de nouveaux concepts de fonction et de structure cellulaires [11]. La capacité des micro-organismes à convertir le CO₂ en carburant par photosynthèse, les multiples avantages de microalgues telles que son taux de croissance élevé et sa teneur en huile et la faible complexité structurelle améliorent leurs nombreuses demandes. En tant que les bactéries procaryotes photosynthétiques, cyanobactéries, ainsi que microalgues sont considérées comme des usines cellulaires dirigées par la lumière du soleil dans lesquelles le carbone de dioxyde et l'eau sont convertis en sucres et éventuellement en divers produits biochimiques, certaines technologies de quatrième génération comprennent la pyrolyse, la gazéification et la valorisation.[12].

Le tableau 1.1 suivant présente ces 4 générations avec la technologie utilisée pour la production de biocarburant et les produits finis de chaque génération :

✚ Tableau 1.1 : les générations de la biomasse [13].

Génération	Matières premières	Technologie de traitement	Produit résulté
1 ^{er}	- Graines oléagineuses - Cultures vivrières - Graisses animales	- Estérification et transestérification d'huiles. - Fermentation des sucres - Les procédés thermochimiques	- Biodiesel - Bioéthanol - Biobutanol
2 ^{ème}	-Huile de cuisson utilisée provenant de graines oléagineuses non comestibles - Matières premières lignocellulosiques : (Paille de céréales, bagasse de canne à sucre, forêt Résidu)	- Physique, chimique, biologique - Prétraitement de la matière première et fermentation, - Procédé thermochimique	- Bioéthanol - biobutanol - biodiesel, - gaz de synthèse
3 ^{ème}	Les Algues	- Culture d'algues - récolte - huile extraction - transestérification	Biodiesel - bioéthanol - biobutanol, - gaz de synthèse

		- fermentation - processus thermochimique	- bio-hydrogène - méthane
4 ^{émé}	Les Algues et autres microbes	- Ingénierie métabolique des algues avec l'augmentation de la capacité de piégeage du carbone - culture - récolte fermentation - extraction d'huile - transestérification - procédé thermochimique	- Biodiesel - bioéthanol - biobutanaol, - gaz de synthèse - bio-hydrogène - méthane

1.2.4 Biomasse de la troisième génération :

Le présent travail (projet de fin d'étude) traite la biomasse algale. A cet effet, les paragraphes qui suit parlent sur la biomasse de la troisième génération (biomasse algale).

1.2.4.1 Les macro-algues :

1.2.4.1.1 Définition :

Les macro-algues sont des organismes multicellulaires qui existent dans l'eau douce et l'eau salée et forment des structures complexes (similaires aux plantes supérieures).

Les macro-algues sont utilisées dans la production de denrées alimentaires, aliments pour les animaux, produits chimiques, cosmétiques et produits pharmaceutiques. Les États-Unis, le Canada et les pays européens comme la France, l'Irlande, le Royaume Uni (Écosse, Irlande du Nord, Pays de Galles), l'Allemagne, la Norvège, les Pays-Bas et le Danemark cherchent à établir la culture d'algues à grande échelle [12].

1.2.4.1.2 : Caractéristique :

- ✓ Diversité de familles et d'espèces :

Aujourd'hui, il est détecté environ 1800 types de macro-algues brunes, et d'environ 6000 types de macro-algue rouge et d'environ 1200 espèces de macro-algue vertes. Par conséquent, les macro-algues se composent d'un très large éventail d'organismes distincts des plantes terrestres (embryophytes) et possèdent un très large éventail de métabolismes qui peuvent être rares ou même absents chez les animaux, les plantes, les champignons ou les micro-organismes. Il s'agit de ressources biologiques précieuses autant qu'elles sont encore relativement inexploitées [12].

1.2.4.2 Les microalgues :

Les microalgues sont unicellulaires et vivent dans n'importe quel environnement (sol, air, eau) et ne formeront pas de structures complexes.

La plupart des microalgues utilisent du dioxyde de carbone et de l'eau pour convertir l'énergie solaire en oxygène et en biomasse algale (matière organique) grâce à une réaction appelée photosynthèse. Les microalgues se caractérisent par un rendement photosynthétique élevé (le rapport entre l'énergie lumineuse incidente et l'énergie stockée dans les plantes) [14].

1.2.4.2.1 Principales méthodes de production :

Les principales méthodes de production des algues sont :

- Les bassins à ciel ouvert, peu coûteux à faire fonctionner. Néanmoins, ces microbiennes et une perte d'eau par évaporation.
- Les photo-bioréacteurs, tubes transparents formant un système clos. Leur coût s'avère plus élevé mais est compensé par des productivités supérieures [14].

1.3 Avantages :

Une production *microalgues* à vocation énergétique pourrait présenter de nombreux avantages en termes de rendement et d'un point de vue environnemental :

- ✚ Dans le domaine des biocarburants, certaines espèces peuvent produire une quantité d'huile estimée à plus de 30 fois supérieure à celles des plantes oléagineuses terrestres (colza, tournesol...) pour une même surface.
- ✚ Les microalgues sont cultivées sur des surfaces réduites, n'entrant pas a priori en compétition avec les surfaces agricoles destinées à une production alimentaire. En effet, les microalgues peuvent croître dans des eaux impropres à toutes formes de culture terrestre, tout en les dépolluant et les purifiant (notamment par l'utilisation comme nutriments de nitrates ou de phosphates, sans les rejeter ensuite).
- ✚ Elles présentent un potentiel important pour la fixation du CO₂ d'origine industrielle, nécessaire en grandes quantités pour leur croissance [14].

La figure suivante montre un photo-bioréacteur.

Figure
1.6 :
Photo-
biore-
acteu-
rs
[15].



1.4 :

un modèle (exemple) :

Cela a été essayé à un niveau plus petit dans la société britannique « *ECOLOGICSTUDIO* » à *Milano*.

Bâtiments dans lesquels les algues spiruline sont cultivées dans des tubes et des sacs en plastique, formant des sculptures de haute technologie qui purifient l'air. [16].



Figure1.7 : Ecologique studio Milano [16].

1.5 : Biomasse algale pour la production de la bioénergie :

La biomasse algale a de nombreuses capacités pour produire différents métabolites pour une vaste gamme d'applications. La culture de biomasse algale devrait être basée sur les eaux usées pour la production de biomasse de produits de faible valeur tels que le bioéthanol, le biodiesel et le biogaz, et l'eau traitée peut être utilisée à d'autres fins de la raffinerie [12].

1.5.a Bioéthanol :

Le bioéthanol est le seul carburant liquide pour moteurs essence qui soit **renouvelable** et immédiatement disponible puisqu'il est produit à partir de **matière première végétale**, aussi appelée biomasse. D'où l'appellation bioéthanol faisant référence à l'origine vivante végétale et non fossile de ce carburant.

L'éthanol ou encore alcool éthylique, molécule de formule chimique C_2H_5OH [17].

❖ La production (bioéthanol/biomasse algale) :

- ✚ Les algues sont considérées comme la matière première potentielle pour la production de bioéthanol de troisième génération car la biomasse peut être convertie directement en énergie. Généralement, l'utilisation de cette matière première pour la production de bioéthanol dépend de facteurs tels que la technologie et l'environnement marin [17].

Ces micro-organismes produisent aussi des glucides (tels que le glucose ou l'amidon) présentant un intérêt pour la production d'un biocarburant, l'éthanol. Celui-ci est produit au cours d'une fermentation anaérobie (sans oxygène) en l'absence de lumière à partir de l'amidon. L'alcool obtenu est ensuite concentré et hydraté pour aboutir au bioéthanol [14].

Le tableau suivant les sources du bioéthanol de troisième génération :

Génération de bioéthanol	Troisième génération
Source de matière première	Biomasse algale
Utilisation des terres pour la culture	Eau de mer, eaux douces et usées
Technologie de	Distillation et fermentation

conversion	
Rendement en bioéthanol	Elevé
Impact sur l'environnement	Contribution élevée à l'atténuation du CO2
Inconvénients	Investissements limités et difficultés dans la conception des processus

✚ **Tableau 1.2** : Le bioéthanol de troisième génération [17].

1.5.b Biodiésel : Certaines espèces de microalgues peuvent accumuler des taux importants de lipides et plus spécifiquement des triglycérides. Ces derniers par réaction de transestérification avec un alcool conduisent à des esters utilisables dans les moteurs à combustion [18]. En plus de l'argument de productivité, les microalgues possèdent un atout majeur par rapport aux autres solutions comme montre la figure suivante.

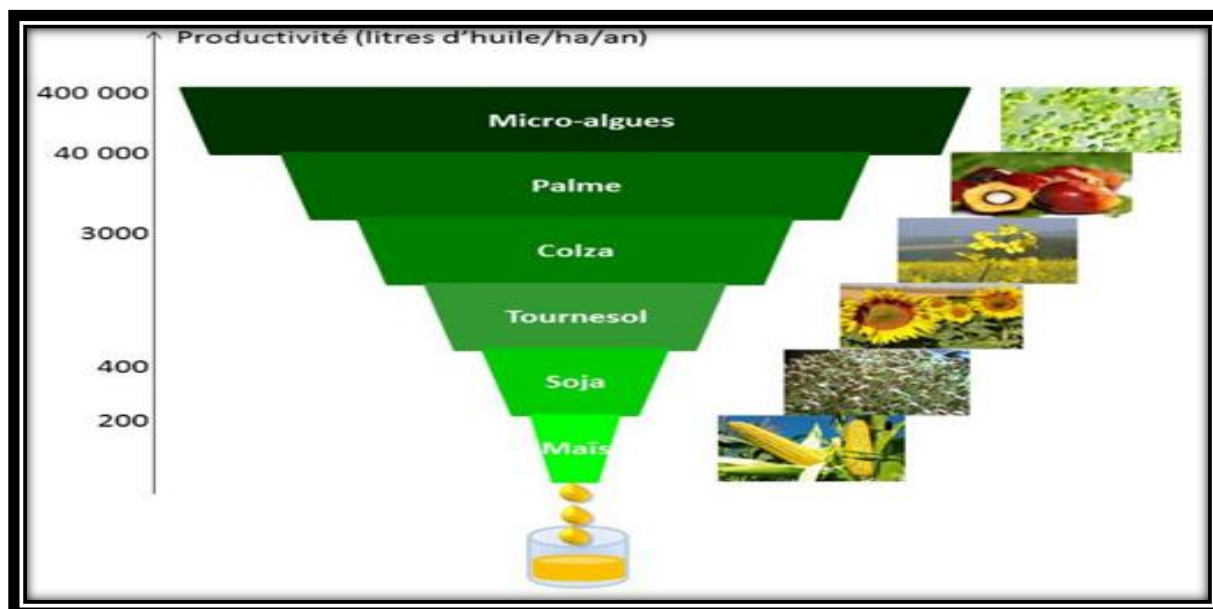


Figure 1.8 : Productivité en huile des microalgues par rapport à d'autres plantes oléagineuses [18].

1.5.c Bio-hydrogène :

L'hydrogène renouvelable biosource, obtenu à partir de biomasse de manière directe ou indirecte, peut être produit selon plusieurs voies. Génériquement, l'hydrogène produit par des microorganismes à partir de sources renouvelables comme la biomasse, les eaux usées ou les déchets organiques est appelé « bio-hydrogène ». Parmi les procédés de production on compte :

- La vaporeformage de matières renouvelables.
- La gazéification de la biomasse.
- La bio-photolyse.

Il est fabriqué par des microorganismes autotrophes photosynthétiques utilisant leur système photosynthétique et leur énergie lumineuse pour finalement décomposer les molécules d'eau en atomes d'hydrogène et d'oxygène. Par conséquent, comme il ne nécessite que de l'eau et de la lumière comme substrats, il s'agit a priori et d'un procédé de production d'hydrogène intéressant (figure N°1.9) [19, 20].

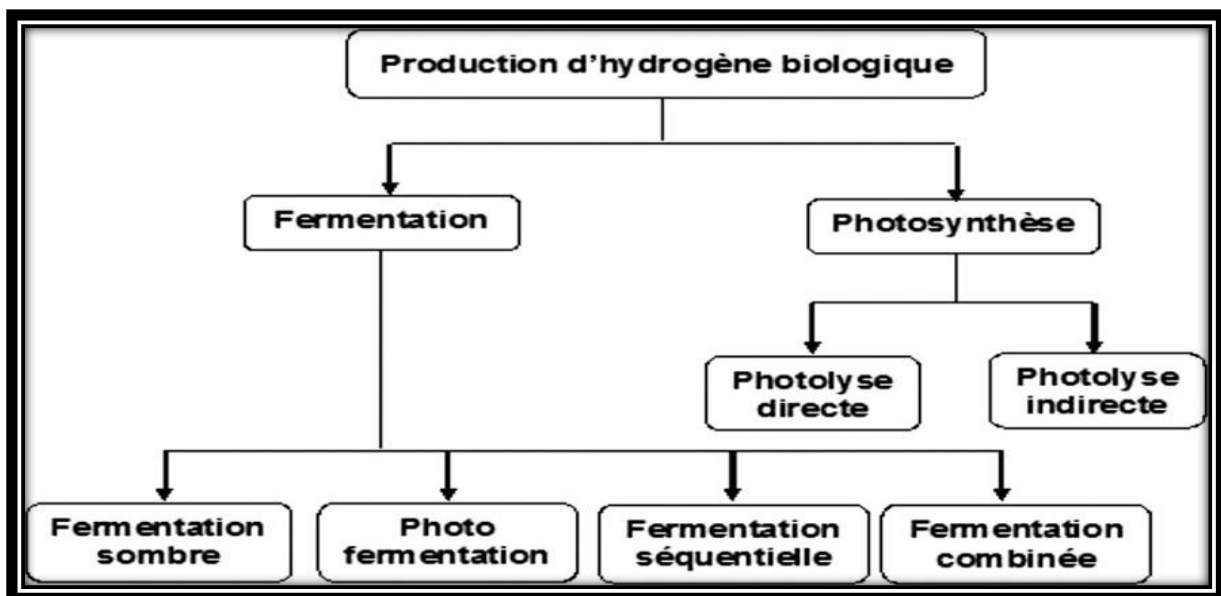


Figure 1.9 : Méthodes biologiques de production d'hydrogène [20].

1.5.d Biométhane :

Une forme différente d'énergie peut également être produite à partir de microalgues, le biométhane. Celle-ci se révèle particulièrement adaptée à cette application. Après fermentation dans un digesteur, elles génèrent un biogaz composé de 70% de méthane, les autres gaz étant du dioxyde de carbone et de l'azote. Cette technologie a été développée dans les années 40 aux États-Unis et est maintenant répandue [18]. Le grand avantage de la méthanisation est que la biomasse n'a pas besoin d'être séchée alors que pour de nombreuses voies de valorisation de la biomasse, une étape de séchage est requise.

Le méthane, molécule de formule chimique CH_4 développée :

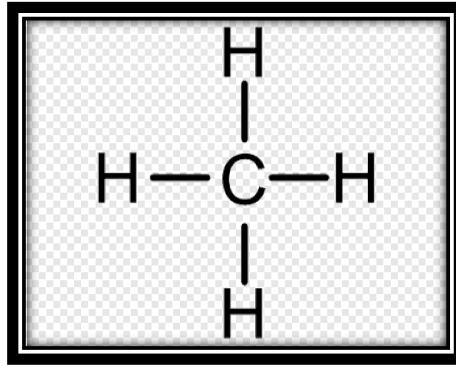


Figure 1.10 : Structure de Lewis CH₄ [21].

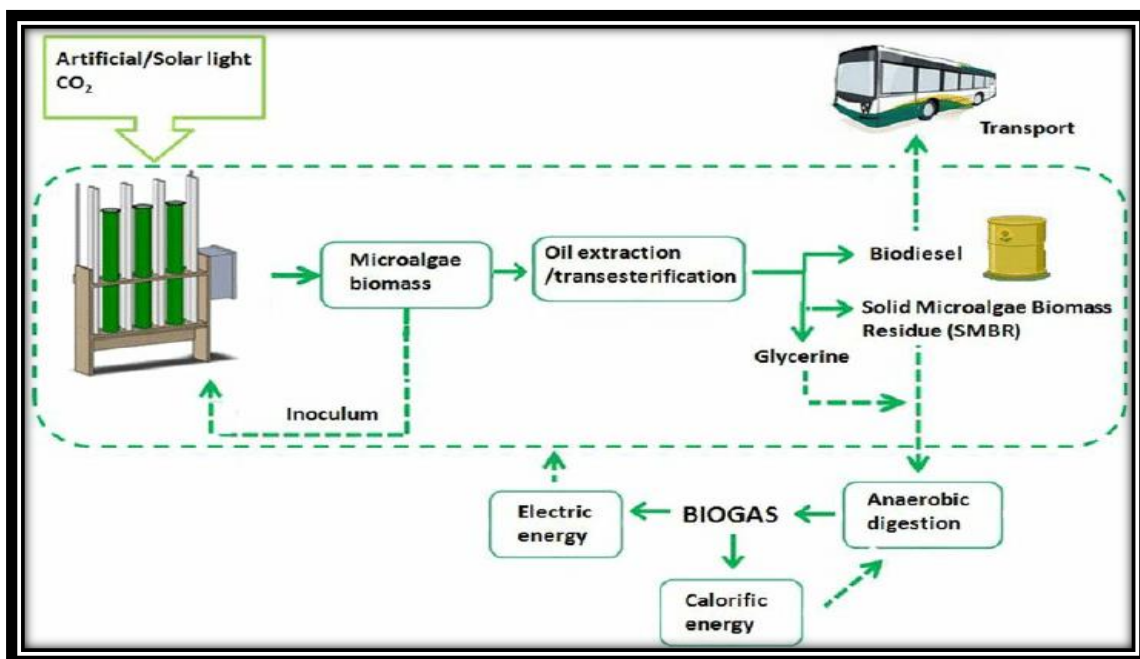


Figure 1.11 : Processus de production du biométhane [22].

1.6 Conclusion :

Les algues « *L'or vert* » les plus anciennes encore présentes à la surface de la terre dans des environnements tels que les mers, les rivières et les barrages contribueront à réduire les émissions de gaz contaminés d'une part et à produire une masse énergétique vitale. Les chercheurs développent actuellement des algues pour devenir un allié économique majeur de l'énergie.

En conséquence, la tendance vers cette stratégie sera une forte motivation pour les énergies renouvelables en raison de la disponibilité de la biomasse algale en situation à la portée de tous les nécessiteux dans les villages, les zones rurales et les zones isolées.

CHAPITRE 02 :
DIGESTION
ANAEROBIE

2.1. Introduction :

La digestion anaérobie dite (méthanisation) apparaisse maintenant comme une technique efficace et économique dans de nombreux pays surtout en Europe. Elle conduit à la production d'une énergie renouvelable qui le biogaz utilisé dans plusieurs secteurs comme carburant ou injecté après épuration dans le réseau du gaz naturel [23].

2.2. Digestion anaérobie ou méthanisation**2.2.1. Définition :**

La digestion anaérobie est un processus naturel par lequel la matière organique est transformée en biogaz constitué principalement du méthane (CH_4) et du dioxyde de carbone (CO_2) et des traces d'autres gaz. Elle résulte de l'activité d'un écosystème microbien anaérobie complexe.

Cette transformation très répandue dans la nature, se retrouve dans les marais, dans les intestins d'animaux, d'insectes... et de manière très générale lors du stockage de la matière organique en absence d'oxygène [24].

2.2.2. Etapes de la méthanisation :

La digestion anaérobie selon Wheatley est un processus microbiologique naturel qui peut être divisé en 4 étapes. Dans chacune de ces étapes, une catégorie bien précise de bactéries entre en jeu [23].

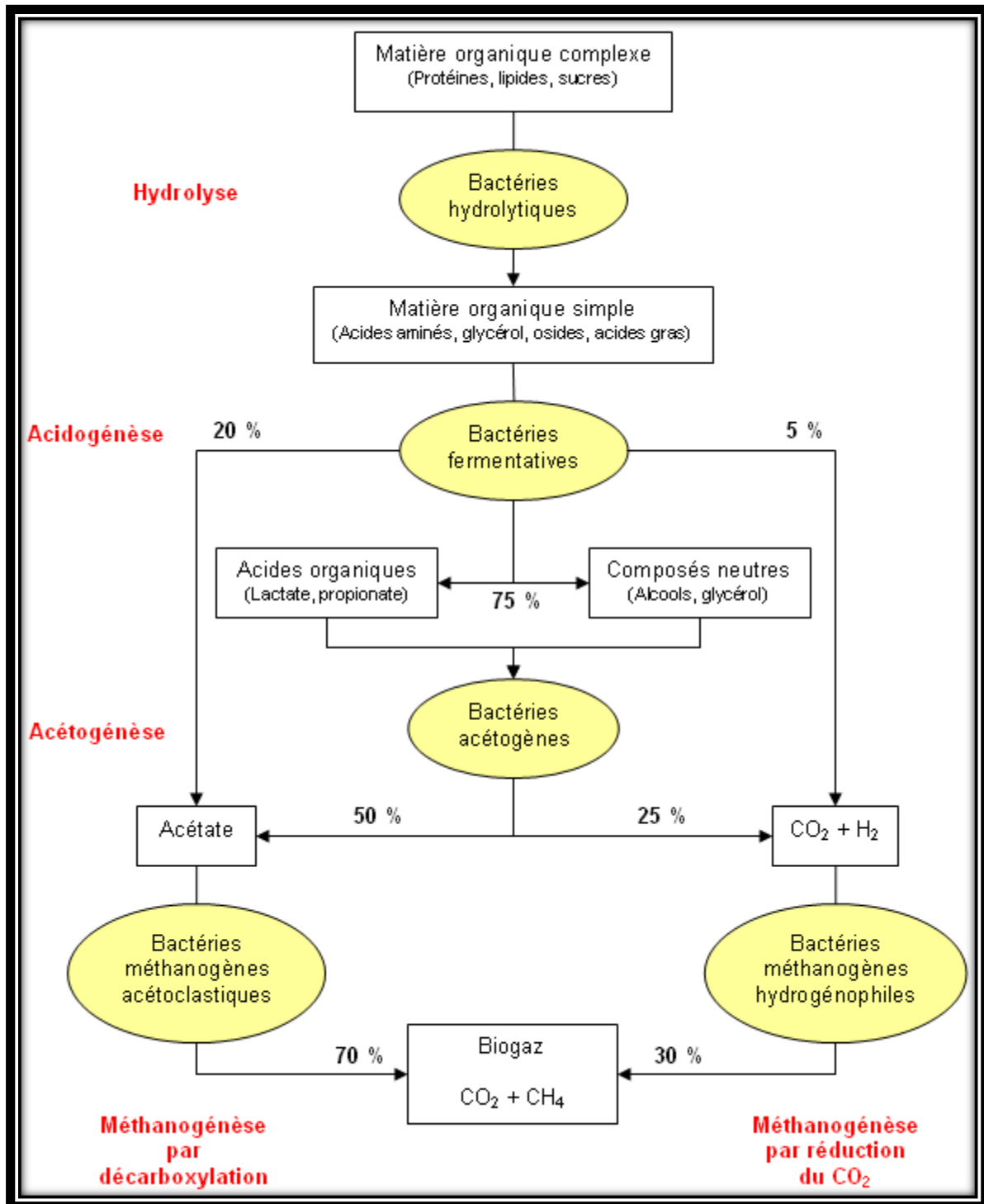


Figure 2.1 : Les étapes de la digestion anaérobie [25].

2.2.2.1. Hydrolyse : Pendant cette étape, la plupart des substrats complexes (macromolécules) sont transformés en composés plus simples (monomères) et solubles par des bactéries hydrolytiques. Les lipides sont transformés en acides gras et en glycérol ou en autres alcools, les polysaccharides en acides, en aldéhydes et en alcools, après un stade

intermédiaire en monosaccharides et glucides, pendant lesquelles protéines sont transformées en acide acétique et azote ammoniacal après un stade intermédiaire comme les aminoacides [25].

2.2.2.2. Acidogènes : Au cours de cette étape, les composés organiques simples et les monomères organiques sont transformés en Acides Gras Volatiles (AGV), sont : les acides acétique, propionique, butyrique, valérique et caproïque. Cette étape est réalisée par un groupe de bactéries appelé bactéries acidogènes et fermentaires. L'hydrogène peut être produit pendant cette étape [25].

2.2.2.3. Acétogénèse : C'est l'étape où les AGV (acides gras volatiles) qui ce sont des substances de petite taille moléculaire (quelques alcools) sont transformées en acétate par des bactéries acétogènes, en produisant de H_2 et CO_2 [25].

2.2.2.4. Méthanogénèse : L'acétate et l'hydrogène préalablement formés dans le bioréacteur sont utilisés comme substrats par des microorganismes méthanogènes appelés archées, qui produisent principalement du méthane (CH_4) et du dioxyde de carbone (CO_2) [25].

La figure suivante montre le bilan de la conversion de la matière organique dans la digestion anaérobie.

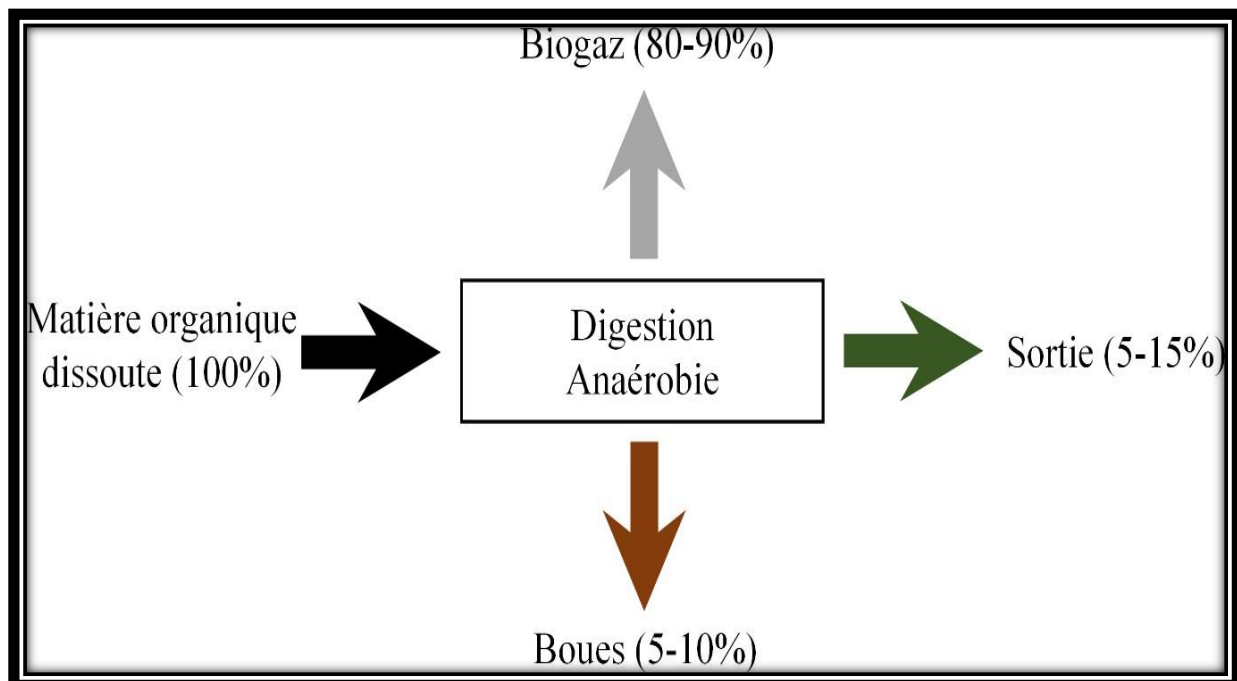


Figure 2.2 : La conversion de la matière organique dans la digestion anaérobie [25].

2.3. Paramètres influençant la méthanisation :

Certains paramètres qui doivent être pris en compte pour le bon fonctionnement d'un processus de digestion anaérobie pour l'obtention de biogaz sont présentés ci-dessous [26].

2.3.1. Surface spécifique du substrat :

Plus la surface spécifique du substrat est grande, plus le contact entre les micro-organismes et le substrat est efficace, par conséquent, la digestion est plus rapide. La surface spécifique devient plus grande lorsque la taille des particules est très fine. Si le substrat se présente sous forme de gros morceaux de matières solides, il doit être broyé [26].

2.3.2. Rapport C/N :

Les proportions relatives du carbone et de l'azote présents dans une matière organique est exprimée en termes de rapport carbone/azote (C/N). Un rapport C/N compris entre 16 :1 et 25 :1 est considéré comme optimal pour la digestion anaérobie.[26].

Si le rapport C/N est trop élevé, l'azote est consommé rapidement par les méthanogènes pour répondre à leurs besoins en protéines. Par les méthanogènes pour satisfaire leurs besoins en protéines et n'est plus disponible pour réagir sur le reste du carbone contenu dans la matière. En conséquence, la production de biogaz est réduite.[26].

Si le rapport C/N est trop faible, de l'azote est libéré et s'accumule sous forme d'ammoniac. Cela augmente le pH de la matière. Lorsque le pH dépasse 8.5, il commence à exercer un effet toxique sur les bactéries méthanogènes.[27].

Pour maintenir le rapport C/N des matières du digesteur à un niveau optimal, on peut mélanger des matières à rapport C/N élevé avec des matières à rapport C/N faible [27].

2.3.3. Dilution :

Il convient d'ajouter de l'eau, si nécessaire, à la matière première pour obtenir une suspension ni trop épaisse ni trop fine. Si une matière est trop diluée, les particules solides risquent de se déposer dans le digesteur et de ne pas être dégradées correctement. Si la boue est trop épaisse, elle peut être difficile à remuer et entraver l'écoulement des gaz vers la partie supérieure du digesteur [26].

2.3.4. PH :

La production optimale de biogaz est atteinte lorsque la valeur du pH du mélange d'entrée se situe entre 6,7 et 7,5

Pendant la période initiale de digestion, de grandes quantités d'acides organiques sont produites et le pH du mélange diminue. Lorsque la digestion se poursuit et que la concentration d'ammoniac augmente, en raison de la digestion de l'azote, la valeur du pH augmente. Lorsque la production de méthane se stabilise, le pH reste entre 7,2 et 8,2 [26].

2.3.5. Température :

Différentes espèces de bactéries méthanogènes fonctionnent de manière optimale dans trois plages de température différentes : 50-65 °C, 20-40 °C, et <1,2 °C. Les bactéries concernées sont appelées respectivement thermophiles, mésophiles et psychrophiles [26].

2.3.5.1. Thermophiles : c'est une plage de température dont les micro-organismes vivants se multiplient et fonctionnent à des températures optimales de croissance se situe au-dessus de 60°C. et par conséquent il y a trois catégories [28] :

- ✓ Les températures thermophiles modérées dont les conditions optimales se situent entre 55 et 65°C.
- ✓ Les températures thermophiles extrêmes dont la température optimale se situe comprise entre 65 et 80°C.
- ✓ Les températures hyperthermophiles dont la température optimale est supérieure à 80°C.

2.3.5.2. Mésophiles : c'est une plage de température dont la croissance des micro-organismes vivants est optimale sous une température comprise entre 20 à 45 °C [29].

L'habitat de ces organismes est très diversifié et cosmopolite : le sol, l'eau douce et l'eau de mer, les eaux usées, sur les végétaux, les animaux et l'homme [30].

2.3.5.3. Psychrophiles : c'est une plage de température où les microorganismes adaptés sont capables de survivre à des températures froides par exemple dans les mers polaires ou les abysses (90 % du volume des océans est en dessous de 5 °C, les sols gelés ou dans les glaciers. Des représentants de la majorité des taxons du vivant sont capables de vivre provisoirement dans des environnements avec des températures juste en dessous de 0 °C, mais

on les dits en théorie organismes psychrophiles que s'ils ont besoin de ces basses températures pour assurer tout leur cycle de vie (Leur température optimale de vie doit être inférieure à 15 C°) [31].

2.3.6. Taux de chargement :

Il s'agit d'un paramètre important de contrôle du processus, surtout lorsque la digestion est effectuée en mode continu - ce qui est généralement le cas. Une surcharge peut facilement conduire à une défaillance du système. Cela peut se produire si le mélange des déchets avec la boue est inadéquat. Cela peut provoquer une augmentation significative de la concentration en acides gras volatils, entraînant une forte baisse du pH. Dans ce cas, le débit d'alimentation du système doit être réduit pendant un certain temps jusqu'à ce que le processus se stabilise à nouveau [26].

2.3.7. Temps de rétention :

C'est la durée pendant laquelle la matière organique (substrat) et les micro-organismes ("solides") doivent rester ensemble dans un digesteur pour atteindre le degré de dégradation souhaité [26].

2.3.8. Toxicité :

Les ions minéraux, notamment de métaux lourds, et les détergents sont parmi les matières qui inhibent la croissance normale des bactéries dans un digesteur. De petites quantités de minéraux (sodium, potassium, calcium, magnésium, ammonium et soufre) stimulent la croissance bactérienne, mais des concentrations plus élevées peuvent être inhibitrices [26].

2.3.9. Les besoins en nutriments :

Les exigences nutritionnelles des bactéries méthanogènes permettent de les distinguer en plus de la source de carbone et d'énergie. Les bactéries anaérobies semblent avoir des exigences nutritionnelles simples en ce qui concerne l'azote, le phosphore, le magnésium, le sodium, le manganèse, le calcium, le cobalt, le potassium et l'hydrogène [32].

La forme sous laquelle doivent être apportés ces divers éléments et l'influence de leur concentration sur la production de méthane est importante à considérer [28].

Soufre : Certaines bactéries méthanogènes utilisent la cystéine mais la source préférentielle de soufre est le sulfure dont les propriétés inhibitrices se manifestent vers 70 à 200 mg/l. Si à forte

concentration les ions sulfates sont inhibiteurs, ils peuvent cependant en très petite quantité, avoir un effet bénéfique. Sous l'action des bactéries sulfite-réductrices, il y a production d'hydrogène et d'hydrogène sulfuré dont le rôle est double :

- D'une part abaisser le potentiel Red/Ox.
 - D'autre part insolubiliser sous forme de sulfures métalliques les métaux lourds à effets toxiques marqués tels que Zn, Ni et l'Hg.
- ✚ L'hydrogène : est un élément énergétique indispensable pour les bactéries méthanogènes, il est produit par la microflore fermentaire à partir des différents composés organiques [32].
- ✚ Phosphore, potassium, manganèse et le magnésium. Le phosphore est un élément nécessaire pour la synthèse des acides nucléiques et des phospholipides. Le potassium, le manganèse et le magnésium activent les enzymes. Ces éléments favorisent en plus la stabilisation des ribosomes, des membranes cellulaires et les acides nucléiques. Le cobalt est nécessaire à la formation de la vitamine B12 qui joue un rôle important dans les réactions de transfert de carbone [32]. Sachant que de légères déficiences perturbent considérablement les bactéries méthanogènes, il est nécessaire que les concentrations en éléments nutritifs soient en excès par rapport au niveau optimal exigé par ces dernières. Un élément nutritif essentiel peut devenir toxique pour les organismes si sa concentration dans le substrat devient trop forte [32].

✚ **Tableau 2.1** : Les concentrations limites de quelques éléments [28].

Ions	Concentration (mg/l)		
	Stimulante	Faiblement inhibitrice	Fortement inhibitrice
Mg ²⁺	75-150	1000-1500	3000
K ⁺	200-400	2500-4500	12000
Ca ²⁺	100-200	2500-4500	8000
Na ⁺	100-200	3500-5500	8000

2.3.10. Agitation :

L'agitation est nécessaire pour maintenir l'homogénéité du fluide, et donc la stabilité du processus, dans un digesteur. Les objectifs du mélange sont de combiner la matière

entrante avec les bactéries, d'empêcher la formation d'écume et de croûte et d'éviter les gradients de température prononcés dans le digesteur.

Un mélange très rapide peut perturber la communauté bactérienne tandis qu'un brassage trop lent peut provoquer un mélange inadéquat et un court-circuitage. L'ampleur du mélange nécessaire dépend également du contenu du mélange de digestion [26].

2.3.11. Pathogènes :

Certaines bactéries pathogènes (par exemple, Salmonella, Escherichia coli, Listeria) et certains virus présents dans les déchets solides municipaux peuvent présenter un risque d'infection pour les travailleurs qui manipulent ces déchets.

Ces agents pathogènes sont sensibles à la température, de sorte que le contrôle le plus efficace des agents pathogènes se produit lorsque la digestion anaérobie est effectuée à des températures thermophiles et à des temps de rétention longs [26].

3.12. Lumière :

La lumière ne tue pas les méthanogènes mais inhibe fortement la méthanisation. Il faut donc empêcher la lumière de pénétrer dans la chambre de digestion anaérobie [26].

2.4. La Co-digestion :

La Co-digestion est définie comme étant la digestion simultanée de deux ou plusieurs substrats [33]. Durant ces dernières années, la Co-digestion a connu un développement très important et le nombre de réacteurs de Co-digestion à partir de différentes variétés de déchets d'une façon générale, l'avantage de mélanger plusieurs substrats est considéré à deux niveaux [34] :

- ✓ En premier lieu, au niveau du procédé et du fonctionnement du digesteur, la Co-digestion permet d'améliorer la stabilité des digesteurs, garantissant un meilleur traitement de déchets. En effet, la Co-digestion peut être accompagnée d'une augmentation de la productivité et des rendements en méthane grâce à l'équilibre C/N qui peut être effectuer [35].
- ✓ En deuxième lieu, sur le plan économique, la Co-digestion est considérée plus favorable que la mono-digestion. En effet, cette technologie permet des traiter des substrats de types et origines différents dans une installation commune. Par conséquence, le traitement de différents types de déchets dans des installations

centralisés et régionales [36]. Permet la conception d'unités de méthanisation de taille plus importante par rapport à la mono-digestion, ce qui améliore la rentabilité des installations.

2.5. Biogaz :

2.5.1. Définition :

Le biogaz est le produit d'un processus à médiation biologique, connu sous le nom de digestion anaérobie. Le biogaz se compose principalement de méthane (CH_4) dans une proportion de 50 à 70 % et de dioxyde de carbone (CO_2) dans une proportion de 30 à 50 %. La teneur relative en CH_4 et CO_2 du biogaz dépend principalement de la nature du substrat et plusieurs paramètres qui ont été expliqués ci-dessus [37].



Figure 2.3 : Central de production biogaz [38].

2.5.2. Composition :

Outre ces deux gaz méthane CH_4 50-70% et du dioxyde de carbone CO_2 30-50%, le biogaz contient également des quantités mineures d'autres composés, tels que l'azote (N_2) à des concentrations de 0-3%, qui peut provenir de l'air saturé dans l'influent, l'eau sous forme de vapeur (H_2O) à des concentrations de 5-10%, ou plus à des températures thermophiles, provenant de l'évaporation du milieu, l'oxygène (O_2) à des concentrations de 0-1%, qui entre dans le processus à partir du substrat influent ou de fuites, du sulfure d'hydrogène (H_2S) à des concentrations de 0-10 000 ppm, produit par la réduction du sulfate contenu dans certains flux

de déchets, de l'ammoniac (NH_3) provenant de l'hydrolyse de matières protéiniques ou d'urine, des hydrocarbures à des concentrations de 0-200 mg/m^3 et des siloxanes à des concentrations de 0-41 mg/m^3 , provenant par exemple d'effluents d'industries médicales cosmétiques [37].

En dehors du CH_4 , tous les autres gaz contenus dans le biogaz sont indésirables et sont considérés comme des polluants du biogaz.

2.5.3. Valeur énergétique :

L'énergie du biogaz provient de son principal composant c'est le méthane. Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du méthane, c'est-à-dire la quantité de chaleur produite par la combustion, est de 9,42 kWh/m^3 , à 15 °C, et pour une pression atmosphérique normale. Selon les filières de production et les matières organiques utilisées, la proportion du méthane varie. Un biogaz à 65% de méthane présenter a donc un PCI de 9,42 x 0,65, soit 6,1 kWh/m^3 . Par comparaison, le gaz naturel est constitué de 96 % de méthane. Avec un processus optimisé, environ 500 m^3 de biogaz sont extraits par tonne de matière organique traitée [39].

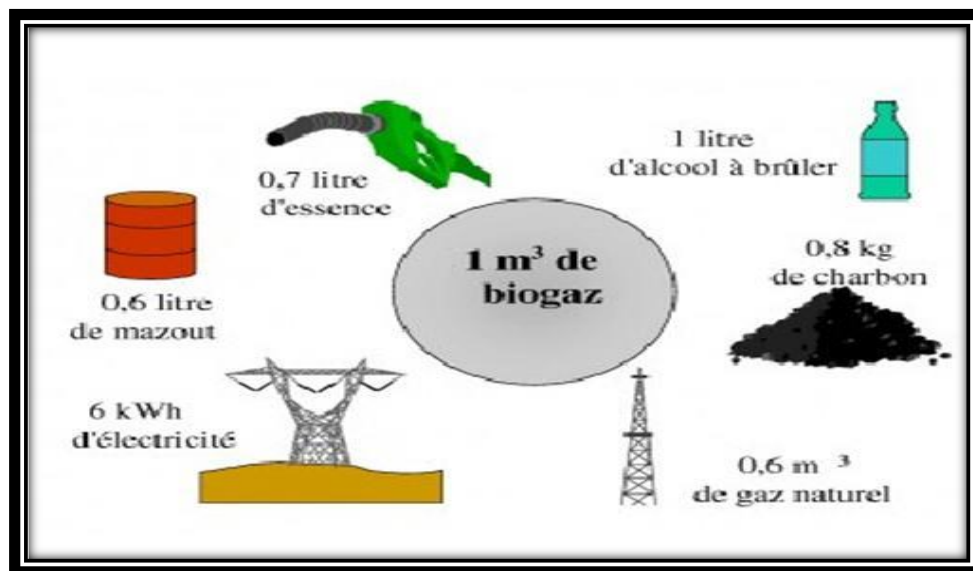


Figure 2.4 : Equivalence énergétique [40].

2.5.4. Purification du biogaz :

Comme il est mentionné précédemment, le biogaz récupéré dans le digesteur est principalement CH_4 et CO_2 . Le produit biogaz contient également des *impuretés*, malgré sa faible concentration, il réduit considérablement la valeur des calories (*PCI*) pour le biogaz et

recupère ainsi l'énergie à l'avenir. Les techniques permettant de purifier le biogaz sont nombreuses et bien documentées [41].

2.5.4.1. Absorption physique :

Des dépôts de gaz sur solubilité physique dans le liquide. C'est relativement simple à mettre en place. La solubilité peut varier du dioxyde de carbone dans le liquide en travaillant sur la pression et la température. L'eau est l'un des solvants utilisés, mais il existe également de nombreuses formulations commerciales dans lesquelles le CO₂ est plus fondant. Le principal inconvénient de l'énergie gazière et de la circulation liquide est associé [41].

2.5.4.2. L'absorption avec réaction chimique :

Le gaz réagit au liquide après l'avoir passé dans la solution, ce qui augmente le taux d'absorption par rapport au processus purement physique. Ce processus est faiblement sensible à la concentration de gaz à absorber, c'est pourquoi il est particulièrement adapté pour nettoyer la fumée des centrales thermiques contenant moins de 20% de CO₂. Les solvants chimiques les plus couramment utilisés sont les acides aminés et les solutions de base [41].

2.5.4.3 L'adsorption :

Il s'agit également d'un processus défini. Périodique (adsorption) est généralement mis en place, ce qui nécessite de nombreuses installations en parallèle avec le fonctionnement continu. Toutefois, il n'a pas besoin de produits chimiques et ne libère pas de déchets [41].

2.5.4.4 La séparation membranaire :

Il s'agit d'une méthode relativement moderne d'auto-paiement, mais elle a fait ses preuves dans le traitement du gaz naturel. Il est plus simple et plus serré que les techniques ci-dessus, mais fait toujours face à des problèmes de performance [41].

2.5.4.5 Séparation par cryogénie :

Il s'agit d'une méthode de distillation qui nécessite des températures très basses (jusqu'à -110°C) et des pressions très élevées (généralement environ 80bars). Compte tenu des coûts d'investissement et d'exploitation (facture d'énergie et entretien), ce processus est réservé aux flux très importants [41].

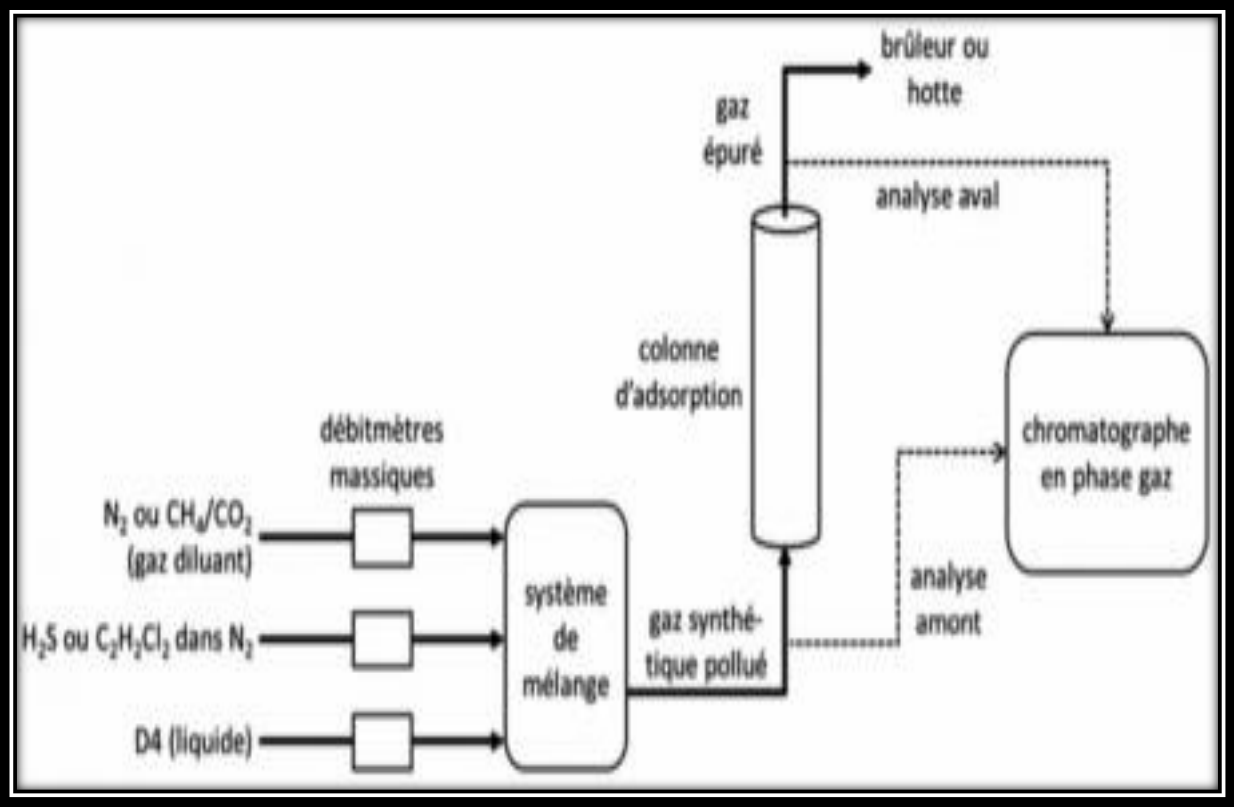


Figure 2.5 : Epuration de biogaz avec adsorption [42].

✚ **Tableau 2.2** : Techniques d'élimination du dioxyde de carbone. [41]

Méthode	Avantages	Inconvénients
Absorption physique	Efficacité jusqu'à 95% Séparation De H ₂ S Simplicité d'opération Régénération possible Pertes en CH ₄ faibles (<2%) si le solvant est bien choisi.	Coûts d'investissement et d'exploitation élevés.
Absorption chimique aux amines	Efficacité jusqu'à 99% Pertes en CH ₄ Très faibles (0.1%) Grande capacité d'absorption par unité de volume Régénération possible.	Coûts d'investissement élevés Nécessité de chauffer pour la régénération Problèmes de corrosion Problèmes de décomposition des amines.
Adsorption	Efficacité jusqu'à 98%. Séparation de H ₂ S Technique compacte Peu énergivore.	Coûts d'investissement et d'exploitation élevés Faible résistance aux Contaminants.
Séparation membranaire	Efficacité jusqu'à 95% Simple et fiable Séparation de H ₂ S et H ₂ O.	Pertes en CH ₄ Faible résistance aux Contaminants.
Séparation cryogénique	Efficacité jusqu'à 98% Pas de produits chimiques utilisés.	Coût énergétique très Important.

2.6. Avantages et les inconvénients de la digestion anaérobie :

2.6.1 : Les avantages :[43]

- ✓ Une réduction de la matière sèche des boues de l'ordre de 50%
- ✓ Une production d'un Biogaz valorisable sous forme d'énergie (chauffage cogénération d'électricité)

- ✓ Une réduction du nombre de micro-organismes pathogènes.
- ✓ Une demande en énergie plus faible que les procédés aérobies et pas d'apport en oxygène
- ✓ La possibilité de traiter des charges organiques élevées : de 2 à plus de 80 kg de DCO par mètre cube de réacteur et par jour avec des taux d'épuration de 80 à 98%
- ✓ La production d'un fertilisant stable riche en nutriment qui est le digestat

2.6.2 : Les inconvénients :[43]

- ✓ Une forte sensibilité aux variations de charges et aux composés toxiques.
- ✓ Une dégradation plus lente que pour les procédés aérobies.
- ✓ Des coûts d'investissement importants.
- ✓ Du fait de la faible vitesse de croissance bactérienne, la cinétique d'épuration est lente et les périodes de démarrage des réacteurs relativement longues.
- ✓ Les populations microbiennes sont sensibles aux perturbations, en particulier à l'oxygène et aux métaux lourds où encore aux surcharges organiques et le procédé se révèle souvent instable.
- ✓ Le traitement par digestion anaérobie est souvent insuffisant pour rejeter directement les effluents dans le milieu naturel : un post-traitement aérobique de finition est nécessaire pour achever l'élimination du carbone et éventuellement de l'azote et du phosphore.

2.7. Conclusion :

La digestion anaérobie est un processus de biodégradation de la matière organique qui s'accompagne de la production de biogaz, mélange de méthane et de dioxyde de carbone, permettant une valorisation énergétique et un fertilisant stable qui est le digestat. La participation des algues dans ce processus promet de bons résultats qui peuvent contribuer à la détection des nouvelles ressources renouvelables et participer au développement durable.[44].

PARTIE 2 :
PARTIE
EXPERIMENTAL.

CHAPITRE 03 : MATERIELS ET METHODE.

3.1. Introduction :

Ce chapitre présente l'ensemble des dispositifs expérimentaux, l'origine et le type du substrat utilisé ainsi que toutes les méthodes d'analyses utilisées. Le travail expérimental est effectué au niveau de laboratoire de bioconversion de l'Unité de Recherche en Energie Renouvelable en Milieu Saharien URERMS d'Adrar qui fait partie du Centre de Recherche en Energie Renouvelable CDER d'Alger

3.2.1. Origine et caractérisation du substrat utilisé :

Les substrats utilisés dans cette étude pour la production de biogaz est provient de deux origines distinctes :

- Origine aquatique représenté par les Macro-algues (MA) d'eau douce contenu dans les bassins d'irrigation traditionnels de la région d'Adrar appelé localement « Majen ».
- Origine terrestre saharien représenté par les Déchets de dromadaires (DD) provient du marché du cheptel.



Figure 3.1 : Substrat « Macro-algue » (bassins).



Figure 3.2 : Substrat « déchets des dromadaires ».

3.2.2. Prétraitement du substrat :

Afin d'optimiser les cinétiques de production du biogaz et de réduire le temps de séjour et pour assurer une homogénéisation de l'échantillon, un prétraitement physique du substrat est effectué à deux étapes :

3.2.2.1. Le nettoyage : Nettoyer l'échantillon de la saleté collante **poussière** et des impuretés en excès.



Figure 3.3 : Substrat « Macro-algue » avant et après nettoyage.



Figure 3.4 : Substrat « Déchets des dromadaires » avant et après nettoyage.

3.2.2.2. Le broyage : Broyage de l'échantillon « substrat » pour se transformer en fines particules.



Figure 3.5 : Substrat utilisée après le broyage.

3.2.3. Description du digesteur et dispositif utilisé :

Les essais ont été réalisés dans des réacteurs de type batch (discontinu). Ces réacteurs ont été préparé à partir des bouteilles en verre d'une capacité de 180 ml avec un volume utile de 150ml. Chaque réacteur est muni d'un trou pour assurer l'échappement du gaz pour la mesure du volume de biogaz produit.



Figure 3.6 : Les matériaux utilisés pour la préparation des réacteurs.

La dégradation de substrat et la production de biogaz sera assuré par un **inoculum**, ce dernier est préparé de la boue de la station de lagunage de la ville d'Adrar.

Les digesteurs utilisés sont alimentés avec les substrats et cosubstrat « MA/DD », avec une concentration de 2g MO « MA/DD » Et un rapport inoculum : substrat de 2 :1 qui correspond 4g MO de « l'inoculum » : et 2 g MO de substrat.

Quinze réacteurs en double ont été préparé lors de la présente expérience divisée en trois groupes. Le premier groupe se compose de sept réacteurs contiennent l'inoculum plus les substrats bruts prétraité physiquement. Le deuxième groupe se compose de sept autres réacteurs contiennent l'inoculum plus les substrats prétraités physiquement plus un prétraitement thermique à une température de 134 °C

pendant 2 heures suivi par un prétraitement chimique à base de l'acide dilué 0,5 % afin de d'hydrolyser les substrats lignocellulosique. Le troisième groupe se compose du réacteur qui reste qui ne contient que l'inoculum. Les sept réacteurs qui concernent les deux groupes contiennent les proportions suivantes :

✚ **Tableau 3.1** : les proportions des réacteurs.

1	100MA + 0DD
2	90MA + 10DD
3	75MA + 25DD
4	50MA + 50DD
5	25MA + 75DD
6	10MA + 90DD
7	0MA + 100DD

3.2.4 Conditions opératoires :

Les réacteurs sont maintenus dans des conditions mésophiles ($37\text{ °C} \pm 0.5\text{ °C}$) dans un bain marie chauffer et régulé par un thermostat et agité manuellement en le secouant une à deux fois par jour, le pH du milieu est maintenu à 7.



Figure 3.7 : Photo des réacteurs dans un bain marie chauffer et régulé à 37 °C .

3.2.5. Prétraitement thermique et acide des substrats :

3.2.5.1 Prétraitement thermique :

Une grande partie des réactions d'oxydo-réduction est catalysée par la température et/ou par la présence d'agent chimique (acide fort, base forte, oxydants). La température et

l'acidité combiné ayant un pouvoir oxydant élevé, cette approche a fait l'objet de plusieurs travaux. [45]

✓ **Matériel :**

- Autoclave.



Figure 3.8 : Autoclave.

✓ **Méthode :**

Autoclaver l'échantillon pendant 2 heures à 134 ° C. Il s'agit d'un prétraitement thermique

3.2.5.2 Prétraitement acide :

✓ **Matériel :**

- Pipette graduée
- Bécher.
- Acide H₂SO₄

✓ **Méthode :**

-Un prétraitement chimique consistant à ajouter 0,1 ml d'acide concentré à l'échantillon et à le placer dans une étuve à 105c° pendant 4 heures.

3.2.6. Méthodes d'analyses

3.2.6.1. Détermination de la matière sèche (MS) :✓ **Matériels utilisés :**

- Étuve réglée à 105°C.
- Capsule.
- Dessiccateur.
- Balance.

✓ **Méthode :**

La matière sèche est déterminée par dessiccation dans une étuve maintenue à 105 °C jusqu'à ce que le poids de l'échantillon à analyser devient constant [46]. La différence du poids correspond à la perte d'humidité et le résidu représente la teneur en matière sèche de l'échantillon.

Pour déterminer la matière sèche, une prise d'échantillon de masse quelconque, soit (M1), est versée dans une capsule de masse connue soit (M) préalablement nettoyée et séchée, ensuite l'ensemble est placé dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures jusqu'à l'obtention d'un poids constant. La capsule est pesée après refroidissement dans un dessiccateur.



Figure 3.9 : balance.



Figure 3.10 : Photo de l'étuve utilisée.

La matière sèche s'obtient selon la relation suivante : $MS(\%) = \frac{M_2}{M_1} \times 100$

Avec :

M_1 : masse de l'échantillon avant dessiccation.

M_2 : masse de l'échantillon après dessiccation.

3.2.6.2. Détermination de la teneur en matière organique (MO) :

✓ Matériels utilisés :

- Four à moufle.
- Capsule.
- Balance de précision.
- Dessiccateur.

✓ Méthode :

Lorsque l'échantillon, préalablement séché, est soumis à une incinération à 550°C, la matière organique se consume et la matière résiduelle constitue la matière minérale [46]

Pour déterminer la teneur en matière organique (MO), une masse quelconque de l'échantillon après dessiccation, soit (M_1), est introduite dans une capsule préalablement

nettoyée et séchée ayant une masse (M), l'ensemble est placé dans un four à moufle pour une calcination à 550 °C pendant 12-18 heures. Après refroidissement la capsule contenant la matière minérale est pesée encore une fois. La masse de la matière organique est obtenue par différence entre la masse de matière sèche et la masse de matière minérale.



Figure 3.11 : Photo du four à moufle.

Le calcul des MO, s'obtient selon la relation : $MO (\%) = \frac{(M_1 - M_2) \times 100}{M_1}$

Avec :

M_1 : masse de l'échantillon après dessiccation.

M_2 : masse de l'échantillon après calcination.

3.3. Paramètre suivis :

Le contrôle des digesteurs anaérobies est nécessaire pour assurer la réussite de l'opération. A cause de la complexité du processus de la digestion anaérobie due à la sensibilité des groupes micro-organismes à plusieurs facteurs, il est important de pouvoir détecter le déséquilibre de processus au début et donc l'action peut être prise à temps pour

empêcher l'échec du processus. Pour cela pendant la durée de la digestion, un suivi de deux groupes de paramètres a été effectué :

✓ **1-Paramètres du fonctionnement :**

Dans cette étude un seul paramètre qui renseigne sur le fonctionnement du réacteur, représenté par le volume du biogaz a été suivi.

Le deuxième paramètre qui est le pH a été mesuré au début et à la fin de digestion.

✓ **2- Paramètres d'épuration :**

C'est la demande chimique en oxygène (DCO) La demande chimique en oxygène est retenue mondialement comme critère d'évaluation et apparait dans toutes les études concernant les rejets et les déchets [47]. Ce paramètre a été mesuré aussi au début et à la fin de digestion

3.3.1 PH :

Le pH est un facteur facile à mesurer, le changement du pH peut être un indicateur, et la cause du déséquilibre du processus, puisque les micro-organismes peuvent fonctionner seulement dans une plage spécifique de pH.

✓ **Matériel :**

- PH-mètre.
- Bécher.

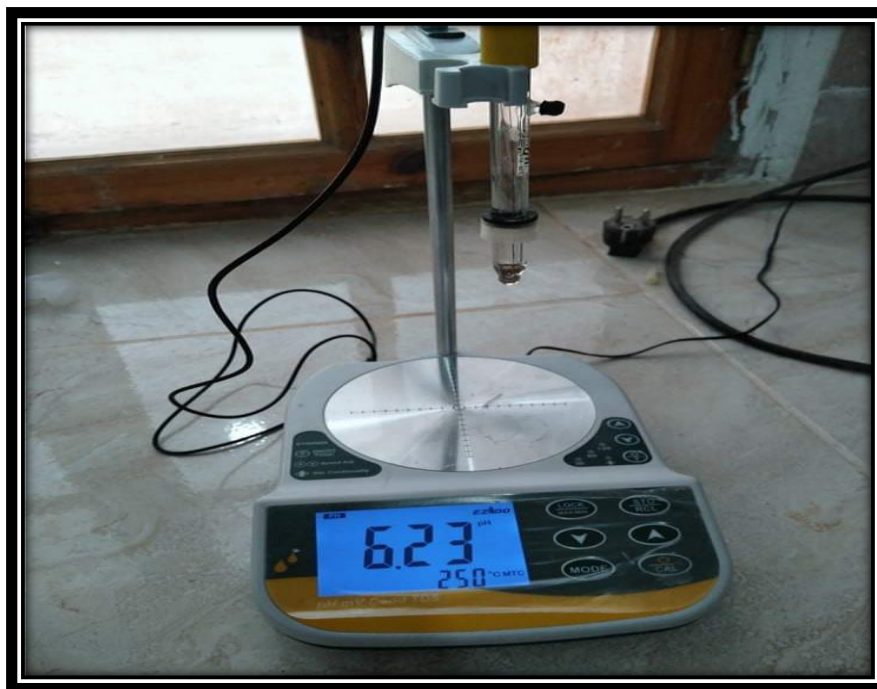


Figure 3.12 : Photo du PH mètre.**3.3.2 Volume de biogaz produit :**

La production du gaz est le but principal de la digestion anaérobie. Durant le déroulement du processus de digestion anaérobie le volume du biogaz produit est mesuré de façon régulière.

✓ Matériel :

- Éprouvette graduée.



- Bêcher.

Figure 3.13 : Dispositif de mesure du volume du biogaz produit.

✓ Méthode :

La production du biogaz est suivie quotidiennement. Le volume de biogaz est mesuré à l'aide d'un système hydraulique (déplacement du liquide), ou le gaz produit en sortie du digesteur, passe dans une éprouvette graduée plongée dans un liquide, ce qui va déplacer le niveau du liquide contenu dans l'éprouvette et indique ainsi le volume du gaz produit.

3.3.3 Détermination de la DCO :

C'est la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder chimiquement lors de la dégradation chimique d'une quantité de matière organique donnée par Greenberg et al. [48], cette mesure traduit leurs teneurs et le degré de la pollution. La DCO est l'unité de mesure de pollution carbonée la plus utilisée en modélisation des procédés biologiques car elle permet de faire des bilans de matière regroupant des produits organiques biodégradables et non biodégradables. La méthode détaillée sera affichée sous **Annexe n°1**

3.3.4 Détermination de la teneur en sucre :**➤ Méthode de Dubois (1956)**

La méthode de Dubois permet de mesurer le taux de sucre en utilisant le phénol et l'acide sulfurique concentré. En présence des réactifs, les sucres donnent une couleur jaune crème, dont l'intensité est proportionnelle à la concentration des sucres totaux. La Densité Optique (DO) est déterminée à 490nm. La méthode détaillée sera affichée sous **Annexe n°2**

3.3.5 Teneur en matière grasse :

Au cours des traitements industriels ou domestiques, les lipides contenus dans les substrats sont la cible de dégradations qui sont principalement le fait de réactions de lipolyse ou d'auto-oxydation. [13].

La variation des teneurs en lipides totaux peut être dû aux divers paramètres en particulier la pureté de l'échantillon après broyage le pourcentage en huile extraite est sous l'influence de la taille des particules du substrat soumises à la matrice de broyage est utilisée pour réduire la taille des particules, augmentant ainsi la surface de contact avec le solvant d'extraction [13]. La méthode détaillée sera affichée sous **Annexe n°3**

3.3.6 Inflammabilité du biogaz : Le test d'inflammabilité de biogaz, donne une idée sur le rendement énergétique de l'échantillon utilisé. Chaque fois, après la mesure de volume de biogaz, Ce dernier est sorti à l'aide d'une seringue et soumis à la flamme pour le test d'inflammabilité.



Figure 3.14: photo de Teste d'inflammabilité du biogaz produit.

CHAPITRE 04 : RESULTATS ET DISCCUSION.

4.1. Introduction :

Dans ce chapitre, les principaux résultats obtenus lors de la réalisation des expériences ont été présentés. Commençant par la caractérisation des substrats, en se basant sur les principaux paramètres comme la matière sèche, matière organique, taux des lipides, Passant à l'interprétation des résultats obtenus : le pH, la DCO et la teneur des sucres avant et après prétraitement des substrats MA, DD. Arrivant à l'interprétation des paramètres de fonctionnement des digesteurs comme le pH et la DCO, et le suivi de la production quotidien et accumulative en méthane toute au long de l'expérience.

Finalisant ce chapitre par la valorisation énergétique du biométhane produit en appliquant deux scénario.

Caractérisation du substrat :

4.2. Taux de la matière sèche et organique :

Les deux figures suivantes qui montrent le taux des deux matière organique et sèche représentant respectivement dans la **figure 4.1** et **figure 4.2** pour les substrats MA et DD.

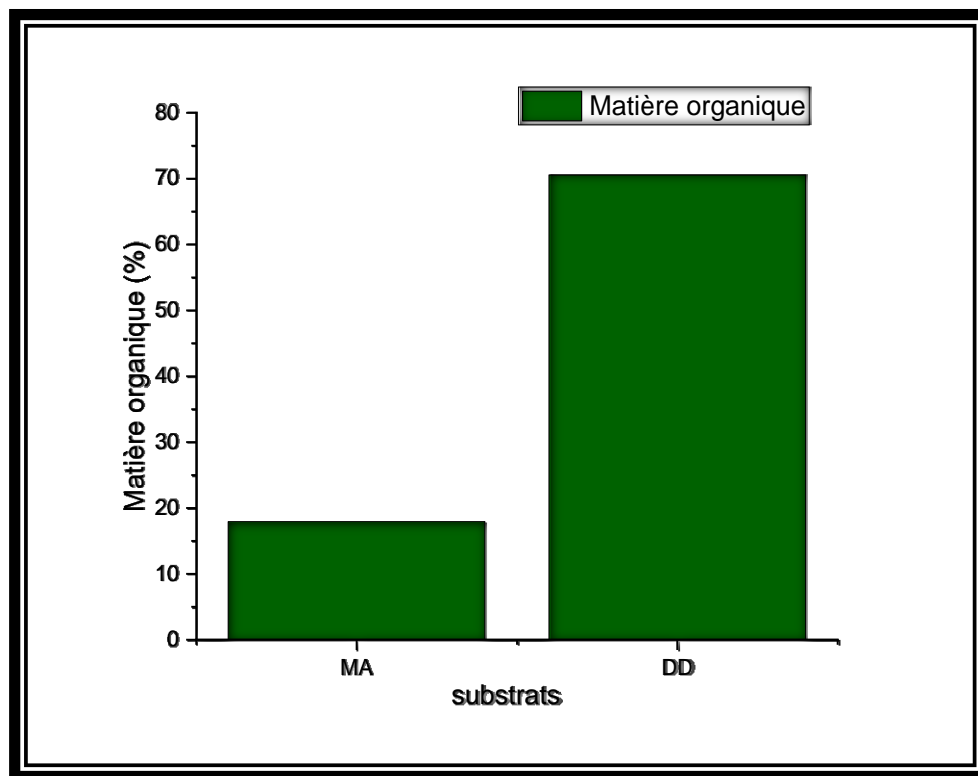


Figure 4.1 : Taux de la matière organique.

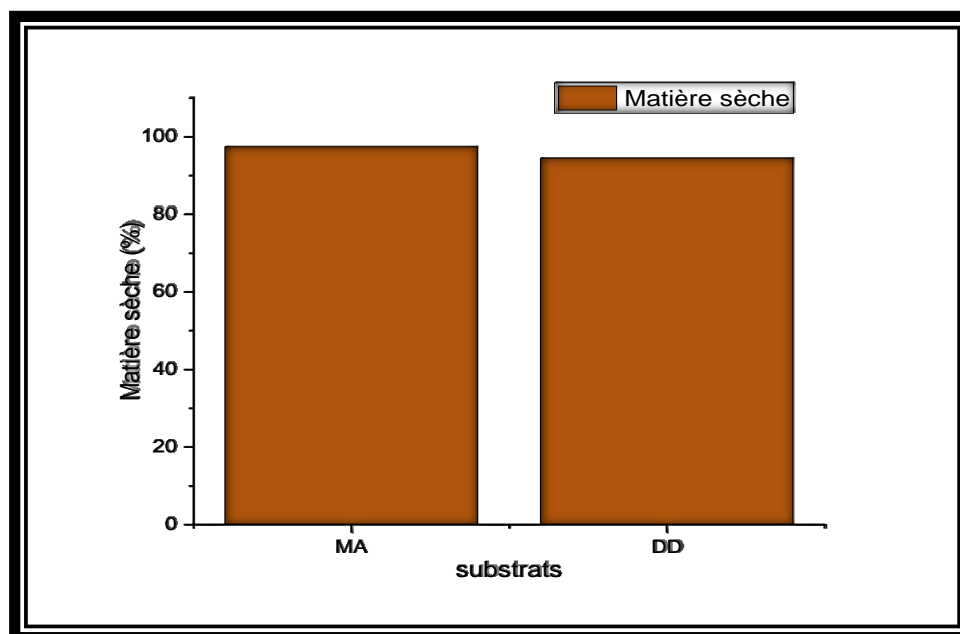


Figure 4.2 : Taux de la matière sèche.

La **figure 4.1** montre que Les MA sont pauvres en matière organique (17%) en comparaison avec les DD (70 %). Cette différence est attribuée à la richesse des macro-algues en sels minéraux. les travaux de compagnie des sens [49][50][51] montrent que les MA sont riche en sels minéraux.

Ce type des MA nécessite une étude approfondi afin de déterminer la nature de ces sels minéraux

4.3. Quantité de substrat utilisé :

Le **tableau 4.1** donne le détail des proportions de Codigestion en pourcentages et en gramme en termes de MO et poids de substrat brut.

Tableau 4.1 : proportions de Codigestion en pourcentages et en gramme en termes de MO et poids de substrat brut.

Percentage %	Poids de MO de substrat en g	Poids de substrat brut en g	Poids de MO de substrat en g	Poids de substrat brut en g
100	2	15.17	2	2.76
90	1.8	13.653	1.8	2.484
75	1.5	11.37	1.5	2.07
50	1	7.585	1	1.38
25	0.5	3.79	0.5	0.69
10	0.2	1.517	0.2	0.276

Les proportions de chaque substrat brut afin d'obtenir un poids final de 2 g MO sont bien déterminé le tableau 4.1. Il bien évident que pour préparer 2 g de MO à partir des MA nécessite 15.17g de substrat brute la chose qui confirme la richesse des MA par les sels minéraux. Il est important de signaler que chaque réacteur contient 2 g MO de cosubstrat et 4g de l'inoculum qui correspond à « 105ml » l'ensemble représente un rapport Inoculum/substrat de 2/1.

4.4. Évolution du pH durant le prétraitement :

La digestion anaérobie est fortement influencée par les variations de pH. En effet, dans tous les travaux publiés, le procédé se déroule de manière optimale au voisinage de la neutralité (pH = 7, les bactéries neutrophiles) [52].

Ce qui fait que le pH devient un indicateur important dans la stabilisation et le bon déroulement de processus de la digestion anaérobie. Les résultats du pH pour les 02 groupes des échantillons :

- Sans prétraitement « thermique et acide ».
- Avec prétraitement « thermique et acide ».

Sont illustré comme montre la **figure 4.3** si dessous :

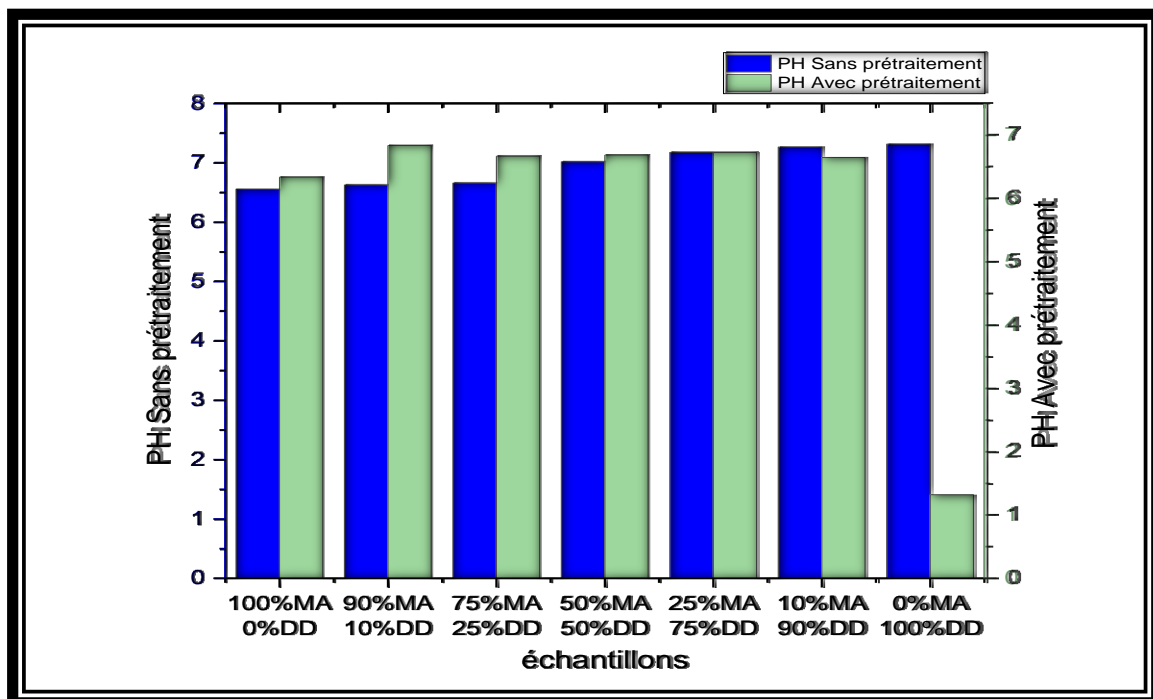


Figure 4.3 : Histogramme présente la variation de pH.

Les valeurs de pH sont se varient entre 6,5 à 7,4 pour tous les substrats contenant un pourcentage en MA quel que soit le rapport. Le substrat composé de DD uniquement est influencé directement par les acides du prétraitement. **Le pH après prétraitement acide est devenu 1,32.** Cela montre l'effet important des MA riche en sels minéraux qui influe directement sur le pH des échantillons quel que soit la teneur en ces MA.

- Les deux figures suivantes représentent le PH au début et la fin de digestion pour les substrats traité et non traité.

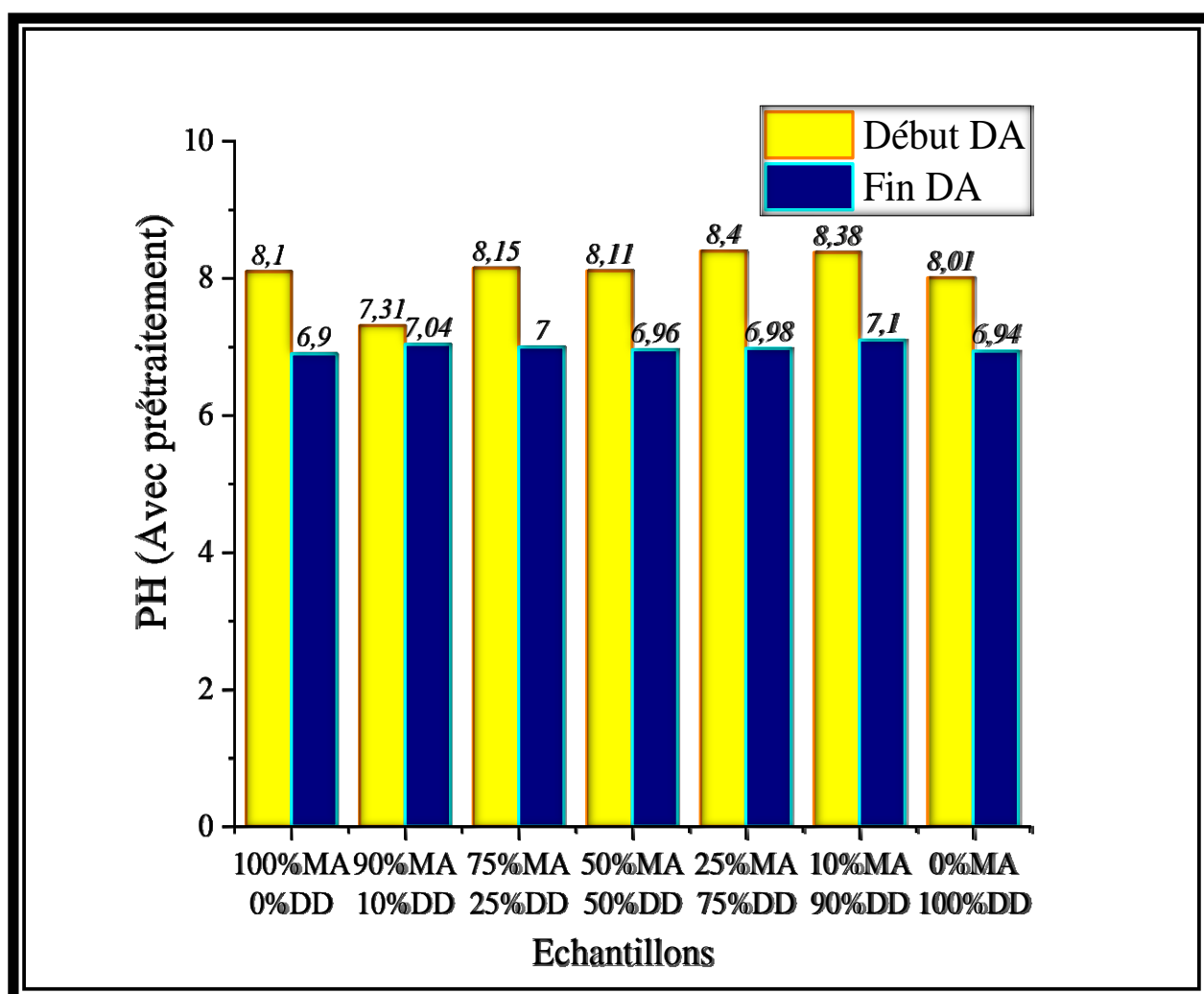


Figure 4.4 : Histogramme présente la variation de pH (Substrat traité).

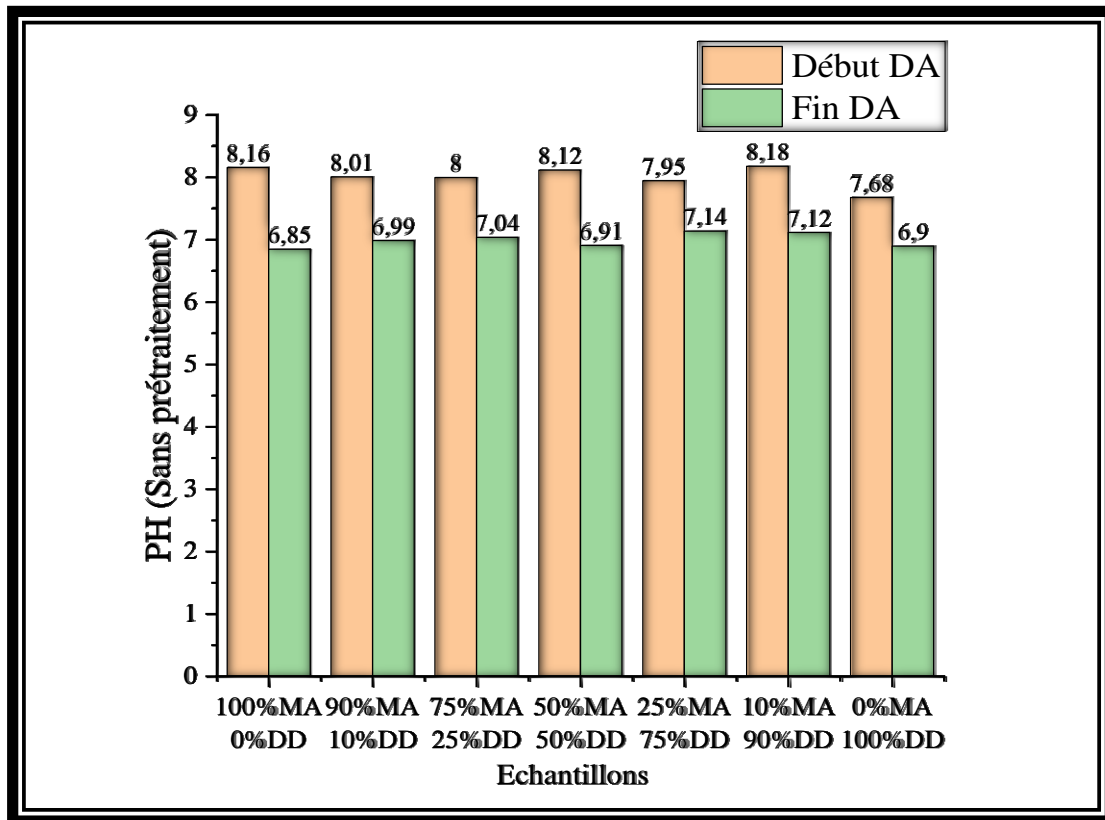


Figure 4.5 : Histogramme présente la variation de pH (Substrat non traité).

Les figures 4.4 et 4.5 montre que la réaction se fait à des conditions acceptables pour la DA légèrement alcalin entre 7.31 et 8.4 au début de digestion à cause de la quantité suffisante de l'inoculum qui assure un pouvoir tampon élevé su milieu réactionnel.

Et à la fin de digestion, le pH est diminué pour devenir entre 6.9 et 7.15 qui est considérer comme un pH optimal pour les archaeas méthanogènes.

4.5. La teneur en sucre :

L'absorbance qui détermine « les valeurs en sucres totaux de témoin, de l'échantillon sans prétraitement et avec prétraitement » sont représentés en **annexe N°2** en utilisant la courbe d'étalonnage qui permet de déterminer la concentration de la solution à partir de la mesure de l'absorbance de solutions de concentrations.

Les deux figures suivantes montrent la teneur en sucre pour le substrat, cosubstrat avec et sans prétraitement.

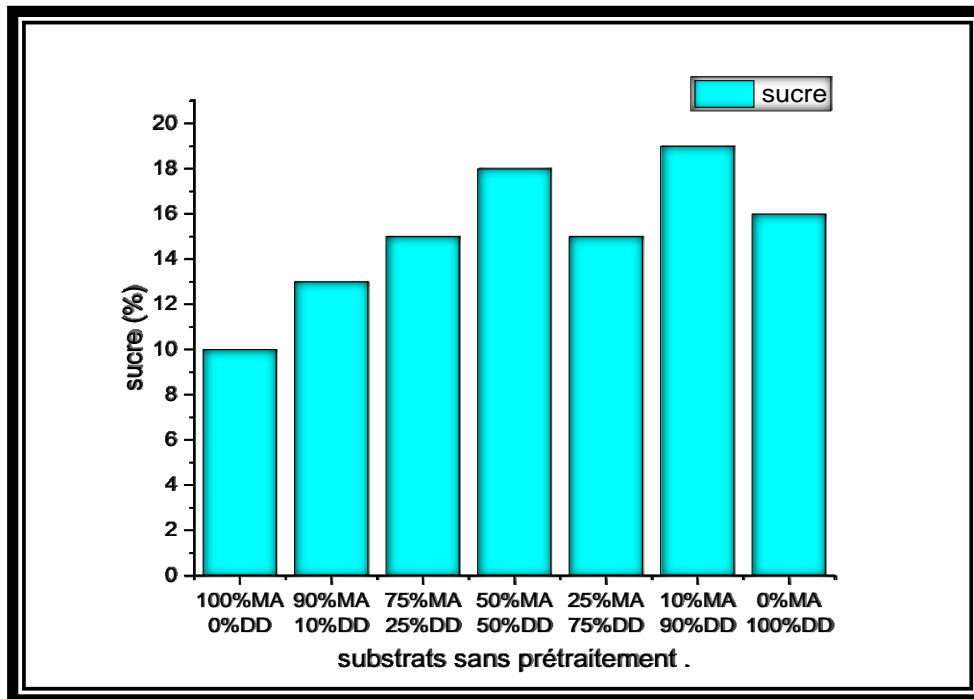


Figure 4.6: Teneur en sucre pour les substrats non traités.

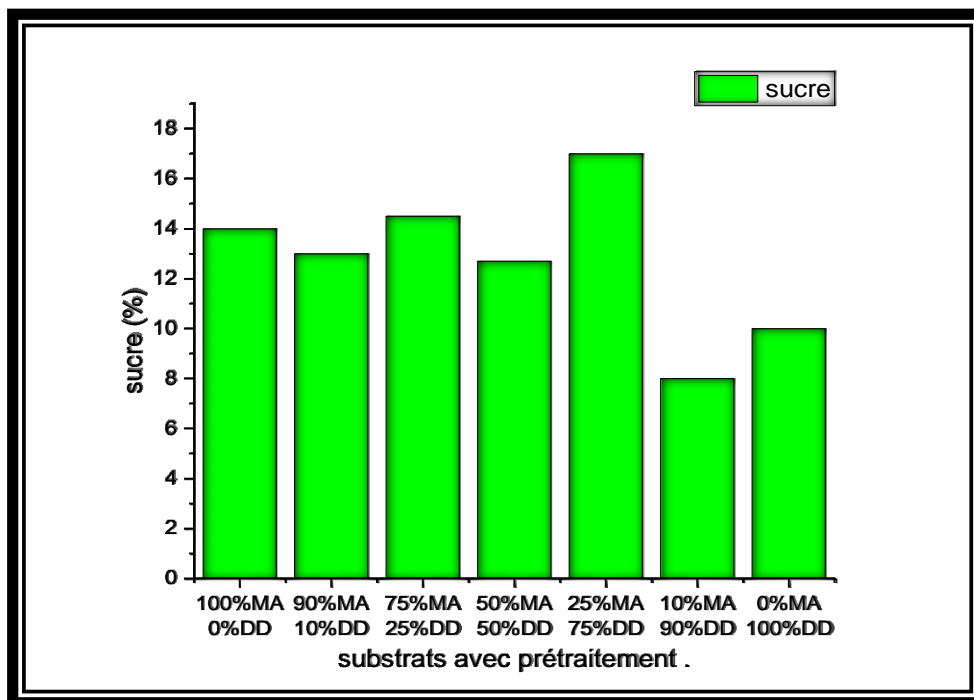


Figure 4.7: Teneur en sucre pour les substrats prétraités.

La teneur en sucre est influencée par le prétraitement ainsi que par le taux de rapport (cosubstrat) comme illustre les 2 figures ci-dessus (figure 4.6 et 4.7).

La teneur en sucre des DD sans prétraitement est élevée que celle du MA. Après prétraitement la teneur en sucre des MA est devenue supérieure à celles des DD

Pour les résultats on trouve que les MA sont des rendements supérieurs que DD car ce dernier constitue des sucres complexes et MA sucre simple donc le taux de dégradation influe par la nature de sucre [53].

4.6 La teneur en matière grasse :

Pour déterminer la teneur en lipide (matière grasse), la méthode soxhlet est utilisé pour cette fin comme décrit dans la partie matérielle et méthodes, et les résultats représentent comme illustre le **tableau 4.2**

Substrats	Percentages %
Macro-algues	4
Déchets des dromadaires	3

Tableau 4.2 : taux des lipides de substrat.

Le **tableau 4.2** montre la teneur en lipide pour les deux substrats utilisés dans la présente étude. Selon l'en dessus, les teneurs en lipide pour les deux substrats sont très proches avec une légère différence pour les MA qui contiennent 4 % en comparaison avec 3 % pour les DA. Cette différence est influencée par la richesse des MA en chlorophylle par rapport au DD.

4.7 La DCO avant et après prétraitement :

La demande chimique en oxygène permet d'exprimer le degré de pollution du substrat, cette pollution englobe la charge en matière organique et aussi la charge en matière minérale. Elle permet également d'évaluer la teneur du milieu en matière biodégradable.[48],

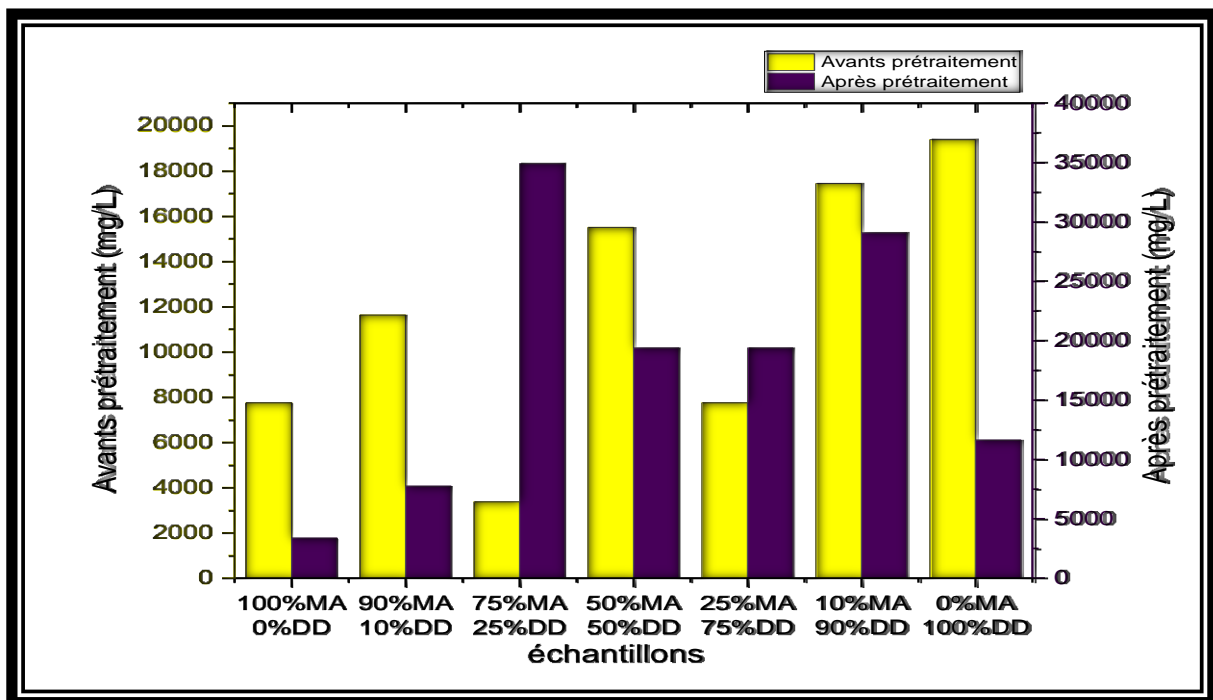


Figure 4.8 : Les valeurs de la DCO des cosubstrats avant et après prétraitement.

La **figure 4.8** montre les valeurs de la DCO des cosubstrats avant et après prétraitement. Selon cette figure, les valeurs de la DCO avant prétraitement sont généralement supérieures à celles de la DCO après prétraitement dans 70% des réacteurs. Ces résultats montrent un effet inhibiteur du prétraitement sur ce type de substrat qui peut être provoqué par la dégradation de la matière facilement biodégradable contenue dans le substrat. Alors que le prétraitement est utilisé afin d'augmenter la teneur en matière biodégradable dans le milieu. C'est pour cette raison, les conditions du prétraitement de ce type de substrat nécessitent une optimisation. La forte diminution en DCO est enregistrée dans les réacteurs contenant 100 % MA, 90 % MA+10 % DD et 100 % DD avec des taux de 67%. Un taux de dégradation inférieur à 40% est enregistré pour les réacteurs contenant 50 % MA + 50 % DD et 10 % MA + 90% DD. Les deux réacteurs qui restent (75 % MA+25 % DD et 25%MA+ 75% DD) les valeurs de la DCO avant prétraitement sont inférieures à celles après prétraitement ce qui montre un effet positif du prétraitement sur ces rapports de cosubstrat.

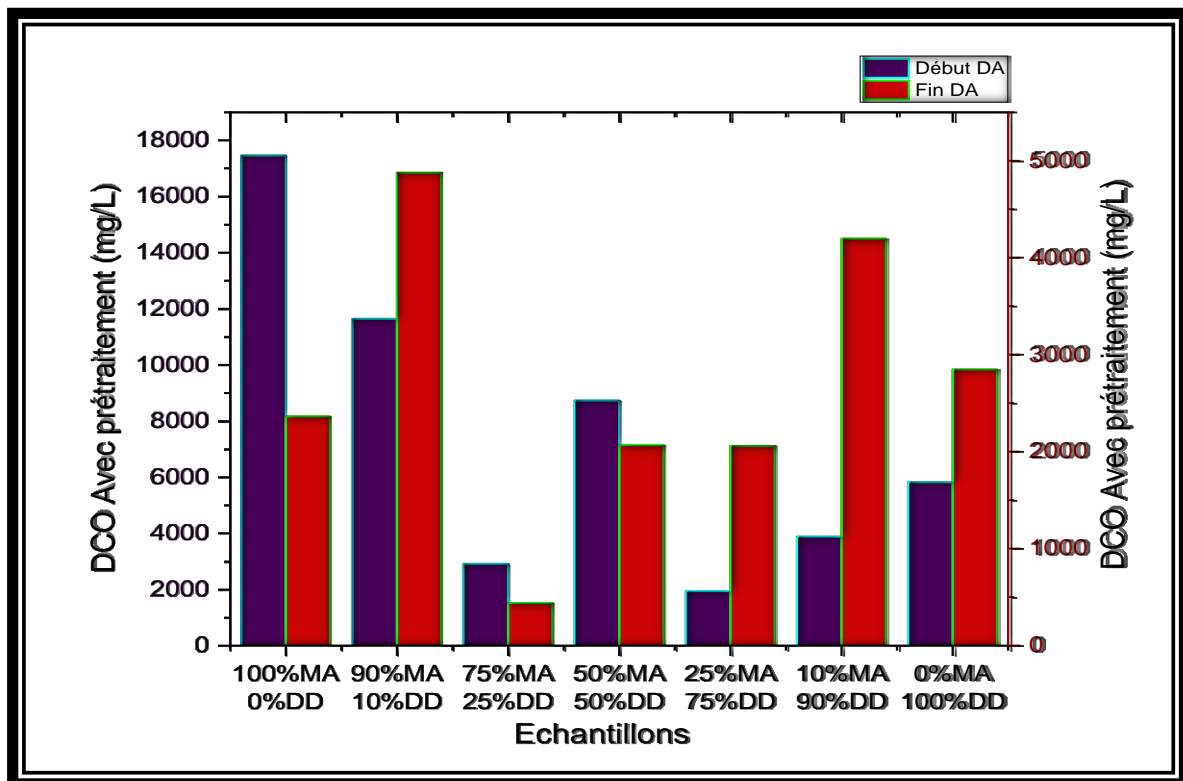


Figure 4.9 : Les valeurs de la DCO au début et à la fin de digestion (substrat traité).

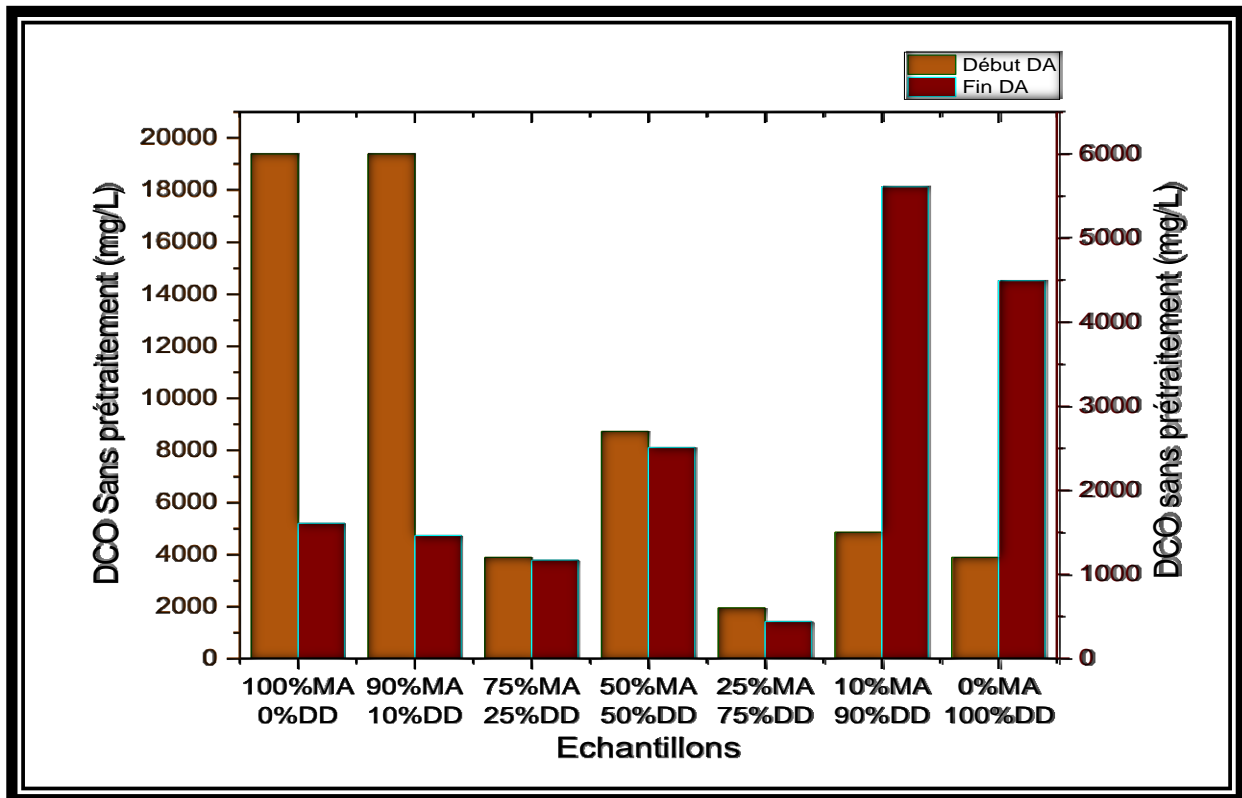


Figure 4.10 : Les valeurs de la DCO au début et à la fin de digestion (substrat non traité).

D'après **figure 4.9 et 4.10** on observe que les valeurs au début de digestion est supérieur de la fin de digestion qui signifie le bon déroulement de la réaction.

Sauf pour quelque substrats 03 on observe l'inverse au niveau de résultats à cause de la dilution différent « au début*25 et la fin*50 » ce dernier influe sur les résultats de DCO

4.8 Production du biométhane :

Les deux figures suivantes montrent la variation du CH₄ quotidien pour substrats sans et avec traitement

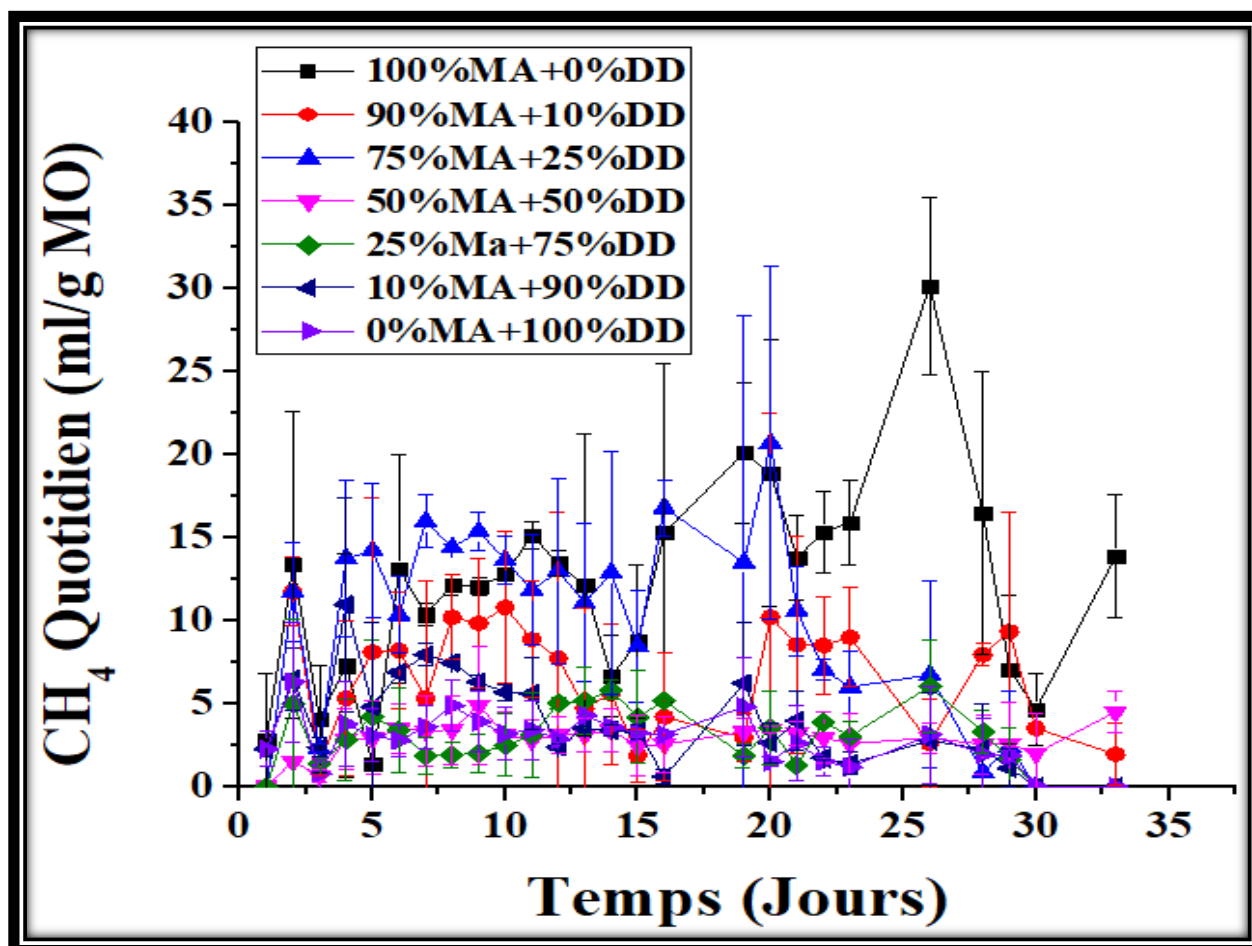


Figure 4.11 : CH₄ quotidien pour les substrats non traités.

La figure 4.11 montre les variations quotidiennes de rendement en méthane pour les cosubstrats non traités. L'allure générale des courbes montre que les deux réacteurs contenant les proportions de (75%MA+25%DD et 100%MA) sont caractérisés par un rendement élevé en méthane avec des valeurs qui comprise entre 10 et 20 ml de CH₄/g MO/jour pendant les 20 premiers jours de l'expérience. Une production intermédiaire est enregistrée pour les réacteurs contenant (90% MA+10%DD et 10 %MA+ 90 %DD) avec un rendement entre 5 et 10 ml de CH₄/g MO/ jour durant les jours de l'expérience. Les faibles rendements en méthane sont enregistrés pour les trois réacteurs qui restent (50% MA+50%DD, 25% MA+75%DD et 100 %DD) avec des valeurs inférieures à 5 ml de CH₄/g MO/ jour.

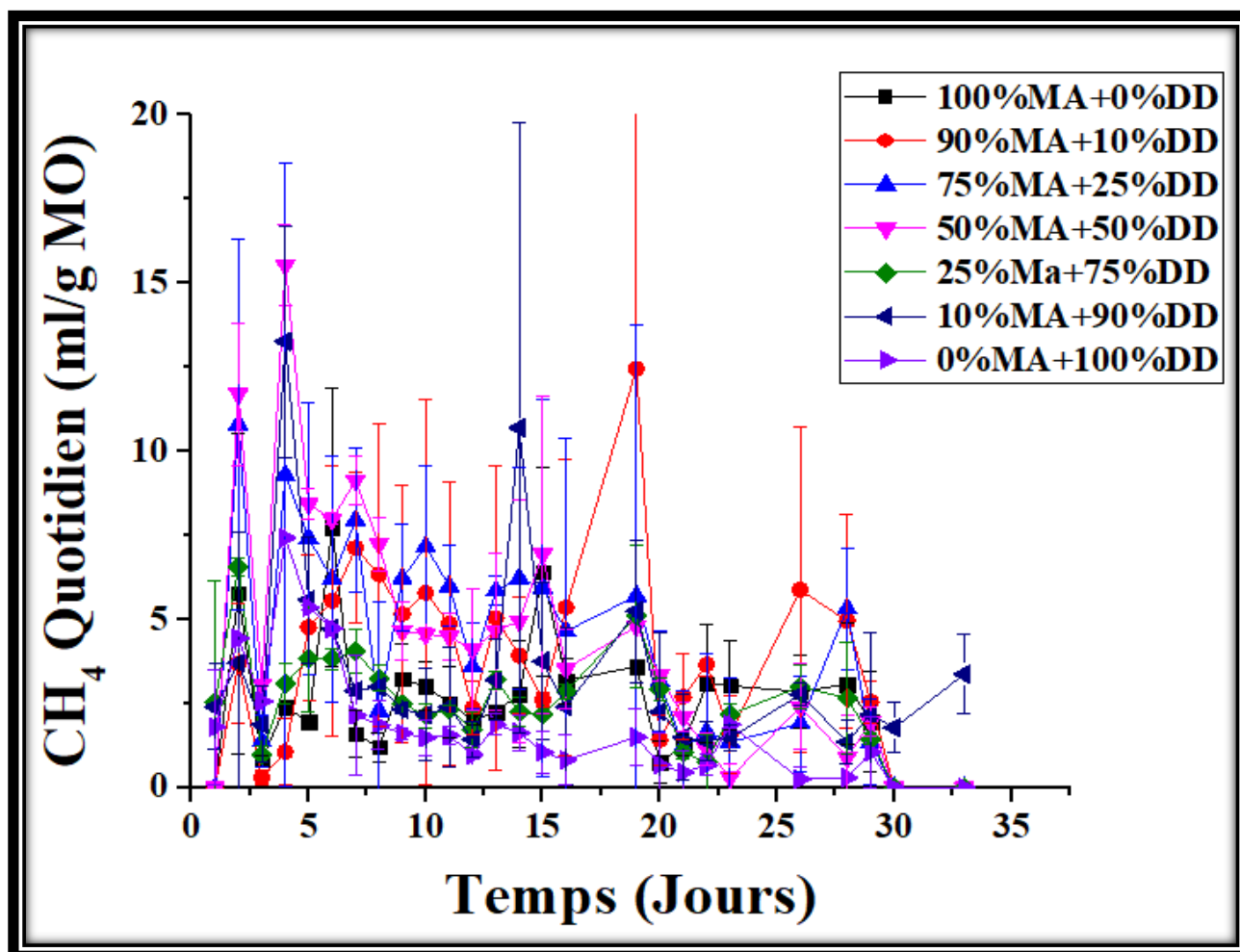


Figure 4.12 : CH₄ quotidien pour substrats prétraité.

La figure 4.12 montre les variations quotidiennes de rendement en méthane pour les cosubstrats prétraités. L'allure générale des courbes montre un faible rendement en CH₄ (inférieur à 10 ml de CH₄/g MO/jour) en comparaison avec les substrats non traité. Les meilleurs rendements en CH₄ durant les 15 premiers jours avec des valeurs qui dépassent les 5 ml de CH₄/g MO/jour sont enregistrés pour les trois réacteurs contenant les proportions de (50% MA+50%DD, 75%MA+25%DD et 90% MA+10%DD). Les faibles rendements en méthane qui ne dépassent pas les 5 ml de CH₄/g MO/jour sont enregistrés pour les quatre réacteurs qui restent (100%MA, 25% MA+75%DD, 10 %MA+ 90 %DD et 100 %DD). Ces résultats confirment l'influence négative du prétraitement sur les cosubstrats.

- Les deux figures suivantes montrent la variation du CH_4 accumulative pour substrats sans et avec traitement.

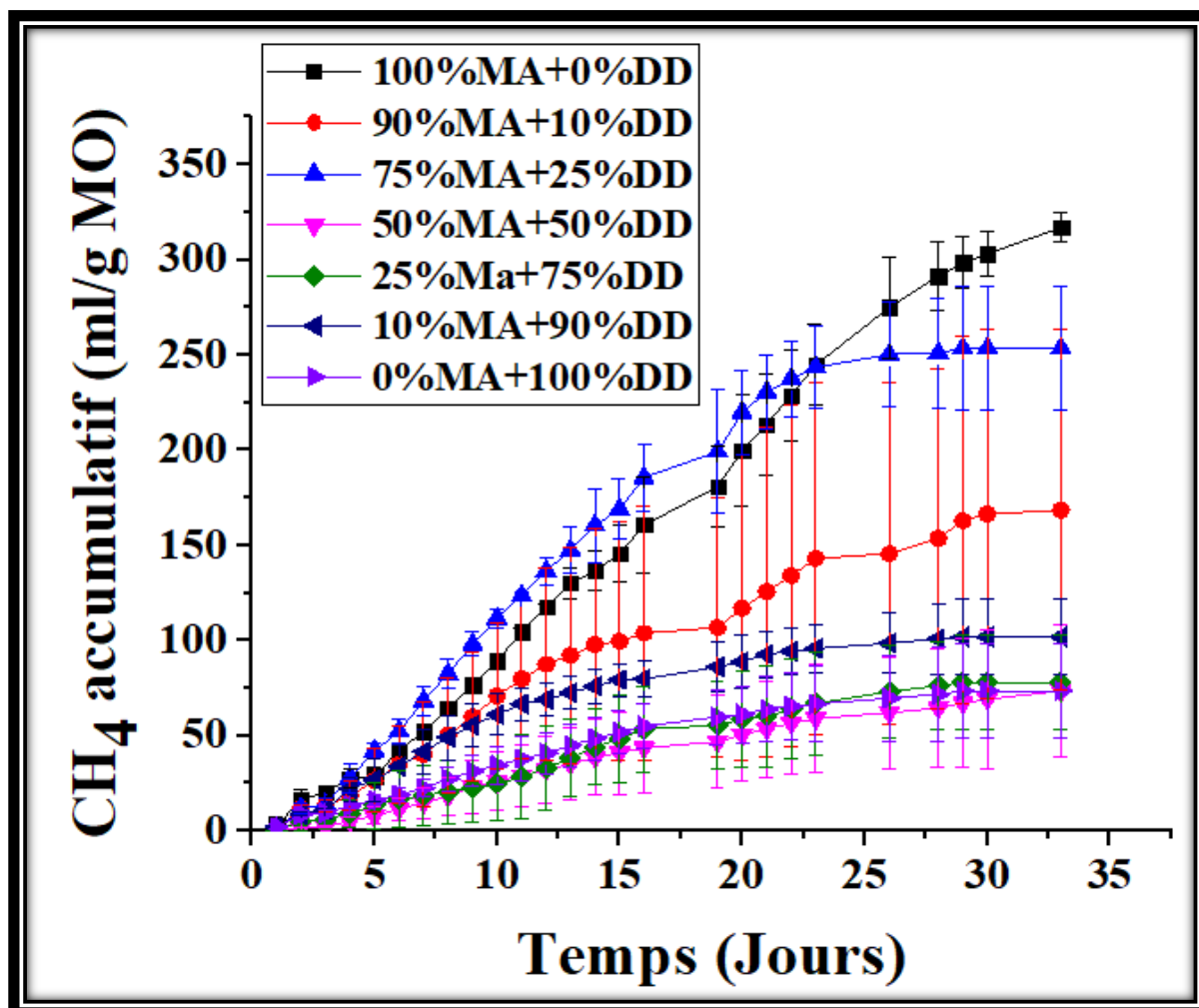


Figure 4.13 : CH_4 Accumulative pour substrats non traité.

La figure 4.13 montre le rendement accumulatif en CH_4 pour les substrats non traités. L'allure générale de la courbe montre une bonne cinétique de la DA avec une production continue pour les deux réacteurs contenant les proportions de (100%MA et 75%MA+25%DD) avec un rendement final estimé de 300 et 250 ml de CH_4 /g MO respectivement. Un rendement moyen enregistré pour le réacteur contenant (90% MA+10%DD) avec un taux de 150 ml de CH_4 /g MO un rendement plus moins que les autres qui sont cité si dessus est enregistré pour le cosubstrat (10 %MA+ 90 %DD) avec un taux de 75 ml de CH_4 /g MO. Les faibles rendements sont enregistrés pour les réacteurs qui restent avec des rendements inférieurs à 50ml pour (0%MA+100%DD, 25%MA+75%DD et 50%MA+50%DD) respectivement.

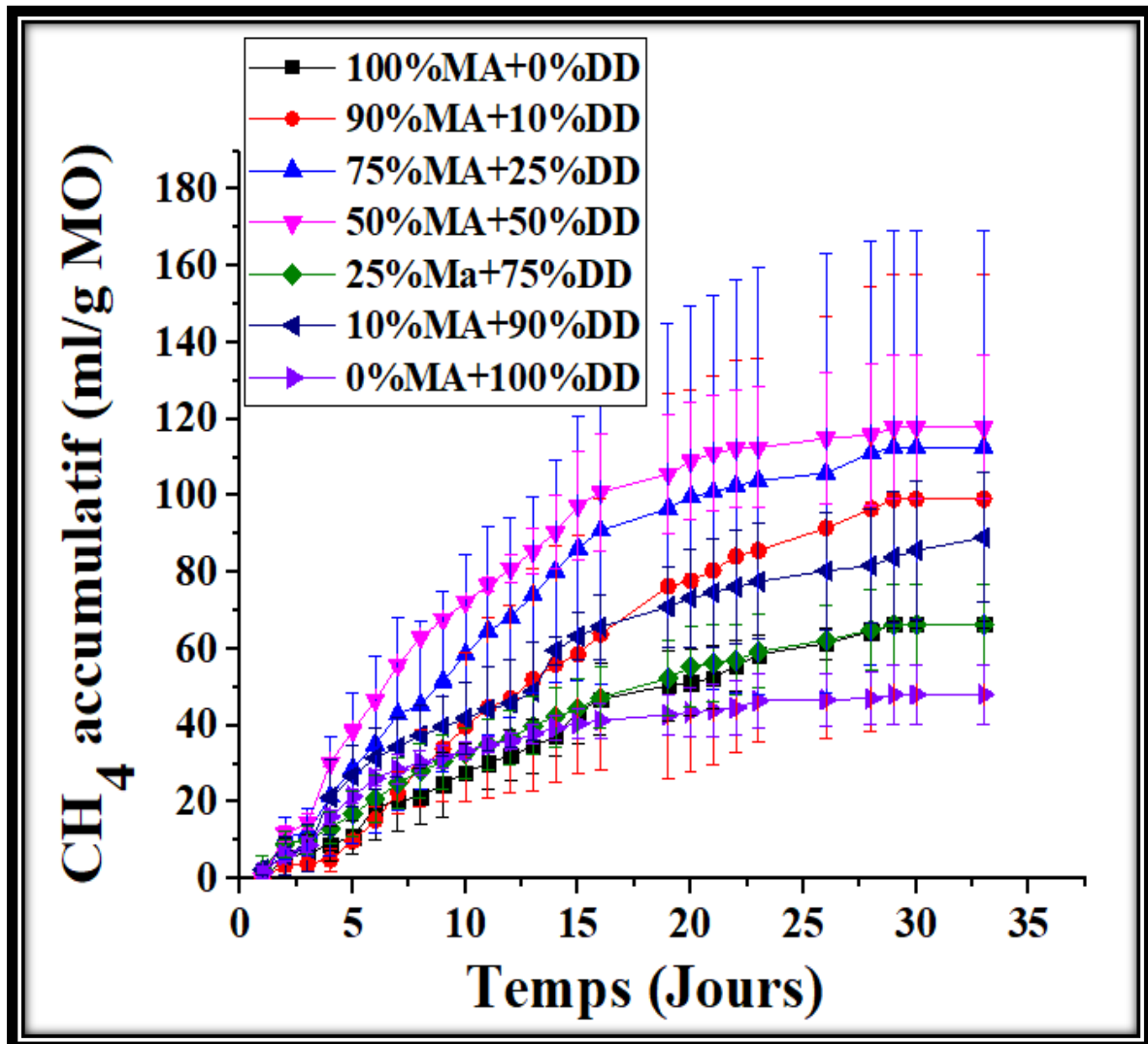


Figure 4.14 : CH₄ Accumulative pour substrats prétraité.

La figure 4.14 montre le rendement accumulatif en CH₄ pour les substrats non traités. L'allure générale des courbes montre un faible rendement en CH₄ (inférieur à 120 ml) en comparaison avec les substrats non traité. Les meilleurs rendements en CH₄ avec des valeurs qui dépassent les 90 ml de CH₄/g MO sont enregistrés pour les deux réacteurs contenant les proportions de (50% MA+50%DD, 75%MA+25%DD). Et avec rendement moins faible avec des valeurs entre 60 et 88 ml pour les deux proportion (90%MA+10%DD et 10%MA+90DD). Les faibles rendements sont enregistrés pour les réacteurs qui restent avec des rendements inférieurs à 60ml.

4.9 Energie :

D'après les deux figures suivantes on montre la variation de l'énergie accumulative sans et avec prétraitement représentée par les figures 4.11 et 4.12 respectivement.

L'énergie calculée par la formule suivante : $E = PCI \times V_{CH_4} = 9.42 \times V_{CH_4}$

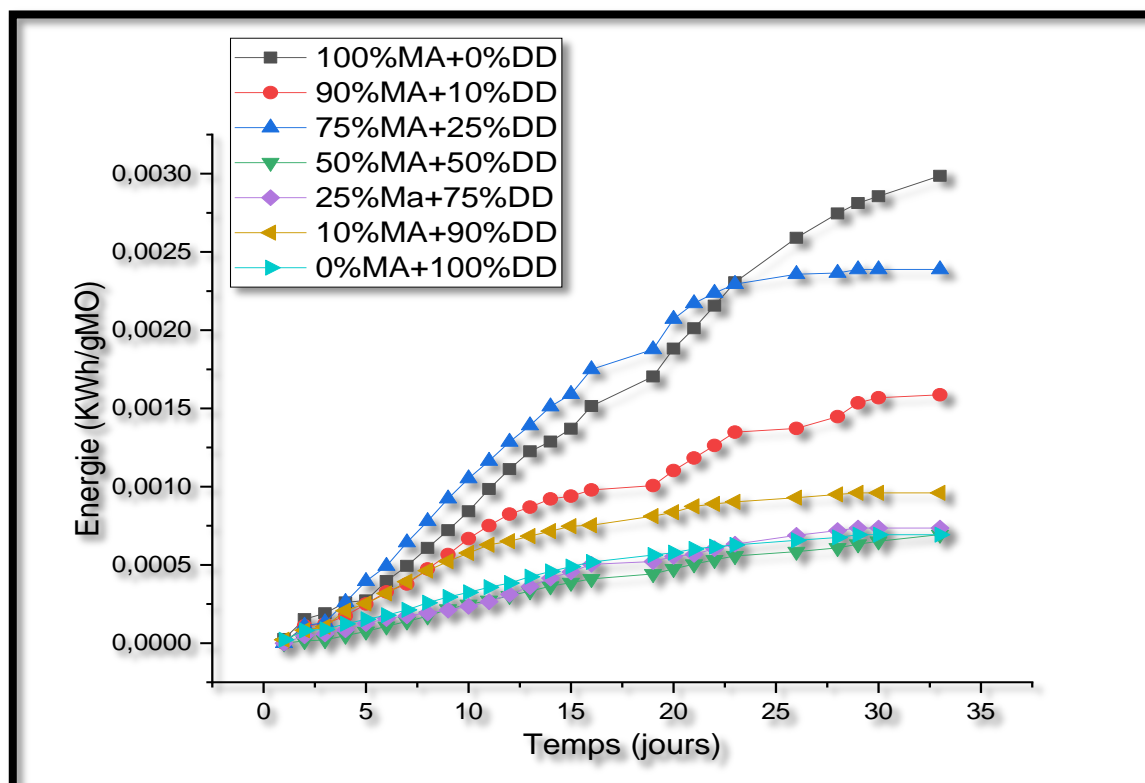


Figure 4.15 : Energie Accumulative pour substrats non traité.

La **figure 4.15** montre le rendement accumulatif en énergie pour les substrats non traités. L'allure générale de la courbe montre une bonne cinétique de la DA avec une production continue pour les deux réacteurs contenant les proportions de (75%MA+25%DD et 100%MA) avec un rendement final estimé de 36.03 Wh/g MO et 35.51 Wh/g MO d'énergie respectivement. Un rendement moyen avec une faible cinétique à la fin de digestion est enregistré pour les réacteurs contenant (90% MA+10%DD et 10 %MA+ 90 %DD). Les rendements totaux d'énergie pour ces deux réacteurs sont de 21.76 et 16.19 Wh/g MO respectivement. Les faibles rendements sont enregistrés pour les réacteurs qui restent avec des rendements inférieurs à 11Wh/g MO pour (0%MA+100%DD, 25%MA+75%DD et 50%MA+50%DD) respectivement.

Voici les résultats obtenus sont affiché sur le tableau 4.3 suivants :

100%MA+0%DD	0,002986658
90%MA+10%DD	0,00158694
75%MA+25%DD	0,002388677
50%MA+50%DD	0,000693924
25%Ma+75%DD	0,000735325
10%MA+90%DD	0,000960699
0%MA+100%DD	0,000692935

Tableau 4.3 : Energie total à la cour du temps de production.

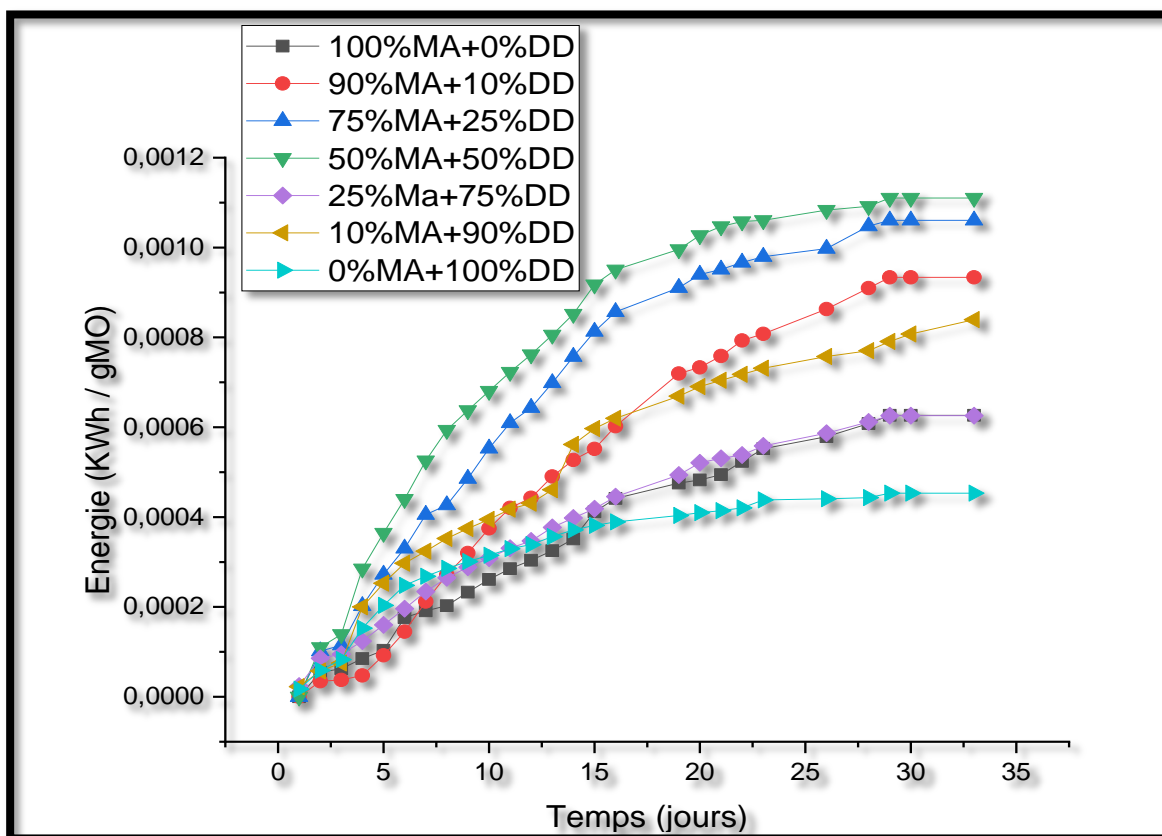


Figure 4.16 : Energie Accumulative pour substrats prétraité.

La **figure 4.16** montre l'énergie accumulée pour les cosubstrats prétraités. L'allure générale des courbes montre un faible rendement (inférieur à 12Wh/g MO d'énergie) en comparaison avec les substrats non traité. Les meilleurs rendements d'énergie durant les 25 premiers jours avec des valeurs qui égale ou dépassent les 10Wh/g MO sont enregistrés pour les deux réacteurs contenant les proportions de (50% MA+50%DD, 75%MA+25%DD). Les faibles rendements d'énergie qui ne dépassent pas les 10Wh/g MO sont enregistrés pour les cinq réacteurs qui restent (100%MA, 90%MA+10%DD, 25% MA+75%DD, 10 %MA+ 90 %DD et 100 %DD). Ces résultats confirment l'influence négative du prétraitement sur les cosubstrats.

✚ Voici les résultats obtenus sont affiché sur le tableau 4.4 suivants :

100%MA+0%DD	0,000626468
90%MA+10%DD	0,000933852
75%MA+25%DD	0,001060457
50%MA+50%DD	0,001110194
25%Ma+75%DD	0,000625676
10%MA+90%DD	0,000839463
0%MA+100%DD	0,00045329

Tableau 4.4 : Energie total à la cour du temps de production.**4.10. Valorisation énergétique :**

Le biogaz produit des digesteurs anaérobiques contient du méthane (CH₄) qui a un pouvoir calorifique important et peut se considérer comme un combustible très intéressant pouvant se substituer au gaz naturel du fait qu'il est valorisable dans plusieurs applications énergétiques tels que :

- ✓ Production de chaleur pour le chauffage du digesteur uniquement.
- ✓ Production de chaleur pour le chauffage des locaux.
- ✓ Cogénération « production combinée d'électricité et de chaleur » par moteur à gaz, turbine à gaz, moteur dual fuel « biogaz + fioul ».
- ✓ Moto-compresseurs pour l'aération des bassins.
- ✓ Pile à combustible.
- ✓ Gaz carburant.
- ✓ Gaz naturel injecté sur réseau public.

4.11. Présentation des voies envisageables :➤ **Scénario 1 : Utilisation pour la cuisson ou chauffage.**

La valeur optimale est pour substrat « 100%MA » prétraité seulement physiquement avec énergie qui égale à $E=0,002986658\text{KWh/g MO (33}_{\text{Jours}})$

D'après le site « PanGas AG » [54]. Les bouteilles du méthane par considération 4 types : 5.5kg, 18kg, 76kg, 1000kg. En prend comme exemple de remplir la bouteille type 18Kg.

✚ Avec les relations suivantes [57] :

$$\text{Volume} = \frac{\text{Masse}}{\text{Densité}} \quad \text{Et} \quad \boxed{D_{\text{CH}_4} = 0.657 \text{ kg/m}^3}$$

Pour le substrat « 100%MA+0%DD » le volume total produit est de 317,055 ml converti en m³ d'où la valeur égale $V = 317,055 \times 10^{-6} \text{ m}^3 = 0,000317055 \text{ m}^3$

La relation [*] : pour une masse de 18kg on trouve le volume :

$$\text{Volume} = \frac{\text{Masse}}{\text{Densité}} = \frac{18}{0.657} = 27.3972 \text{ m}^3.$$

✚ Donc on a besoin de 29.3972 m³ pour remplir une bouteille de 18kg.

$$1\text{g Mo} \rightarrow 317,055 \times 10^{-6} \text{ m}^3.$$

$$X \rightarrow 27.3972 \text{ m}^3$$

X : Masse de matière organique nécessaire pour remplir la bouteille.

$$X = \frac{27.3972}{317,055 \times 10^{-6}} = 86411,50589 \text{ g MO} = 86,41150589 \text{ Kg MO.}$$

substrats.

« 100%MA, 0%DD »

100%MA contient 2g MO nécessite un poids de 15.17g MA broyé.

D'où : 1g MO nécessite 7.585g MA Broyé.

✚ Besoin en substrat :

$$1 \text{ g MO} \rightarrow 7.585 \text{ g}$$

$$86411,50589 \text{ g MO} \rightarrow Y$$

Y : Masse nécessaire de substrat broyé.

$$Y = 86411.50589 \times 7.585 = 655431,2722 \text{ g MA broyé} = 655.431 \text{ kg MA broyé.}$$

✚ Pour l'eau et le facteur de dégradation Inoculum

$$1 \text{ g MO} \rightarrow 20 \text{ ml d'eau} \rightarrow 52.5 \text{ ml d'inoculum}$$

$$86.41150589 \text{ Kg MO} \rightarrow L \rightarrow H$$

L : Quantité de l'eau.

H : Quantité de l'inoculum.

$$L = 86.41150589 * 20 = 1728,230118 \text{ litres.} = 1.73 \text{ m}^3$$

$$H = 86.41150589 * 52.5 = 4536,604059 \text{ litres} = 4.54 \text{ m}^3$$

✚ Résultats finals :

Pour assurer un bon remplissage d'une bouteille de méthane type 18kg on a besoin d'un Cosubstrat constitué de :

[655.43 Kg de MA] Broyés avec une quantité d'eau 1.73 m^3 et 4.54 m^3 d'inoculum.

➤ **Scénario 02 : La consommation de gaz pour l'eau chaude sanitaire.**

D'après une étude française « selectra.info » une personne consomme en moyenne autour de 1400 KWh par an. [55]. Donc pour une consommation journalière :

$$C_J = \frac{1400}{365.25} = 3.834 \text{ KWh} \quad C_J : \text{Consommation journalière.}$$

Notre résultat de production est au courant de 33 jours donc la consommation d'une personne est :

$$C_{33} = C_J \times 33 = 126,522 \text{ KWh.}$$

C_{33} : Consommation d'une personne au cours de 33 jours.

D'après le tableau 4.3 l'énergie optimal produite par le cosubstrat « 100%MA+0%DD » :

$$E = 0,002986658 \text{ KWh/g MO}$$

Par la relation suivante :

$$1 \text{ g MO} \rightarrow 0,002986658 \text{ KWh}$$

$$X \rightarrow 126.522 \text{ KWh.}$$

X : quantité de la matière organique nécessaire.

$$X = \frac{126.522}{0,002986658} = 42362,39829 \text{ g MO} = 42.36239829 \text{ Kg MO}$$

substrats.

«100%MA, 0%DD »

100%MA contient 2g MO avec un poids de 15.17g.

D'où : 1g MO nécessite 7.585g MA Broyé.

✚ **Besoin en substrat :**

$$1 \text{ g MO} \rightarrow 7.585 \text{ g}$$

$$42362,39829 \text{ g MO} \rightarrow W$$

W : Masse nécessaire du substrat broyé.

$$W = 42362,39829 \text{ g} \times 7.585 = 321318,7911 \text{ g MA broyé} = 321,3187911 \text{ kg MA broyé.}$$

✚ **Pour l'eau et le facteur de dégradation Inoculum**

$$1 \text{ g MO} \rightarrow 20 \text{ ml d'eau} \rightarrow 52.5 \text{ ml d'inoculum}$$

$42362,39829g MO \rightarrow L \rightarrow H$

L : Quantité de l'eau.

H : Quantité de l'inoculum.

$L = 42362.39829 * 20 = 847,2479659 \text{ litres} = 0.848m^3$

$H = 2224,02591 \text{ litres} = 2.23m^3$

➤ Résultats :

Pour assurer le chauffage de la personne pendant un taux de 33 jours il faut assurer :

[321.32Kg MA] Broyés avec une quantité $0.848 m^3$ d'eau et $2.23 m^3$ d'inoculum.

Conclusion :

✚ D'après les deux scénarios si dessus la meilleure utilisation c'est pour la chauffe bain car il est nécessité un moins de besoin par rapport le scénario 1

Conclusion générale et perspective

La Codigestion des algues d'eau douce de la région d'Adrar avec les déchets des dromadaires de la même région sont considérées comme un bon taux de produire de biogaz par rapport les palmes ou bien les déchets solides urbaines.

Les résultats obtenus sont promis et montrent la grande valeur énergétique surtout à cause de la reproduction des MA en présence de CO₂ et la lumière.

Dans notre étude on a utilisé des digesteurs remplie avec un volume de 150ml qui est produit une énergie pendant le temps de séjour « 33jours » égale à :

✚ **1^{er} groupe** : 07 réacteurs subissent un traitement physique seulement.

Substrat :

- ✓ MA=2.98 Wh/g MO
- ✓ DD=0.692935 Wh/g MO

Cosubstrat :

- ✓ 90%MA+10%DD=1.58694 Wh/g MO
- ✓ 75%MA+25%DD=2.388677 Wh/g MO
- ✓ 50%MA+50%DD=0.693924 Wh/g MO
- ✓ 25%MA+75%DD=0.735325 Wh/g MO
- ✓ 10%MA+90%DD=0.960699 Wh/g MO

✚ **2^{ème} groupe** : 07 autres réacteurs subissent un traitement physique, thermique, chimique.

Substrat :

- MA=0.626468 Wh/g MO
- DD=0.45329 Wh/g MO

Cosubstrat :

- 90%MA+10%DD=0.933852 Wh/g MO
- 75%MA+25%DD=1.060457 Wh/g MO
- 50%MA+50%DD= 1.110194 Wh/g MO
- 25%MA+75%DD= 0.625676 Wh/g MO
- 10%MA+90%DD=0.839463 Wh/g MO

Afin de connue le type des MA Nous espérons que d'autres études seront réalisées pour déterminer la composition des MA/DD utilisée afin de mieux comprendre la différence dans la production de biogaz entre ces deux substrats ainsi que les changements remarquables dans les paramètres de contrôle DCO, AGV et TAC au cours de la digestion anaérobie.

Enfin, l'utilisation énergétique de la biomasse algale peut remplacer une grande partie des produits pétroliers et répondre aux besoins futurs en énergie et principalement réduire la pollution atmosphérique par l'utilisation d'une source d'énergie renouvelable moins polluante.

Références bibliographiques

- [1] [pshtt://doi.org/10.4000/poldev.687](https://doi.org/10.4000/poldev.687)
- [2] DAHOU Mohamed El Amine. Recherche des conditions optimales de la production du biogaz à partir des boues de la station de lagunage de la ville d'Adrar. Thèse de doctorat. Ouargla 2018/2019.
- [3] BOUYAHIA Semcheddine. Commande et supervision d'un procédé biotechnologique Application à la production d'un biogaz. Thèse de doctorat. Sétif 2020.
- [4] <https://www.bioenergie-promotion.fr/65446/luniversite-de-lorraine-specialiste-des-conversions-thermochimiques-de-la-biomasse/>
- [5] <https://www.encyclopedie-energie.org/biomasse-et-energie-des-ressources-primaires-aux-produits-energetiques-finaux/>
- [6] <https://www.rncan.gc.ca/energie/sources-denergie-et-reseau-de-distribution/energies-renouvelables/systemes-de-bioenergie/ressources-de-la-biomasse/7390>
- [7] <https://www.encyclopedie-energie.org/biomasse-et-energie-des-ressources-primaires-aux-produits-energetiques-finaux/>
- [8] Halima bardja. Digestion anaérobie des palmes. Université Adrar. Master2.2021.
- [9] https://www.cder.dz/download/Art17-4_9.pdf
- [10] <https://www.total.com/fr/expertise-energies/projets/biomasse/pcv-qibebt-demontrer-et-exploiter-le-potentiel-des-microalgues/>
- [11] <https://core.ac.uk/download/pdf/51339954.pdf>
- [12] Julie PERSON –Algues, filières du futur, Abebiotech, Romainville. 17-19 novembre 2010.
- [13] <https://dspace.univ-adrar.edu.dz/jspui/handle/123456789/4561>
- [14] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/microalgues>.
- [15] <http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/memoire/2013/biocarburant-microalgue.htm>
- [16] <http://www.ecologicstudio.com/v2/index.phpphotoSynthEtica> [pSE]
- [17] Farouk chaa. Production du bioéthanol. Analyse et modélisation par la loi de Michaelis-Menten présentée. Université de Mostaganem. Master2 2019.
- [18] <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01712195>
- [19] <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02402287>
- [20] production d'hydrogène par procédés biologique P2-2.1 bio-hydrogène
<https://doi.org/10.2516/ogst/2018099>
- [21] <https://www.pngegg.com/fr/png-clija>
- [22] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-process-of-biodiesel-production-from-microalgae-biomass_fig1_272494677
- [23] <http://di.univ-blida.dz:8080/jspui/handle/123456789/4187>
- [24] Khanal SK. Anaerobic biotechnology for bioenergy production: principles and Applications. Singapore: Wiley-Blackwell; 2008.
- [25] <https://hal.inrae.fr/tel-02810196>
- [26] Doi: 10.1016/j.rser.2012.02.046
- [27] https://www.doc-developpement durable.org/file/Culture/Agriculture/articles-Wikipedia/Rapport%20C-N_Wikipedia-Fr.pdf
- [28] https://wwz.ifremer.fr/content/download/12612/file/fiche_big2010_thermophiles.pdf
- [29] <https://www.actuenvironnement.com/ae/dictionnaire environnement/definition/mesophile.php4>
- [30] <https://www.techno-science.net/definition/1027.html>

Références bibliographiques

- [31] <http://www.lagrandepoubelle.com/wikibis/ecologie/psychrophile.php>
- [32] <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2010.1763>
- [33] <https://doi.org/10.4000/tc.8481>
- [34] <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01908664>
- [35] <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.06.002>
- [36] <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.03.057>
- [37] <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011>
- [38] <https://www.chaplainenergie.fr/methanisation/>
- [39] Omari Oum Kelthoum, Ferdjellah Kelthoum, Effet du traitement chimique et aérobie sur le rendement de PBM (Potentiel Biochimique Méthanogène) des déchets organiques du restaurant universitaire, Adrar, Master2.2017
- [40] <https://energie.eelv.fr/la-transition-energetique/comment/le-biogaz/>
- [41] <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01751148/document>
- [42] <http://dx.doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.303>
- [43] Kerroum DERBAL. DIGESTION ANAEROBIE DES DECHETS SOLIDES MELANGES AVEC LES BOUES DE STATION D'EPURATION. Université Constantine. Thèse de doctorat.2017.
- [44] J. Guillermin, L. Maunas, J. Estanguet et E. Arribarrouy. Intérêt de la co-digestion pour la valorisation des lisiers et le traitement de déchets fermentescibles à l'échelle d'un territoire. Philippe POUËCH, Régis COUDURE, Claire-Emmanuelle MARCATO ADÆSO, 21 chemin de Pau, 64121 Montardon. 2005.
- [45] N. Meunier, R. D. Tyagi, and J. F. Blais. Traitement acide pour la stabilisation des boues d'épuration. Canadian Journal of Civil Engineering • February 1996
<https://doi.org/10.1139/196-008>
- [46] [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00177-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00177-3)
- [47] R. moletta, F. Cansell, 'méthanisation des déchets organiques', Record, n°10408,2003.
- [48] M.D. Mazouni, 'Modélisation et commande en temps minimum des réacteurs biologiques séquentiels discontinus', thèse de doctorat, école polytechnique d'Alger, 2001.
- [49] <https://www.compagnie-des-sens.fr/algues-alimentaires/>
- [50] Nicolas SAVOYE. La matière organique particulaire :composition et forçages, du continent à l'océan.université de bordeau.PDF.2014
- [51] <https://guingamp.uco.fr/sites/default/files/2020-03/Article%20Origine%20des%20Macroalgues.pdf>.
- [52] Kamel KAIDI, Houria MOGHRANI, Mohamed DJAAFRI, Youcef SAHLI, Slimane KALLOUM, Mourad TALEB AHMED. VALORIZATION STUDY OF THE ORGANIC WASTE RESULTING FROM THE TOMATO CANNING BY METHANISATION.2020
- [53] M Djaafri, S Kalloum, M Khelafi, A Tahri, F Salem, K Kaïdi, O Barako, A Kadri, L Bensmail, A Amahrouch. Amélioration de la digestion anaérobie des déchets ménagers (déchets de restaurant) en utilisant un prétraitement physique. Unité de Recherche en Energie Renouvelable en Milieu Saharien, URER_MS, ADRAR. 2014
- [54] <https://www.safetygas.com>
- [55] <https://selectra.info/#documents-suppl%C3%A9mentaires/>
- [56] <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00001338/>.
- [57] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Méthane>

Annexes

Annexe n°1 : La méthode détaillée de détermination de la DCO.

✓ Matériels utilisés

- Centrifugeuse
- Pipette.
- Eprouvette.
- Bécher, Papier filtre.
- Tubes.
- Burette.
- Thermo-réacteur.

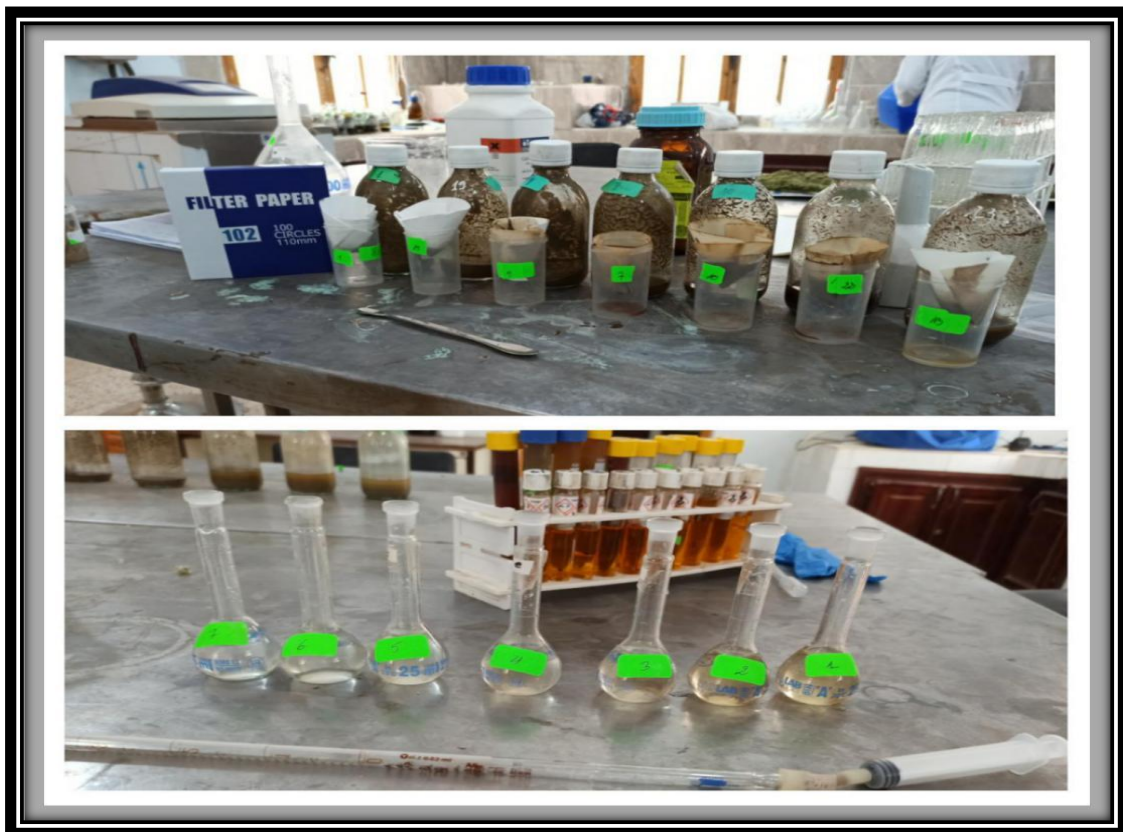


Figure A.1 : Photo matériel utilisée « DCO ».

✓ Méthode :

Ce dosage est réalisé par l'emploi de la méthode au bichromate de potassium Cette méthode analytique est adaptée pour le dosage de la DCO dans la gamme de mesure va de 30 mg/L à 700 mg/L pour des échantillons non dilués. Les valeurs de la DCO des échantillons étudiés sont plus élevées que ces valeurs, pour cela toutes les mesures de la DCO sont réalisées sur des échantillons dilués. Les matières organiques contenues dans l'échantillon sont oxydées, en milieu acide(H_2SO_4), en présence de sulfate d'argent (Ag_2SO_4) comme

catalyseur, et de sulfate de mercure (HgSO_4) pour éviter l'interférence des chlorures, par le bichromate de potassium

($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), introduit en excès, sous le chauffage à 150°C , pendant 2 heures dans un thermo-réacteur.



Figure A.2 : Centrifugeuse.



Figure A.3 : Photo du thermo réacteur.

Après refroidissement, la DCO est déterminée par dosage : l'excès de bichromate de potassium est dosé à l'aide d'une solution de sulfate fer ammonium [Sel de Mohr $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$], après la détermination de leur titre, en présence de quelques gouttes de ferroïne comme indicateur coloré. L'oxydation de la matière produit des ions Cr_3^+ donnant une coloration rouge violacé.

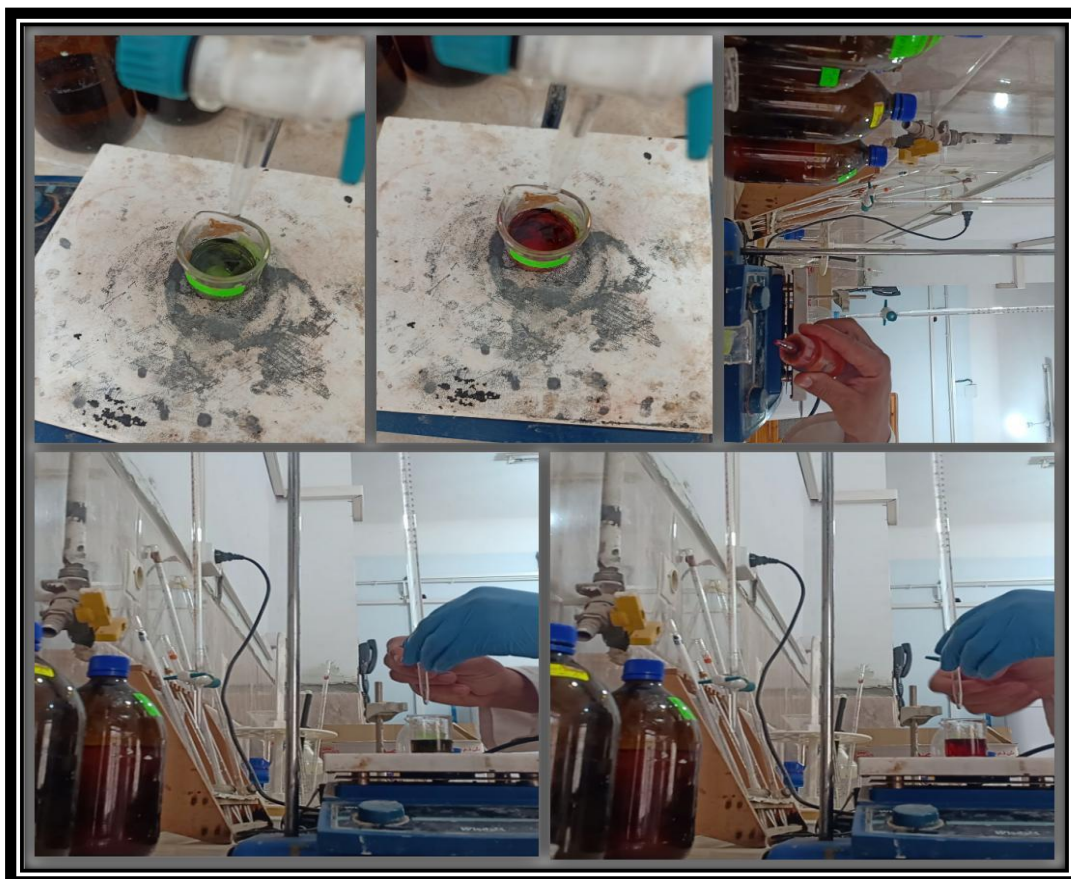


Figure A.4 : Les étapes après le refroidissement.

Résultats :

$$V_{\text{Témoin}} = 5\text{ml.}$$

$$V_{\text{sel de mohr}} = 12.8\text{ml.}$$

$$T_{\text{sel de mohr}} = (V_{\text{dichromate}} / V_{\text{sel de mohr}}) * 0.25$$

$$T_{\text{sel de mohr}} = 0.097$$

✚ **Tableau A.1** : volume de sel de Mohr pour l'échantillon. « Avants prétraitement ».

100%MA 0%DD *50	90%MA 10%DD *50	75%MA 25%DD *25	50%MA 50%DD *25	25%MA 75%DD *25	10%MA 90%DD *25	0%MA 100%DD *25
4.8	4.7	4.8	4.2	4.6	4.1	4

✚ **Tableau A.2** : volume de sel de Mohr pour l'échantillon. « Après prétraitement ».

100%MA 0%DD *50	90%MA 10%DD *50	75%MA 25%DD *50	50%MA 50%DD *25	25%MA 75%DD *25	10%MA 90%DD *25	0%MA 100%DD *25
4.9	4.8	4.1	4	4	3.5	4.4
				4.2 *50		

La DCO est exprimé par la relation suivante :

$$DCO = \frac{(VT - VE) \times 8000 \times T \times d}{Ve}$$

Avec :

VT : volume de sel de Mohr pour le témoin.

VE : volume de sel de Mohr pour l'échantillon.

T : titre de sel de Mohr.

d : facteur de dilution.

Ve : la prise d'essai de l'échantillon.

Annexe n°2 : La méthode détaillée de détermination de la teneur en sucre.

✓ **Matériels utilisés :**

- Fiole
- Eprouvette.
- Bécher.
- Tubes.
- Spectrophotomètre
- Bicarbonate de calcium.
- Glucose, substrat.
- L'eau distillée.
- Pincée d'acétate de plomb.
- Étuve à 100 C°.
- Pompe de filtration.

✓ Méthode :

➤ Préparation de l'échantillon

Préparation d'un mélange apporté par 1g de substrat, 300ml d'eau distillée et 3g de bicarbonate de calcium (CaCO_3), puis chauffer le mélange pendant 30 minutes jusqu'à ébullition sous agitation.

Une fois le mélange refroidi, compléter un litre avec de l'eau distillée, puis ajouter une pincée d'acétate de plomb à la solution.

✚ 1^{ère} filtration : La première filtration consiste à éliminer les protéines avec de l'acétate de plomb, en utilisant une petite quantité d'oxalate de potassium. D'où cette opération conduit à une solution primaire.

✚ Après filtration pour l'obtention de la solution finale, qui consiste un (1) ml du mélange, 1 ml de phénol et 5 ml d'acide sulfurique concentré sous agitation rapide, puis conserver à l'étuve à 100°C pendant 5 minutes. Avec le maintien des tubes dans l'obscurité pendant 30 minutes.

Le processus de lecture de la densité optique réalisée avec un spectrophotomètre UV-VIS 492nm



Figure A.5 : préparation de la solution.

Teneur en sucre mesurée pour chaque échantillon (07)



Figure A.6 : préparation de la solution (échantillons).



Figure A.7 : Spectrophotomètre UV-VIS 492 nm.

Tableau A.3 : Absorbance « Témoin ».

Eau distillée	0.144	0.089	0.119
---------------	-------	-------	-------

Tableau A.4 : Absorbance « Avants prétraitement ».

	100%MA 0%DD	90%MA 10%DD	75%MA 25%DD	50%MA 50%DD	25%MA 75%DD	10%MA 90%DD	0%MA 100%DD
1	0.186	0.208	0.205	0.270	0.257	0.297	0.262
2	0.187	0.172	0.223	0.286	0.241	0.312	0.244
3	0.154	0.324	0.200	0.331	0.287	0.248	0.266

✚ **Tableau A.5** : Absorbance « Après prétraitement ».

	100%MA 0%DD	90%MA 10%DD	75%MA 25%DD	50%MA 50%DD	25%MA 75%DD	10%MA 90%DD	0%MA 100%DD
1	0.163	0.170	0.170	0.150	0.199	0.117	0.122
2	0.201	0.194	0.164	0.224	0.129	0.107	0.174
3	0.203	0.167	0.185	0.143	0.193	0.111	0.129

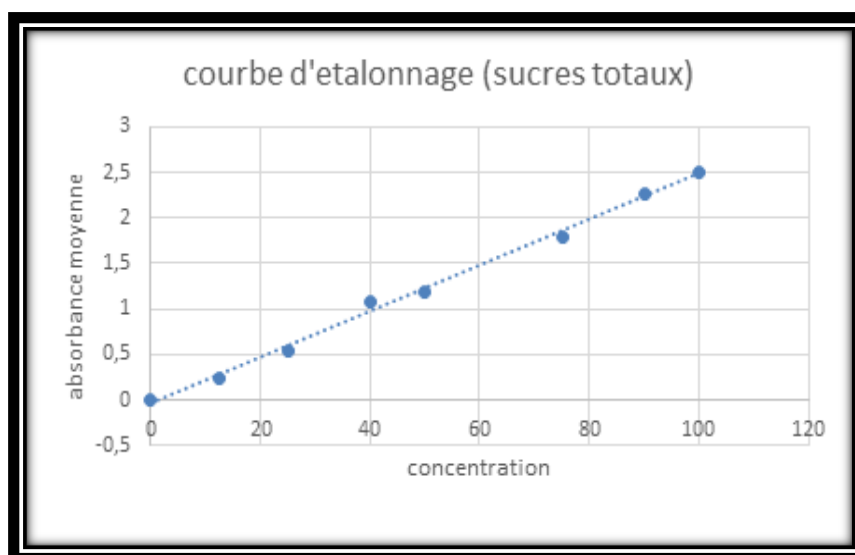


Figure A.8: courbe d'étalonnage des sucres totaux.

Annexe n°3 : La méthode détaillée de détermination Teneur en matière grasse.

✓ **Matériels utilisés :**

- Chauffe ballon
- Ballon à col rodé
- Porte de cartouche
- Filtre
- Réfrigèrent.
- Solvant d'extraction « hexane ».

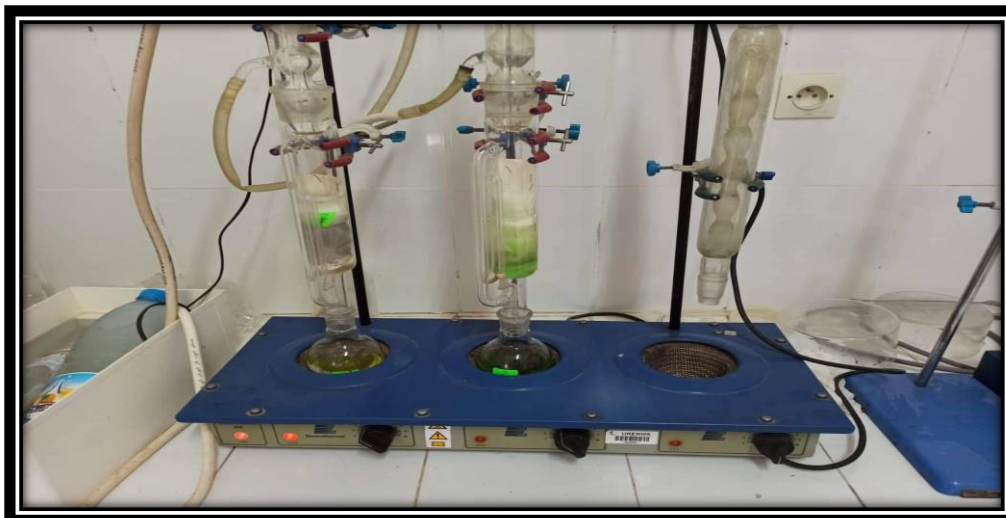


Figure A.9 : montage soxhlet.

✓ **Méthode :**

L'extraction par Soxhlet est une méthode simple et convenable permettant de répéter infiniment le cycle d'extraction avec du solvant frais jusqu'à l'épuisement complet du soluté dans la matière première. [56]

L'extracteur est placé sur un ballon contenant le solvant d'extraction. Le ballon est chauffé afin de pouvoir faire bouillir son contenu. La cartouche contenant le solide à extraire est insérée dans l'extracteur, au-dessus duquel est placé un réfrigérant servant à liquéfier les vapeurs du solvant. [56]

Le ballon étant chauffé, le liquide est amené à l'ébullition, les vapeurs du solvant passent par le tube de distillation et rentrent dans le réfrigérant pour être liquéfiées. Ensuite, le condensat retombe dans le corps de l'extracteur sur la cartouche, faisant ainsi macérer le solide dans le solvant. Le solvant condensé s'accumule dans l'extracteur jusqu'au niveau du sommet du tube-siphon, suivi par le retour dans le ballon du liquide de l'extracteur accompagné de substances extraites. Ainsi le solvant dans le ballon s'enrichit progressivement en composants solubles. L'extraction continue jusqu'à l'épuisement de la matière solide chargée dans la cartouche. [56]

✚ **La séparation :**

✓ **Matériels utilisés :**

- Ball mari.
- Réfrigérant.
- Ballon de récupération

✓ **Méthode :**

La séparation du solvant de l'extrait est faite à l'aide de l'appareil appelé Rotavapor (**Figure A.9**) Dans cet appareil on réalise une évaporation sous vide en utilisant une pompe à vide avec une vanne de contrôle. Pendant l'évaporation le ballon est mis en rotation et plongé dans un bain liquide chauffé. L'appareil est muni d'un réfrigérant avec un ballon-collecteur de condensat. La rotation du ballon crée une surface d'échange plus grande et renouvelée permettant donc d'effectuer une évaporation rapide.[56]



Figure A.10 : rotavapor.

L'abaissement de la pression permet d'évaporer le solvant à température réduite, évitant ainsi la dégradation thermique éventuelle des composés. C'est une méthode d'évaporation simple, utile, douce et rapide. [56]

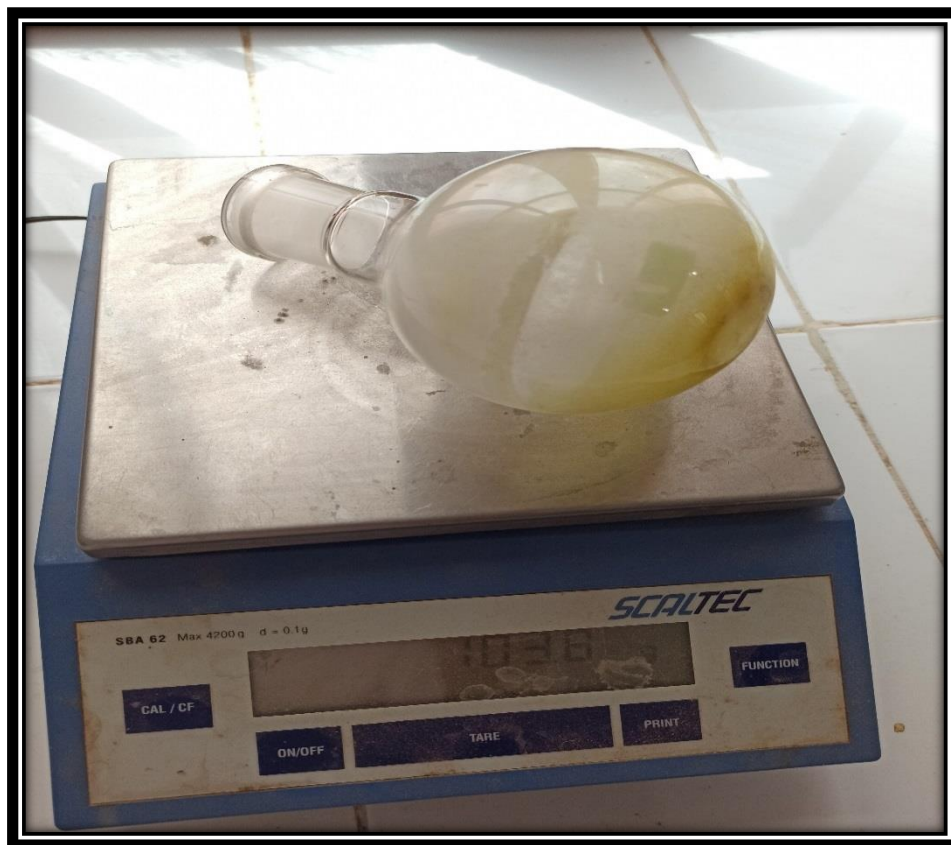
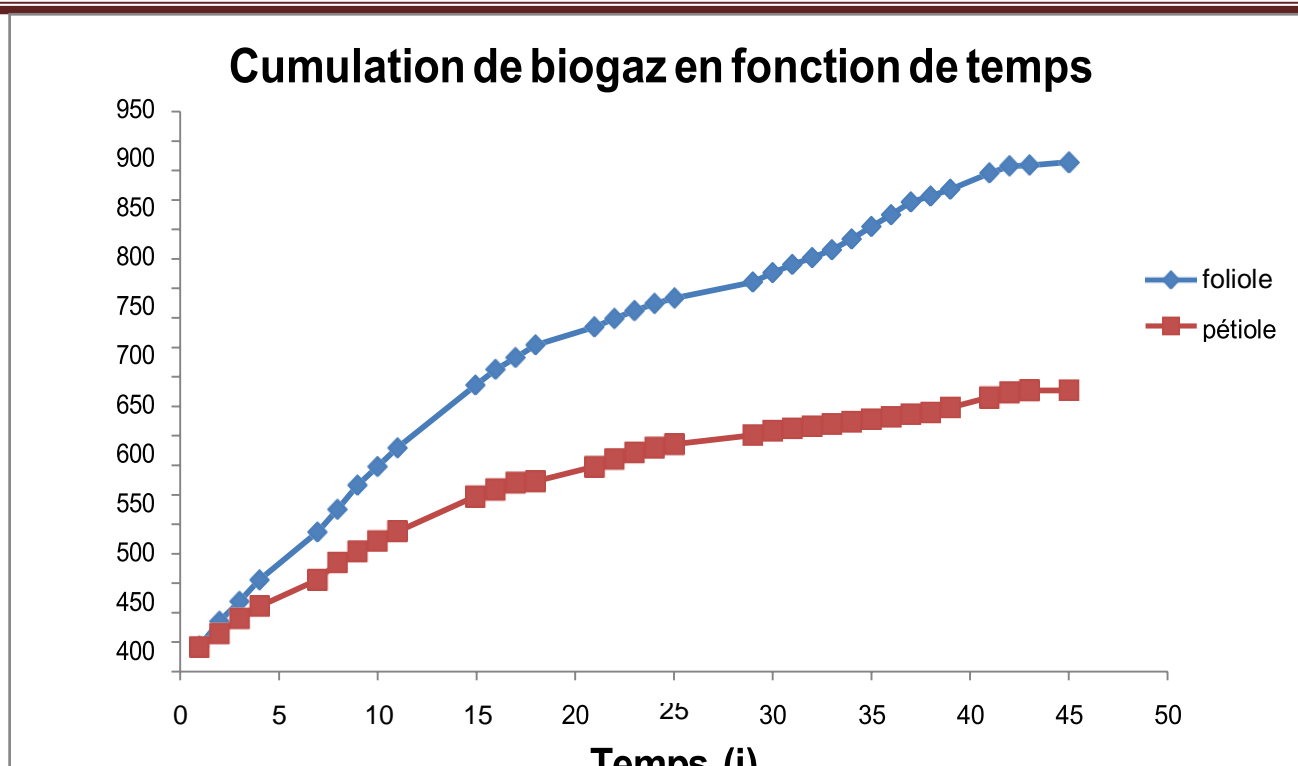


Figure A.11 : étape finale de mesure des lipides.

Annex 4 : comparaison avec étude sur le *Thème : Production de biogaz à partir des folioles et pétioles des palmiers dattiers (phoenix dactylifère L) variété H 'mira : Etude comparative* ou ils sont utilisés 500ml dans le digesteur.



2^{ème} comparaison avec mémoire sous le nom **Valorisation des déchets solides urbaines de la ville de blida.**

Ou il prend 250ml dans le digesteur

