



# MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

**Filière : Génie des procédés**

**Option : Génie des procédés de l'environnement**

## THÈME

**Evaluation et valorisation du biogaz généré par l'élimination des déchets ménagers**

**Présenté par**

- 1- BOUKSARA MOHAMED ELAMINE
- 2- GOUMIDI MOHAMED ILIES

Soutenu le 29 /06 / 2025 devant le jury composé de :

<b>Président :</b>	DRIOUCH Aouatef	Professeur	Université de Mostaganem
<b>Examineur :</b>	BENIDRIS Elbatoul	MCB	Université de Mostaganem.
<b>Rapporteur :</b>	ABDELLI Islam Safia	MCA	Université de Mostaganem

---

## Remerciement

---

*Nous remercions en premier lieu Dieu le Tout-Puissant pour nous avoir donné la force physique, morale et intellectuelle nécessaire pour mener à bien ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Madame le Dr. ABDELLI Safia, mon encadrante, pour son soutien précieux, sa disponibilité, ses conseils avisés et sa confiance tout au long la réalisation de ce mémoire. Son accompagnement rigoureux a été déterminant dans l'aboutissement de ce travail.*

*Je remercie vivement Madame le Pr. Driouch Aouatef, présidente du jury, pour l'honneur qu'elle me fait en acceptant de présider mes travaux, ainsi que Pour ses remarques constructives et son intérêt porté à ce projet.*

*J'exprime également toute ma reconnaissance à Madame le Dr. BENIDRIS Elbatoul, examinatrice, pour le temps qu'elle a consacré à l'évaluation de mon travail ainsi que pour ses questions pertinentes et ses suggestions enrichissantes.*

*Je tiens également à remercier tous les enseignants du département de Génie des procédés, dont les enseignements, les encouragements et le Professionnalisme ont jalonné mon parcours académique et ont largement contribué à l'enrichissement de mes connaissances dans ce domaine.*

*Enfin, je remercie sincèrement mes amis pour leur présence et leur écoute attentive.*

*Que tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce mémoire trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.*

---

## Dédicace

---

*Nous dédions ce travail à nos chers parents qui nous ont soutenus et encouragés tout au long de nos études. Leur amour, leur patience et leur sacrifice nous ont permis de réussir. Nous leur sommes reconnaissants pour tout ce qu'ils ont fait pour nous. Nous remercions également nos frères et sœurs pour leur aide et leur soutien précieux.*

---

## Abstract

---

It is well established that municipal solid waste (MSW) disposed of in controlled landfills or open dumpsites undergoes anaerobic degradation, leading to the generation of greenhouse gases (GHG) and leachate. Methane, one of the primary gaseous byproducts, has a global warming potential 25 times greater than that of CO<sub>2</sub> over a 100-year time horizon. Landfill gas typically consists of approximately 50% CH<sub>4</sub>, 45% CO<sub>2</sub>, 4% N<sub>2</sub>, less than 1% H<sub>2</sub>S, and around 2700 ppm of non-methane organic compounds. Methane production usually begins 6 to 12 months after waste deposition, peaks shortly after landfill closure, and gradually declines over a period spanning 30 to 50 years. Therefore, capturing and utilizing this methane as an energy source represents a crucial environmental and energy recovery opportunity.

This thesis evaluates the biogas generation potential from MSW in three Algerian provinces — Mostaganem, Médéa, and Touggourt — with a view to electricity production. The results indicate a significant potential, peaking in 2037 with an estimated annual output of 210 GWh. Among the studied regions, Mostaganem demonstrates the highest potential, followed by Médéa, while Touggourt exhibits a more localized and manageable profile. Furthermore, the IPCC method appears to overestimate gas yields when compared to the LENGDEM model.

These findings highlight the feasibility of implementing concrete biogas recovery projects for electricity generation, contributing to both national energy diversification and the mitigation of landfill-related environmental impacts. This study underscores the largely untapped potential of Algerian controlled landfills as sources of renewable energy.

Keywords: municipal solid waste, methane, greenhouse gases, controlled landfill, biodegradation, biogas recovery

## الملخص

من المعروف أن المخلفات المنزلية الصلبة (DMS) التي تُدفن في المكبات التلقية أو مكبات النفايات تخضع لعملية التحلل اللاهوائي، مما يؤدي إلى انبعاث غازات الدفيئة (GES) بالإضافة إلى تسرب السوائل الملوثة (lixiviat) يتميز غاز الميثان بقدرة احتجاز حراري عالمي تبلغ 25 مرة قدرة ثاني أكسيد الكربون خلال فترة زمنية تمتد إلى 100 سنة. تتكون غازات الدفيئة عموماً من 50% ميثان ( $CH_4$ ) ، و45% ثاني أكسيد كربون ( $CO_2$ ) ، و4% نيتروجين ( $N_2$ ) ، وأقل من 1% كبريتيد الهيدروجين ( $H_2 S$ ) ، إضافة إلى حوالي 2700 جزء في المليون من المركبات العضوية غير الميثانية. تنطلق عملية إنتاج الميثان في المكبات عادةً بعد 6 إلى 12 شهراً من دفن النفايات، وتصل ذروتها بعد فترة قصيرة من إغلاق المكب، وتستمر في التناقص التدريجي على مدى 30 إلى 50 سنة. لذلك، يبقى من الضروري استرجاع هذا الغاز وتحويله إلى طاقة قابلة للاستعمال.

يهدف هذا البحث إلى تقييم إمكانية إنتاج الغاز الحيوي من المخلفات المنزلية الصلبة في ثلاث ولايات جزائرية هي: مستغانم ومديعة وتقرت، وذلك لإنتاج الطاقة الكهربائية. أظهرت النتائج إمكانية كبيرة مع ذروة متوقعة في سنة 2037 بطاقة سنوية تقدر بـ 210 غيغاواط/ساعة. سجلت ولاية مستغانم أعلى إمكانية، تلتها مديعة، بينما عرفت ولاية تقرت إمكانية قابلة للتوظيف

محلياً. كما بينت الدراسة أن منهجية الهيئة الحكومية الدولية لتغير المناخ (IPCC) تميل إلى المبالغة في تقدير الكميات مقارنةً

بالمنهجية الأخرى. LENGDEM.

تمكن هذه النتائج من إطلاق مشاريع حقيقية لاسترجاع الغاز الحيوي وإنتاج الطاقة الكهربائية، وهو ما يساهم في تنويع مصادر الطاقة الوطنية وفي الحد من التأثيرات البيئية السلبية لمكبات النفايات. أكدت الدراسة على الإمكانات غير المستغلة في مكبات الجزائر التقنية كمصدر للطاقة المتجددة.

الكلمات المفتاحية: المخلفات المنزلية، الميثان، غازات الدفيئة، المكب التلقية، التحلل البيولوجي

---

## Résumé

---

Il est connu que les déchets ménagers solides (DMS) enfouis dans les centres d'enfouissement technique (CET) ou les décharges conduisent par décomposition anaérobie des fractions biodégradables à la production des gaz à effet de serre (GES) en plus du lixiviat. Le méthane possède un pouvoir de réchauffement global 25 fois celui du CO<sub>2</sub> sur 100 ans. Les GES sont constitués généralement de 50% de CH<sub>4</sub>, 45% de CO<sub>2</sub> de 4% de N<sub>2</sub> de moins de 1% d'H<sub>2</sub>S et de 2700 ppm de composés organiques non méthaniques. La production de méthane dans les décharges et les CET commence généralement 6 à 12 mois après l'enfouissement des déchets, pour atteindre son maximum peu de temps après la fermeture de la décharge et tend à diminuer progressivement sur une période de 30 à 50 ans. Il est vivement important de récupérer ce méthane et de le convertir en énergie.

Ce mémoire évalue le potentiel de production de biogaz à partir des déchets ménagers solides dans trois wilayas d'Algérie (Mostaganem, Médéa et Touggourt) en vue de produire de l'électricité. Les résultats montrent un potentiel important avec un pic en 2037 et une quantité de 210 GWh/ans, la wilaya de Mostaganem a un fort potentiel, suivie de Médéa, tandis que Touggourt présente un profil exploitable localement et la méthode IPCC tend à surestimer les volumes par rapport à la méthode LENGDEM.

Ces résultats permettent d'envisager des projets concrets de récupération du biogaz pour la production d'électricité, contribuant ainsi à la diversification énergétique nationale et à la réduction des impacts environnementaux des décharges. L'étude met en lumière le potentiel inexploité des centres d'enfouissement technique algériens comme sources d'énergie renouvelable.

**Mots clés :** déchets ménagers, méthane, gaz à effet de serre, CET, biodégradation

---

## Abréviation

---

AND : agence nationale des déchets.

PNAE-DD Plan national d'actions environnementales et du développement durable

COD : carbone organique dégradable.

DMA : déchets ménagers assimilés

DM : méthode par défaut.

DPO : décomposition de 1<sup>er</sup> ordre.

DOC : Carbon organique dégradable.

DOCf: fraction de DOC.

FOD : modèle de 1<sup>er</sup> ordre.

G.E.S: gaz à effet de serres

Gg: géogramme

LFG : landfill gaz. Gaz générés par les CETs

MCF : facteur de correction de méthane.

MSW : déchets solides municipaux

MSWT : déchets solides municipaux totaux générés.

NOx : les oxydes d'azote.

R : recovered methane (méthane récupéré).

OX : facteur d'oxydation.

COV : carbone organique volatile

SNE : Stratégie nationale environnementale

MEER : Ministère de l'Environnement et des Energies Renouvelables

CNFE : Conservatoire National des Formations à l'Environnement

SNGID 2035 : stratégie nationale de gestion de déchet

COT : carbone organique total

AGV : acides gras volatils

COVNM : composés organiques volatils non méthaniques

CET : centre d'enfouissement technique

LFG : Landfil gaz

---

## Sommaire

---

I.	CHAPITRE :	Etude Bibliographies .....	14
I.1.	Gestion des ordures en Algérie .....	15	
I.2.	Contexte réglementaire et institutionnel .....	15	
I.2.1.	Cadre institutionnel .....	15	
I.2.2.	Cadre réglementaire .....	17	
I.3.	Elimination des déchets urbains en Algérie .....	17	
I.3.1.	Centres d'enfouissement techniques (CET) .....	17	
I.3.2.	Évolution réglementaire .....	17	
I.3.3.	Stratégie nationale .....	17	
I.3.4.	Rapport sur la gestion des déchets .....	17	
I.4.	Flux polluant générés par l'enfouissement des déchets .....	18	
I.4.1.	Lixiviats (ou jus de décharge) .....	18	
I.4.2.	Biogaz (essentiellement du méthane) .....	18	
I.5.	Les procédés biologiques de dégradation des déchets .....	18	
I.5.1.	Traitements anaérobies et méthanisation.....	20	
I.5.2.	Les rejets gazeux des traitements biologiques .....	22	
I.6.	BIOGAZ .....	24	
I.6.1.	Composition de biogaz.....	24	
I.6.2.	La production de biogaz.....	25	
I.6.3.	Propriétés du biogaz.....	26	
I.6.4.	Processus de purification du biogaz .....	27	
I.7.	Changement climatique et les gaz à effet de serre .....	28	
II.	CHAPTER Matériels et méthodes .....	30	
II.1.	Présentation de la zone d'étude.....	31	
II.2.	Composition des déchets.....	31	
II.3.	Modèles de calcul.....	32	

II.3.1.	Modèle LandGEM .....	32
II.3.2.	Modèle IPCC.....	34
II.4.	Potentiel énergétique.....	35
III.	CHAPETR                      Résultats et discussion.....	37
III.1.	Etude de gisement.....	38
III.1.1.	Evaluation des quantités des déchets .....	38
III.1.2.	Composition des déchets.....	39
III.2.	Evaluation du biogaz.....	41
III.2.1.	Biogaz générés dans la wilaya de Mostaganem .....	41
III.2.2.	Biogaz généré dans la wilaya de Tougert.....	43
III.2.3.	Biogaz générés dans la wilaya de Medea.....	45
III.3.	Total Landfall Gas (les gaz d'enfouissement).....	48
III.4.	Potentiel énergétique.....	51
III.5.	Impact environnementale .....	52
Conclusion	.....	54
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	.....	55

---

## LISTE DES FIGURES

---

Figure III.1-1: les quantités des déchets de 3 wilayas .....	37
Figure III.2-1: biogaz généré par le CET Ain Sidi Cherif et par le CET Touahria .....	40
Figure III.2-2: biogaz généré par le CET Sidi Ali .....	41
Figure III.2-3: biogaz généré par la wilaya de MOSTAGANEM.....	41
Figure III.2-4: biogaz généré par le CET Nezla et par le CET Tamacine .....	43
Figure III.2-5: biogaz généré par la wilaya de Touggert .....	43
Figure III.2-6: biogaz généré par le DC Ain Boucif et par le DC Chellalet El Adhaoura .....	45
Figure III.2-7: biogaz généré par le CET Zoubiria et par le CET Kasr El Boukhari .....	45
Figure III.2-8: biogaz généré par la DC Aziz.....	46
Figure III.2-9: biogaz généré par la wilaya de Medea .....	46
Figure III.4-1: potentiel énergétique de les 3 wilayas (MOSTAGANEM, MEDEA, TOUGGERT] .....	49
Figure III.4-2: potentiel énergétique total pour les 3 wilayas.....	49

---

## LISTE DES TABLEAUX

---

<b>Tableau I.6-1: composition des déchets [8] .....</b>	<b>24</b>
<b>Tableau II.1-1: les quantités traitées des déchets dans les 3 wilayas .....</b>	<b>31</b>
<b>Tableau III.1-2: la composition des déchets da 3 wilayas .....</b>	<b>38</b>
<b>Tableau III.3-1: total Landfall Gas pour les 3 wilayas (7 CET, 3 DC).....</b>	<b>48</b>

---

### Introduction

---

La gestion des déchets solides est l'un des tous premiers défis des sociétés urbaines et industrielles. À côté d'autres systèmes de valorisation matière et énergétique, le traitement par enfouissement sanitaire des déchets solides issus des centres urbains et des industries est une pratique courante et techniquement maîtrisée dans les pays industrialisés alors qu'elle constitue, dans certains pays en développement, la solution par défaut, sans aucune considération pour la préservation de l'environnement.

Les volumes de déchets enfouis de manière inadaptée sont très importants. Des collectifs de déchets s'accumulent générant des pollutions aggravées par leur degré de concentration : lixiviats mal drainés et non traités ainsi que biogaz non valorisé.

En Algérie, les déchets ménagers, trop riches en matière organique, trop humides impliquent une décomposition anaérobie des fractions biodégradables des déchets ménagers enfouis en décharges ou en centres d'enfouissement techniques, conduisant à la génération de co-produits comme le lixiviat et le gaz de décharge (LFG). Cette dégradation de la matière s'explique par les multiples réactions simultanées et interdépendantes qui ont lieu dans cette matière, qu'elles soient biologiques, microbiologiques, chimiques ou physiques.

La gestion des déchets solides, y compris à Mostaganem, fait face à des défis importants, notamment le manque de tri sélectif et des difficultés d'accès aux centres d'enfouissement. Le ministère de l'Environnement a mis en place des textes et des organismes pour améliorer ce service, mais la valorisation des déchets reste un défi. Mostaganem, en particulier, a besoin d'une meilleure gestion des déchets, avec une étude sur la caractérisation des déchets pour envisager des filières de valorisation [1].

Le but de notre travail est d'évaluer les quantités de méthane produites dans 3 wilayas d'Algérie, une ville littorale (Mostaganem) une ville de l'intérieure (Medea) et une ville du sud (Touggert) dont 7 CET et 3 décharges contrôlées. Cette évaluation a été fait par l'utilisation de deux modèles différents IPCC- 2006, LandGEM v3.02. Une valorisation énergétique a été proposée, tout en convertissant ces gaz en électricité afin de réduire son impact nocif sur l'environnement et de profiter de cette bioénergie

## INTRODUCTION

Ce travail est présenté, Outre l'introduction générale, sous forme de trois chapitres :

- Le premier chapitre donne des généralités sur la gestion et l'élimination des déchets solides en Algérie ;
- Le second chapitre est consacré à la présentation modèles et méthodes utilisés ;
- Le troisième chapitre décrit les résultats obtenus et les discussions ; Enfin, une conclusion générale viendra clore ce travail.

# **I. CHAPITRE :**

## **Etude Bibliographies**

## I.1. Gestion des ordures en Algérie

L'Algérie, à l'instar des autres pays en développement, fait face à un défi de taille en matière de gestion des ordures ménagères. Avec une production annuelle de plus de 13 millions de tonnes de déchets (dont pas moins de 60 % de déchets d'origine organique) [2], la gestion de la collecte, du traitement et de la valorisation des déchets se pose en tant qu'enjeu sanitaire, environnemental et économique.

Aujourd'hui, la majeure partie des déchets en Algérie est éliminée dans des décharges non contrôlées par enfouissement [2], ce qui pose la question de la pollution des sols, de l'air (émissions de méthane) et des nappes phréatiques. Pourtant, les déchets représentent une ressource énergétique disponible, de même qu'un gisement de matières permettant leur valorisation, dans le cadre de la valorisation énergétique et de l'économie circulaire [2].

Ce document propose un état des lieux de la gestion des ordures ménagères en Algérie, des politiques publiques engagées, des difficultés rencontrées mais aussi des solutions durables à envisager, en particulier par la valorisation énergétique.

## I.2. Contexte réglementaire et institutionnel

### I.2.1. Cadre institutionnel :

A partir de 2001, le gouvernement Algérien a défini une stratégie nationale en matière de protection de l'environnement qui s'est traduite par le plan national d'action pour l'environnement et le développement durable (PNAE-DD).

Sur le volet déchet, le PNAE-DD s'est décliné en deux programmes :

- ❖ **Prodem** : Programme de gestion des déchets solides municipaux,
- ❖ **Pnagdes** : Plan national de gestion des déchets spéciaux.

A ce titre, le gouvernement s'est lancé sur tout un programme de mise à niveau notamment par :

#### a). **Renforcement de l'aspect réglementaire :**

Promulgation de la loi 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.

**b). Renforcement institutionnel :**

- Par la création d'institutions dédiées à toutes les thématiques environnementales. C'est à ce titre que l'Agence Nationale des Déchets a été créée. Sa mission principale étant la promotion de la gestion intégrée des déchets.
- *Services déconcentrés* : 48 directions de l'environnement de wilayas et inspections régionales.

*Introduction de la fiscalité environnementale* : notamment la taxe d'enlèvement des ordures ménagères (TEOM) et la taxe sur les activités polluantes et dangereuses (TAPD).

L'Algérie, à travers le Progdem et le Pnagdes, a pour objectif de développer à terme une gestion intégrée des déchets. Pour ce faire :

- 135 centres d'enfouissement techniques pour DMA et DI ont été réalisés ou sont en cours de réalisation.
- La plus grande majorité des communes se sont dotées de schémas directeurs pour la gestion des DMA.
- Les grandes décharges publiques ont été éradiquées ou sont en cours de réhabilitation.
- Les pouvoirs publics incitent au tri et au recyclage à travers des actions pilotes de tri à la source.
- Aussi, des unités de tri et de déchetteries ont été réalisées.
- Un système public de reprise et de traitement des déchets d'emballages (Eco-Jem) a été instauré.

Après avoir fait face à une situation d'urgence de gestion des déchets, les pouvoirs publics passent vers une phase qualitative qui consiste en la prévention et au recyclage/valorisation.

La prévention et le recyclage/valorisation sont les deux axes majeurs de la gestion des déchets qui vont permettre à l'Algérie de réduire sa production des GES.

Néanmoins, il est proposé d'instaurer une approche participative avec tous les acteurs concernés pour l'élaboration d'un plan d'action en vue d'identifier les actions prioritaires à mettre en œuvre.

### **I.2.2. Cadre réglementaire :**

- Loi N 01-19 du 12 Décembre 2001, relative à la gestion, au contrôle et l'élimination des déchets.
- Loi N 03-10 du 19 juillet 2003, relative la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.
- Décret N 02-372 du 11 novembre 2002, relatif aux déchets d'emballages.
- Décret N 02-175 du 20 mai 2002, portant création, organisation et fonctionnement de l'Agence Nationale des Déchets.
- Décret N 04-199 du 19 juillet 2004, fixant les modalités de création, organisation, fonctionnement et de financement du système public de reprise et de valorisation des déchets d'emballages Eco-Jem [3].

### **I.3. Elimination des déchets urbains en Algérie**

En Algérie, l'élimination des déchets urbains est régie par plusieurs méthodes et stratégies

#### **I.3.1. Centres d'enfouissement techniques (CET) :**

Ces centres introduisent une méthode d'élimination écologique des déchets solides urbains, respectant les exigences d'hygiène et e l'environnement [4].

#### **I.3.2. Évolution réglementaire :**

La Loi 01-19 exige une élimination saine et écologiquement rationnelle des déchets, ce qui a conduit à des changements significatifs dans la gestion des déchets solides urbains [5].

#### **I.3.3. Stratégie nationale :**

Le programme vise à éradiquer les décharges sauvages et à organiser la collecte et l'élimination des déchets dans des conditions respectueuses de l'environnement.

#### **I.3.4. Rapport sur la gestion des déchets :**

Un état des lieux a été réalisé pour évaluer la gestion des déchets en Algérie, prenant en compte toutes les étapes de la chaine de gestion, de la pré-collecte à l'élimination.

Ces efforts visent à améliorer la gestion des déchets et à protéger l'environnement en Algérie [2].

## I.4. Flux polluant générés par l'enfouissement des déchets

### I.4.1. Lixiviats (ou jus de décharge)

Ce sont des liquides produits par percolation de l'eau (pluie, humidité des déchets) à travers les déchets enfouis.

*a). Contenu typique :*

- Métaux lourds (plomb, cadmium, mercure...)
- Matières organiques en décomposition (DBO, DCO)
- Azote ammoniacal
- Produits divers (solvants, hydrocarbures, pesticides)

*b). Risques :*

- Contamination des sols
- Pollution des eaux souterraines
- Pollution des eaux superficielles

### I.4.2. Biogaz (essentiellement du méthane)

Il est produit après fermentation anaérobie (sans oxygène) des matières organiques contenues dans les déchets.

*a). Composition :*

- Méthane ( $\text{CH}_4$ ) : 50-60%
- Dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) : 40-50%
- Traces de sulfure d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{S}$ ), siloxanes, etc.

*b). Risques :*

- Gaz très puissant à effet de serre ( $\text{CH}_4$ )
- Risques d'incendie ou d'explosion
- Pollution atmosphérique

## I.5. Les procédés biologiques de dégradation des déchets

Ces traitements s'appliquent à la matière organique biodégradable, dite fermentescible : les micro-organismes vivent et prolifèrent sur les déchets organiques qu'ils assimilent en les décomposant. L'application à des déchets non issus directement ou indirectement (après passage en industrie agroalimentaire) de la biomasse (animaux ou végétaux) est plus rare car beaucoup

plus lente. Une réglementation stricte sur le compostage des produits animaux a été mise en place : on ne peut composter que des matières de catégorie 2 et 3 sous certaines conditions.

On estime entre 14 et 17 millions de mètres cube la production des déchets verts issus des espaces verts chaque année, soit de l'ordre de 3 Mt. Les déchets agricoles ne sont pas pris en compte car ils sont généralement réutilisés dans les exploitations elles-mêmes. La production française de compost est voisine de 2,5 millions de tonnes par an, dont 46% issus de déchets verts, 25% d'OM brutes et 22,5 % de boues de La dégradation de la matière organique par des traitements biologiques avec valorisation des sous-produits obtenus tend à se développer au détriment de la combustion et de la mise en décharge. Elle se trouve favorisée par l'accroissement

Régulier du tri et la volonté politique de recycler les déchets.

On entend par procédé biologique l'intervention d'une unité artisanale ou industrielle visant à contrôler et à optimiser les paramètres opératoires ; elle s'oppose au « laisser-faire biologique naturel » des centres d'enfouissement bien que les processus biologiques en cause soient souvent voisins. Il s'agit ici d'accélérer les phénomènes et de contrôler la qualité de la production des solides décomposés issus des déchets.

Les produits obtenus, qu'ils soient solides (compost) ou gazeux (biogaz), présentent théoriquement une valeur marchande. Utilisés comme amendements, ils doivent répondre à des normes et s'insérer dans un marché. Quant au biogaz, il est soit injecté dans le réseau de gaz, soit brûlé en chaudière pour fournir de la vapeur aux véhicules (autobus à Lille).

Industriels du voisinage, soit destiné à alimenter un générateur électrique ou des On distingue essentiellement les traitements en présence d'air ou d'oxygène (aérobies, compostage) et en l'absence d'oxygène (anaérobies, méthanisation ou fermentation alcoolique). Les micro-organismes aérobies ont tendance à oxyder au maximum la matière organique en  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$  par des réactions exothermiques : la température

À l'intérieur des andains s'élève naturellement. Les micro-organismes anaérobies vont au contraire produire des molécules organiques renfermant de l'énergie au moyen de réactions peu exothermiques : il est dès lors nécessaire d'apporter de la chaleur au milieu réactionnel. La fermentation alcoolique s'opère au moyen de levures agissant sur des sucres. C'est un mode de valorisation de déchets assez peu développé et qui est plutôt considéré comme un moyen de production d'alcool : il ne sera pas abordé ici.

Reflet du NIMBY sur les décharges et l'incinération, le traitement biologique des déchets ménagers connaît un développement régulier en France : 3,8 Mt en 2000, 4,2 Mt en 2002.

Le Conseil économique et social a proposé en avril 2008 de promouvoir le recyclage de la matière organique en suggérant l'implantation d'une collecte sélective des déchets fermentescibles afin de boucler le cycle du carbone et remettre en état des terres usées Par les pratiques agricoles intensives. Les Etats membres prennent des mesures pour encourager la collecte séparée des biodéchets à des fins de compostage et de digestion et l'utilisation sans risque pour l'environnement des matériaux produits à partir de biodéchets (directive 2008/98/CE).

### **I.5.1. Traitements anaérobies et méthanisation**

La méthanisation désigne le processus de transformation biologique anaérobie de matières organiques qui conduit à la production de biogaz et de digestat.

La décomposition des déchets organiques naturels en l'absence d'oxygène par les micro-organismes a été observée depuis des siècles (chauffage de l'eau des bains par le biogaz en Assyrie voici 3 000 ans ; Bombay en Inde en 1859) et exploitée sur de petites unités. L'exploitation de cette technique dans des unités traitant des dizaines de milliers de tonnes par an est relativement récente.

La comparaison entre l'incinération et la méthanisation n'est guère favorable en première approche à cette dernière du point de vue énergétique. En effet, au niveau thermodynamique, on part d'un état initial identique dans les deux cas, la matière organique qui va s'oxyder en libérant de l'énergie. L'état final pour l'incinération est constitué de matière minérale comportant le minimum d'imbrûlés, si possible voisin de zéro. La méthanisation produit un biogaz qui va libérer de l'énergie et un digestat comportant une certaine fraction organique non oxydée destinée à l'épandage. Il ne faut donc pas s'étonner que l'incinération libère trois fois plus de chaleur que la méthanisation par son biogaz. Toutefois, la production d'électricité par incinération s'obtient par une chaudière et une turbine à vapeur (rendement du cycle thermodynamique de l'ordre de 25%), alors que le biogaz peut alimenter un cycle combiné disposant d'un rendement supérieur à 40%. Pour une quantité de déchets identique, la production d'électricité par incinération (500 kWh/t MS au mieux) demeure toutefois supérieure à celle de la méthanisation (320 kWh /t MS au mieux et le plus souvent 75 à 150 kWh. /t MS).

#### **a). Principe de la méthanisation**

Cinq réacteurs de méthanisation pour déchets ménagers étaient implantés en France en 2007 : Amiens, Varennes-Jarcy, Le Robert (Martinique), Lille, Calais.

Certaines unités de méthanisation emploient une « pré fermentation » : les déchets subissent une fermentation aérobie avant la digestion anaérobie pendant 2 à 3 jours afin d'élever

leur température. C'est aussi un moyen de disposer d'un stock tampon et de neutraliser les quelques fermentations lactiques amorcées dans les bacs de collecte.

La méthanisation s'opère en quatre phases.

Avec l'hydrolyse, les polymères se dégradent en monomères. Des petites molécules solubles assimilables par les bactéries apparaissent par l'action enzymatique de bactéries hydrolytiques : la cellulose se transforme en glucose et cellobiose.

La transformation des monomères en dioxyde de carbone et acides organiques constitue l'acidogènes ou fermentation. Il apparaît alors des acétates, de l'éthanol, de l'ammoniaque, de l'hydrogène et des acides gras volatils (AGV) comportant de 2 à 5 atomes de carbone. Cette catégorie de micro-organismes a la possibilité de se développer en cas d'enrichissement de son alimentation et de produire rapidement plus d'AGV. Les micro-organismes des phases 3 et 4 ne réagissent que beaucoup plus lentement. Les AGV s'accumulent et génèrent une acidification du milieu qui inhibe ces microorganismes 3 et 4 : la digestion anaérobie peut alors se bloquer.

Au niveau de l'acétogénèse, les micro-organismes transforment les acides gras volatils et alcools de l'étape précédente en hydrogène [devant demeurer sous une pression partielle de 10 à 10<sup>-</sup> bar], dioxyde de carbone et acétates. L'hydrogène sulfuré se trouve généré lors de cette phase de transformation.

Les bactéries méthanogènes interviennent ensuite pour élaborer le méthane (méthanogénèse) à partir d'hydrogène, de dioxyde de carbone et des acétates suivant les réactions :

- de réduction du CO<sub>2</sub> :  $\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$  (environ 30%) **Eq 1**
- de décarboxylation de l'acide acétique :  $\text{CH}_3\text{COOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2 \text{CO}_3$  (70 %) **Eq 2**

#### *b). Les réacteurs de méthanisation*

Les digesteurs sont des réacteurs biologiques à fonctionnement continu de type mélange (Valorga, Linde BRV sec) ou à écoulement piston (Dranco, Linde liquide, Kompogas). Ils peuvent être verticaux (Valorga, Dranco, Linde liquide) ou horizontaux (Kompogas, Linde BRV sec). Certains réacteurs sont en phase sèche (15 à 40% de MS), d'autres en phase liquide (< 15% de MS) : plus la matière sèche est élevée, meilleur est le ratio biogaz produit par unité de volume de digesteur à température identique, ce qui réduit le montant de l'investissement du bioréacteur.

Les temps de séjour moyens sont compris entre 2 et 3 semaines. Comme dans le cas du compostage, les déchets organiques sont fragmentés au moyen d'un broyeur ou d'un déchiqueteur,

parfois d'un simple tambour horizontal tournant sur lui-même, afin d'en faciliter la décomposition par les micro-organismes. Certains procédés (BTA, Waasa) prévoient en plus un hydropulpeur en tête afin de faciliter la dégradation de la cellulose. Des rendements supérieurs en biogaz sur matière sont alors obtenus, la concentration en méthane pouvant atteindre 65%, voire 70% ; mais l'investissement est dans ce cas plus élevé.

Comme indiqué plus haut, le régime thermophile tend à se généraliser. Les réacteurs présentent des structures en acier inoxydable ou en béton résistant à ces conditions de fonctionnement.

La fermentation naturelle anaérobie d'une biomasse inerte tend à former une croûte en surface. Au niveau de la réalisation industrielle, la formation de cette croûte est évitée par un brassage de la masse en fermentation au moyen d'une agitation mécanique, d'une injection de biogaz ou d'une recirculation du digestat.

Les réacteurs pour collectivités locales présentent un fonctionnement continu automatisé, alors que les réacteurs d'exploitation agricole fonctionnent en discontinu et nécessitent souvent un entretien manuel fréquent.

Des valeurs moyennes de dimensionnement et de fonctionnement obtenues sont fournies par :

- Volume du réacteur : 0,06 à 0,22 m<sup>3</sup>/t traitée ;
- Temps de séjour en méthanisation : 20 à 47 jours ;
- Charge organique en méthanisation : 5,2 à 13 kg MSV /jour ;
- Production de biogaz : 0,8 à 4,8 m<sup>3</sup> de digesteur jour ;
- Rendement : 60 à 114 m<sup>3</sup> de biogaz/t traitée - 34 à 69 m<sup>3</sup> de méthane/t traitée ;
- Production électrique : 114-126 kWh/t et 1,12 à 2 kWh/t de biogaz ;

### **I.5.2. Les rejets gazeux des traitements biologiques**

Le compostage génère des composés organiques volatiles sources d'odeurs nauséabondes. Une étude a porté sur l'unité de compostage de Muranette en Isère dont la capacité maximale est de 60 000 t/an. Le traitement est effectué sur la fraction fermentescible des ordures ménagères : durée de fermentation 10 jours (procédé Siloda) ; affinage, maturation 10 jours. Les concentrations dans l'air en benzène et toluène sont comprises entre 0,5 et 7 ppb, comparables à celles de sites urbains. Les concentrations en trichloroéthène et tétrachloroéthène sont décuplées. (REF)

Par rapport à un site urbain ou rural. Les alcanes sont inchangés.

Les rejets gazeux des unités de compostage se traduisent par des odeurs persistantes : un exemple en est fourni par la société Teva exploitant une unité de compostage à la Queue-en-Brie (Seine-et-Marne) dont les odeurs importunaient les habitants de

Pontault-Combault, récriminations relayées par leur député [6].

La production française de biogaz s'établissait à 58 ktep en 2002. Elle se répartissait en 12% pour les décharges, 57 % pour les stations d'épuration, 5 % pour le secteur agricole et 26% pour les industries agroalimentaires.

Le biogaz produit par méthanisation est :

- Brûlé en torchère ;
- Injecté dans le réseau de gaz naturel aux Pays-Bas (refus actuel sur le réseau de gaz naturel du fait du contact direct de la flamme avec des produits alimentaires dans certaines industries) ;
- Consommé par une chaudière pour fournir de la chaleur ;
- Injecté dans un moteur pour produire de l'électricité.

Les tarifs d'achat de l'électricité produite par des générateurs alimentés en biogaz s'établissent dorénavant selon : ils se décomposent en un tarif de base compris entre 11,19 et 13,37 €/kWh selon la puissance de l'installation, auquel peut s'ajouter une prime à l'efficacité énergétique comprise entre 0 et 4 €/kWh et une prime pour le traitement d'effluents d'élevage comprise entre 0 et 2,6 €/kWh.

Les principales différences avec le tarif précédent sont [7] :

- Une meilleure prise en compte des surcoûts pour les faibles puissances ;
- La création d'une prime pour le traitement d'effluents d'élevage pour promouvoir les unités agricoles : cette prime vise à améliorer la rentabilité des installations agricoles qui traitent des effluents d'élevage dont l'incorporation entraîne une diminution de la productivité en biogaz ;
- Une prime à l'efficacité énergétique modifiée.

Le tarif d'achat pour les unités agricoles de petite et moyenne puissance est ainsi revalorisé de 15 à 25 % en moyenne. La revalorisation du tarif d'achat de l'électricité entraîne une hausse d'environ 1 % de la facture d'électricité des consommateurs, correspondant à un soutien estimé à 300 M€/an à l'horizon 2020.

Comme suit :

comanif d'achat du biométhane injecté dans les réseaux de gaz naturel stable-

Le tarif d'achat du biométhane injecté dans les réseaux de gaz naturel s'établit pour les installations de stockage de déchets non dangereux, il est compris entre 4,5 et 9,5 c€/kWh selon la taille de l'installation.

## I.6. BIOGAZ

### I.6.1. Composition de biogaz

Le biogaz contient principalement du méthane et du gaz carbonique. La proportion de ces deux gaz dépend de la nature du substrat, et plus précisément de la proportion Carbone Hydrogène-Oxygène-Azote (C-H-O-N). Un substrat riche en C et H produit une forte proportion de méthane, jusqu'à 90 %. Un substrat moyennement riche, comme la cellulose, produit un biogaz contenant typiquement 55 % de méthane et 45 % de gaz carbonique. La Teneur en biogaz du méthane varie entre 50 et 75% [8]. Le tableau récapitule la Composition de biogaz [9].

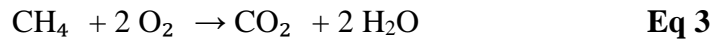
*Tableau I.6-1: composition des déchets [8]*

Éléments	Proportions pour 1Nm3 de biogaz brut
Méthane (CH <sub>4</sub> )	50 – 75 %
Dioxyde de Carbone (CO <sub>2</sub> )	25 – 45 %
Vapeur d'eau (H <sub>2</sub> O)	2 – 7 %
Azote (N <sub>2</sub> )	0 – 2 %
Hydrogène (H <sub>2</sub> )	0 – 1 %
Oxygène (O <sub>2</sub> )	0 – 2 %
Hydrogène sulfuré (H <sub>2</sub> S)	0 – 2 %

#### a). Méthane : CH<sub>4</sub>

L'un des principaux constituants du biogaz, le taux de CH<sub>4</sub> confère aux gaz de biomasse un pouvoir calorifique [7], le méthane (CH<sub>4</sub> ) est un gaz inodore et incolore (donc non détectable par les sens humains), de densité 0,55 [6, 7 ,8]. Plus léger que l'air, il s'accumule en partie haute

de locaux peu ventilés et se disperse facilement dans l'atmosphère [6]. La température d'ignition du méthane à pression atmosphérique en présence d'une flamme ou étincelle est de 550°C [4]. La combustion du méthane dans le dioxygène pur produit du dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> et de l'eau H<sub>2</sub>O avec une importante libération d'énergie :



$$\Delta H = 891 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$$

*b). Gaz carbonique : CO<sub>2</sub>*

La présence de CO<sub>2</sub> est inhérente aux gaz de biogaz, il est inodore et incolore and plus lourd que l'air et il s'accumule en partie basse des locaux. Sa concentration dans l'air est de 350 ppm (0,035 %) [6,7].

*c). Hydrogène sulfure H<sub>2</sub>S et mercaptans*

L'hydrogène sulfuré (H<sub>2</sub>S) est un gaz plus lourd que l'air. Il tend donc à s'accumuler en partie basse de locaux peu ventilés. Hautement toxique, il est reconnaissable à son odeur caractéristique dite (d'œuf pourri). Les mercaptans sont des composés organiques soufrés qui sont également très malodorants et souvent toxiques. La concentration en H<sub>2</sub>S dans le gaz de décharge varie fortement entre les sites. Elle diminue également dans le temps : les teneurs rencontrées vont de moins 10 ppm à plus de 1 000 ppm [6,7].

### **I.6.2. La production de biogaz**

La production de biogaz non contrôlée provoque de nombreux dommages :

- À la végétation. Les symptômes des dommages infligés aux arbres ressemblent à ceux rencontrés par des sécheresses : défoliation. Celle-ci s'observe aussi dans le voisinage des décharges. Le biogaz génère des conditions anoxiques au niveau des racines, principalement du fait de la présence de méthane et de dioxyde de carbone. Mais l'hydrogène sulfuré, l'ammoniac, le monoxyde de carbone jouent aussi un rôle défavorable. Il existe néanmoins des espèces de plantes peu sensibles à la présence de biogaz : peuplier, pin, ginkgo biloba, prunus, érable, tulipier, etc. ;
- Aux bâtiments. Les constructions sur d'anciens sites de décharges engendrent des problèmes de tassements, des risques d'asphyxie dans les espaces clos, des risques d'explosion par confinement du biogaz produit mélangé avec de l'air dans des caves. Des

compactages de sol et des mesures de sécurité adaptées (ventilation des locaux) sont à prévoir. Des risques d'incendie avec production de fumées et de gaz toxiques sont à craindre : la température d'auto-inflammation du méthane est de 235 °C

- Aux riverains. Des odeurs du fait de la présence de gaz toxiques (H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>) composés organosulfurés ou esters, alkybenzène, limonène, xylène, benzène, phénol...) peuvent être émises ;

**pollution de l'air ambiant** : effet de serre. Le méthane génère pour un volume identique un effet de serre égal à 21 fois celui du dioxyde de carbone. On estime entre 5 et 10% la proportion de méthane dans l'atmosphère issue des gaz de

### I.6.3. Propriétés du biogaz

#### a). *Pouvoir calorifique du biogaz*

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de ce combustible. Le biogaz est un combustible dont la valeur énergétique se mesure en PCI (pouvoir calorifique inférieur lorsque l'eau produite par cette combustion reste à l'état vapeur) comme le gaz naturel [7,8].

Le PCI du biogaz est proportionnel à sa teneur en méthane, par exemple pour un biogaz à 70% de méthane à 15°C et à pression atmosphérique normale, le PCI est égal à  $9,42 \times 0,7 = 6,59$  kWh/ m<sup>3</sup> [8].

A titre indicatif 1 m<sup>3</sup> de méthane est équivalent à 1 litre d'essence en matière énergétique. Le méthane émet moins de CO<sub>2</sub> que l'essence ou le pétrole car il possède le rapport H/C le plus élevé [8].

#### b). *Température adiabatique de la flamme de combustion du biogaz.*

La température adiabatique de la flamme lors de la combustion du biogaz est proportionnelle à sa capacité calorifique (PCI), elle-même proportionnelle au pourcentage de méthane dans le biogaz. Un biogaz de bonne qualité a une capacité calorifique importante due à la présence d'un pourcentage élevé en méthane. La température de flamme de combustion du biogaz peut varier entre 800 et 1100°C selon la concentration en méthane dans le biogaz.

Un biogaz contenant 50% de méthane a une température de flamme de 870°C [7,8].

### **I.6.4. Processus de purification du biogaz**

Tout biogaz qui est extrait à la sortie par une décharge ou une unité de méthanisation est un mélange hétérogène riche en impuretés qui peut nuire à l'efficacité de la valorisation énergétique du biogaz, mais également provoquer de la corrosion ou des risques pour l'environnement. Le traitement du biogaz est donc une étape incontournable pour améliorer sa qualité (purifier le biogaz) afin de lui permettre d'être utilisé dans de nombreux procédés, aussi bien industriels qu'énergétiques.

#### **a). Objectifs du traitement**

Le traitement du biogaz vise à :

- Éliminer les espèces responsables de corrosion, en particulier le sulfure d'hydrogène,  $H_2 S$ , un composé acide.
- Réduire la teneur en eau du biogaz, afin d'éviter des phénomènes de condensation dans les canalisations.
- Éliminer les COV (Composés Organiques Volatils), siloxanes et autres polluants.
- Augmenter la teneur en méthane du biogaz (ou de la biométhane) si une injection dans le réseau de gaz naturel est envisagée.

#### **b). Les grandes étapes du traitement**

##### **I.6.4.b.1. Déshumidification (séparation de l'eau)**

Le biogaz contient naturellement de la vapeur d'eau. Son humidité est néfaste pour les conduites qui transportent le biogaz, car elle peut tout autant provoquer de la corrosion que provoquer des condensats acides. Elle peut être éliminée par :

- Refroidissement (condensation) – abaissement de la température d'un fluide, jusqu'à ce qu'il se liquéfie.
- Dessiccation – recours à des matériaux desséchants (séchage par adsorption ou absorption).

##### **I.6.4.b.2. Élimination du sulfure d'hydrogène ( $H_2 S$ )**

Le  $H_2 S$  est un gaz toxique, corrosif et odorant. Plusieurs méthodes sont disponibles pour son élimination :

- Par filtration sur charbon actif imprégné (adsorption),
- Par lavage chimique ou biologique (biofiltres, scrubbers),
- Par oxydation catalytique.

#### **I.6.4.b.3. Élimination des siloxanes et COV**

Les siloxanes (composés issus des cosmétiques et détergents) peuvent former des dépôts abrasifs dans le moteur. Ils sont éliminés par :

- Charbon actif,
- Condensation à basse température,
- Adsorption sur zéolithes ou tamis moléculaires.

#### **c). *Résultat du traitement***

On obtient après traitement :

- Un biogaz épuré, adapté à la cogénération (production d'électricité + chaleur),
- Ou un biométhane si l'épuration est poussée (purification > 97 % de CH<sub>4</sub> ), qui peut être injecté dans le réseau de gaz naturel ou utilisé comme carburant alternatif (bioGNV).

#### **d). *Importance du suivi***

Le système de traitement du biogaz doit être surveillé en continu :

- À l'aide d'analyseurs en ligne de CH<sub>4</sub> , H<sub>2</sub> S, CO<sub>2</sub> , humidité,
- Avec un entretien régulier des filtres et des unités de lavage,
- Et la qualité du gaz final doit être contrôlée pour répondre aux exigences d'injection ou d'utilisation.

### **I.7. Changement climatique et les gaz à effet de serre**

Le monde s'est déjà réchauffé de +1,1° depuis l'ère préindustrielle et les experts envisagent qu'il atteigne +1,5° début 2030. En France, le réchauffement est encore plus rapide et atteint +1,7°. Ce qui accentue déjà les extrêmes climatiques : sécheresses, méga-feux, canicules, pluies diluviennes etc. Et demain ? A quoi s'attendre ? Décryptage des évolutions climatiques en cours et à venir.

Dans le monde, La planète subit un réchauffement sans précédent

- Le réchauffement climatique est actuellement de  $+1,1^{\circ}\text{C}$  dans le monde comparé à l'ère pré-industrielle.
- Il n'avait pas fait aussi chaud sur Terre depuis 125 000 ans environ.
- La montée du niveau des mers a atteint 20 cm en moyenne sur le globe et est la plus rapide depuis au moins 3 000 ans.
- Le recul des glaciers est sans précédent depuis au moins 2 000 ans.
- La concentration en gaz carbonique dans l'atmosphère est la plus élevée depuis au-moins 2 millions d'années. \*Ce chiffre de  $+1,1^{\circ}$  est une moyenne : il inclut la température moins élevée des océans. Sur les terres émergées, la température atteint en réalité  $+1,6^{\circ}\text{C}$ . La moyenne de l'ère industrielle est estimée comme la moyenne entre 1850 et 1900.

Ce chiffre de  $+1,1^{\circ}$  est une moyenne : il inclut la température moins élevée des océans. Sur les terres émergées, la température atteint en réalité  $+1,6^{\circ}\text{C}$ . La moyenne de l'ère industrielle est estimée comme la moyenne entre 1850 et 1900 [10].

## **II. CHAPTER Matériels et Méthodes**

## II.1. Présentation de la zone d'étude

L'objet de l'étude porte sur l'estimation des quantités de  $\text{CH}_4$  dégagées dans les wilayas choisies (MOSTAGANEM, TOGGOURT, MEDEA) où les choix ont été opérés en tenant compte, d'une part, de la taille des villes (des grandes métropoles dont la population active dépasse un million d'habitants) et, d'autre part, des quantités de déchets ménagers enfouis.

*Tableau II.1-1: les quantités traitées des déchets dans les 3 wilayas*

Wilaya	POPULATION	RATIO	Quantité traitée en 2024	NOMBRE DE CET
<u>MOSTAGANEM</u>	892 165	0,82	267 650	3
<u>MEDEA</u>	1 062 134	0,85	329 260	5
<u>TOGGOURT</u>	247 221	0,56	30 000	3

## II.2. Modèles de calcul

Les modèles de calcul du LGF (Landfill Gas Formation ou Landfill Gas Fraction) représentent des outils essentiels pour l'évaluation des émissions attachées au stockage de déchets. Ils permettent notamment de quantifier la production effective de gaz de décharge à partir d'un certain nombre de paramètres (de la quantité de déchets mis en enfouissement, de leur nature, des paramètres climatiques, des caractéristiques du site d'enfouissement...).

Les modèles les plus souvent utilisés sont ceux du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), et notamment celui de la méthode de dégradation de premier ordre First Order Decay – FOD, décrite dans les lignes directrices de 2006 et mise à jour en 2019 ; base de nombreux inventaires nationaux d'émissions de gaz à effet de serre, elle permet d'évaluer les impacts des politiques de réduction, de récupération ou de valorisation des biogaz.

### II.2.1. Modèle LandGEM

C'est un outil qui estime automatiquement l'émission des LFG à partir d'une interface Microsoft Excel. Il est basé sur le modèle FOD présenté par l'équation :

$$Q_{\text{CH}_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^n K L_0 \left(\frac{M}{10}\right) e^{-km} \quad \text{Eq 4}$$

Avec :

$Q_{\text{CH}_4}$  : génération annuelle de  $\text{CH}_4$  (mg. Année<sup>-1</sup>)

$i = 1$  incrément de temps de l'année (indice du modèle)

$n =$  (année de calcul) – (année initiale d'acceptation des déchets)

$j = 0.1$  incrément de temps de l'année (indice du modèle)

$K = \text{CH}_4$  constante de taux de génération (année<sup>-1</sup>)

$L_0 =$  capacité potentielle de production de  $\text{CH}_4$  (m<sup>3</sup>. Mg<sup>-1</sup>)

$M_i =$  masse de déchets acceptés la  $i$ ème année (Mg)

$T_{ij} =$  âge de la  $j$ ème tranche de masse de déchets  $M_i$  acceptée dans l'année

### II.2.2. Modèle IPCC

Le modèle proposé par le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (IPCC) offre deux approches principales pour estimer les émissions de méthane issues des CET, en fonction des données disponibles :

IPCC-DM (Méthode du Débit Massique) : Cette méthode simplifiée repose sur une approche monphasée de bilan massique, qui vise à quantifier le potentiel de production de méthane à partir des déchets organiques enfouis. Elle ne prend pas en compte l'évolution temporelle de la biodégradation.

IPCC-FOD (First Order Decay) : Ce modèle cinétique du premier ordre décrit la dégradation anaérobie des matières organiques au fil du temps. Il suit une approche multiphasée et permet de calculer les émissions de méthane en fonction de paramètres tels que la fraction

biodégradable des déchets solides municipaux (DSM), le coefficient de biodégradabilité des matières organiques, et le facteur de conversion méthane.

Les émissions de méthane sont calculées selon l'équation suivante (5) et (6) et (7) :

$$Q_{CH_4} = \left( \sum (CH_4 \text{ produced } (X, T) - R(T)) \cdot (1 - OX(T)) \right) \dots\dots \mathbf{Eq 5}$$

$CH_4$  emissions represent the  $CH_4$  emitted in year T, in Gg.

$T$ : inventory year,

$X$ : waste category or type/material

$R(T)$ :  $CH_4$  recovered in year T, in Gg,

$OX(T)$ : oxidation factor for year T (fraction)

$$CH_4 \text{ produced} = \sum (e^{-(T-1)k} - e^{-Tk}) MSWt \cdot MSWf \cdot MCF \cdot DOCf \cdot F \cdot \frac{16}{12} - R(1 - OX) \quad \text{Eq 6}$$

$$K = \frac{\ln 2}{T} \quad \text{Eq 7}$$

Où :

DOCf : Fraction biodégradable des matières organiques,

MSWf : Fraction biodégradable des DSM (0,7),

F : Facteur de conversion méthane (0,5),

OX : Facteur d'oxydation (0,1),

Lo : Capacité de production potentielle de méthane ( $m^3/Mg$ ),

M : Masse totale des déchets enfouis (Mg).

Dans cette étude, les paramètres adoptés reflètent les caractéristiques spécifiques des déchets à Mostaganem, basées sur les recommandations de l'IPCC. Les paramètres adoptés incluent un coefficient de biodégradabilité des matières organiques (DOCf) de 0,5, une fraction des DSM biodégradables (MSWf) de 0,7, un facteur de conversion méthane (F) de 0,5, et un facteur d'oxydation (OX) de 0,1. La fraction de carbone organique dissous (DOC) est quantifiée à partir des valeurs par défaut fournies par les directives IPCC.

### II.3. Potentiel énergétique

Le biogaz de décharge (LFG), issu de la décomposition des fractions organiques des déchets solides municipaux (DSM), peut être valorisé par diverses technologies énergétiques.

Les procédés thermochimiques tels que l'incinération, la pyrolyse, la gazéification ou la production de combustibles dérivés des déchets permettent de récupérer de l'énergie, mais sont souvent contraignants en termes de conditions opératoires et peu adaptés aux déchets biodégradables [11]. À l'inverse, la méthanisation, ou digestion anaérobie, constitue une alternative plus durable pour la valorisation énergétique de la matière organique. Ce procédé biologique permet la production de biogaz riche en méthane, directement valorisable sous forme de chaleur, d'électricité ou de biométhane. En plus de sa contribution à la transition énergétique, la méthanisation permet de limiter les émissions diffuses de CH<sub>4</sub> dans l'atmosphère, renforçant ainsi son intérêt dans le contexte de la gestion durable des déchets (Silva et al. 2017 ; Yong et al. 2019).

Pour estimer le potentiel de production d'énergie électrique à partir de la récupération du méthane des décharges, on utilise l'équation 6 :

$$E_P = \frac{\varepsilon \cdot Q_c \cdot \varphi_1}{\varphi_2} \dots \text{Eq 8}$$

$\varepsilon$  est le pouvoir calorifique inférieur du méthane,

$\varphi_1$  est l'efficacité de conversion électrique du moteur à combustion interne,

$\varphi_2$  est le facteur de conversion des MJ en kWh basé sur la chaleur contenue dans le méthane,

$Q_c$  est la quantité moyenne de méthane collectée par an (m<sup>3</sup>/an).

Cette dernière peut être obtenue en utilisant l'équation suivante :

$$Q_c = \lambda \cdot Q_g \dots \text{Eq 9}$$

$Q_g$  est la production moyenne de méthane par an et  $\lambda$  l'efficacité de la collecte.

Dans notre recherche, on a utilisé :

$$\varepsilon = 37,2 \text{ MJ/kWh}, \varphi_1 = 33\%, \varphi_2 = 3,6 \text{ et } \lambda = 75\% \text{ [12].}$$

Le potentiel de production d'énergie à partir du méthane provenant des CET, estimé à l'aide du modèle LandGEM a été évalué pour la période 2010-2110 afin de mieux cerner l'utilisation possible des déchets solides municipaux (DSM) dans la récupération d'énergie.

# **III. CHAPETR**

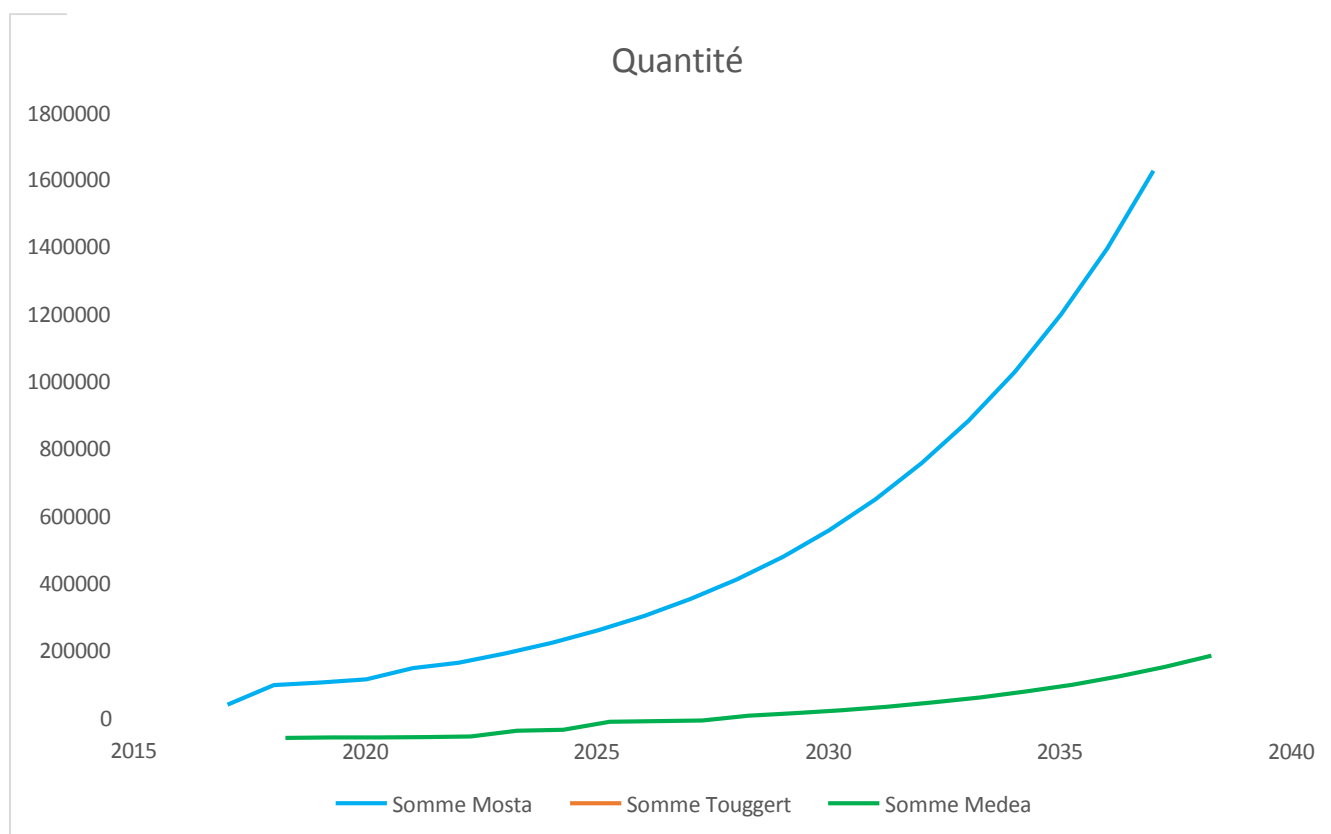
## **Résultats et discussion**

### III.1. Etude de gisement

L'Algérie, comme de nombreux pays en développement, est confortée à des défis majeurs en matière de gestion des déchets. Cette étude est un élément clés pour comprendre la quantité et la composition des déchets produits dans le pays, ainsi que les défis à relever pour améliorer la gestion des déchets.

#### III.1.1. Evaluation des quantités des déchets

L'Algérie produit environ 34 millions de tonnes de déchets par an, dont 13 millions de tonnes de déchets ménagers et similaires, dans ce cas, on a étudié 3 wilayas (Mostaganem, Medea, Touggert) :



**Figure III.1-1: les quantités des déchets de 3 wilayas**

Le graphique à l'étude nous apprend que la production de déchets a connu trois trajectoires distinctes mais inverses entre 2015 et 2040 au sein des wilayas de Mostaganem, Touggert et Medea. Mostaganem connaît l'envol le plus spectaculaire des quantités à traiter puisqu'elles semblent passer de 100 000 à plus de 1 600 000 tonnes, mettant sans doute à l'épreuve d'une urbanisation galopante ou d'une consommation impérative. À l'autre extrémité, Touggert offre une stabilité remarquable avec une production proche de l'immobilisme et qui peut s'expliquer

par une démographie stable ou tout simplement une bonne maîtrise des déchets humains. Reste à endiguer la progression qui s'emballe mais reste plus raisonnable à l'échelle de Medea, traduisant une croissance peut-être plus équilibrée mais qui prend nettement de l'ampleur. Coincées entre ces trois profils plus ou moins vertueux, les trois collectivités seraient bien inspirées de planifier une gestion des déchets adaptée à leurs problématiques.

- Mostaganem : croissance très forte surinvestir dans la gestion des déchets
- Touggert : production stable impliquer les efforts de gestion qualitative
- Medea : tension modérée anticiper dès à présent

### III.1.2. Composition des déchets :

Plusieurs facteurs ont une influence sur la composition des déchets ménagers, tels que le climat, le mode de vie, la situation géographique et les saisons. Les résultats d'analyses physiques des déchets ci-dessous :

*Tableau III.1-1: la composition des déchets da 3 wilayas*

Type de Déchet	Mostaganem	Medea	Touggert	MOYENNE NATIONAL
Matière Organique	59,66	55,48	48,53	72
Papier / carton	3,8	7,09	6,82	9
Plastique	17,06	15,11	16,57	10
Métaux	1,78	0,72	2,72	3
Textile	2,72	3,79	3,34	4
Déchets dangereux	0,92	1,29	0,9	Non spécifié
Inertes	0,62	0,23	1,1	Non spécifié
Autres	1,18	12,36	1,2	2
[13]				[14]

Le tableau illustre le type de déchets recyclables récupérés en porte-à-porte pour les villes de Mostaganem, Médéa et Touggert, en comparaison avec la moyenne nationale.

**a). Matières organiques :**

Les trois cités affichent un taux de matières organiques élevé, bien que ce dernier soit inférieur à la moyenne du pays, notamment à Touggert...

**b). Papier/Carton :**

Les taux observés sont tous en dessous de la moyenne nationale, ce qui pourrait indiquer une meilleure séparation ou une utilisation réduite de papier/carton.

**c). Plastiques :**

Les trois cités présentent un niveau de plastique plus élevé que la moyenne du pays, possiblement à cause d'une consommation excessive ou d'un déficit de recyclage.

**d). Métaux :**

Touggert se démarque par des performances supérieures à la moyenne nationale en matière de métaux, tandis que Médéa affiche des résultats bien inférieurs.

**e). Textile :**

Les proportions de déchets textiles sont inférieures à la moyenne nationale dans les trois villes qui pourraient ainsi fournir plus de textiles recyclés à d'autres zones.

**f). Déchets dangereux :**

Les trois villes sont au même niveau qu'à la moyenne nationale ou un peu en dessous, sauf pour Médéa où le pourcentage est légèrement plus élevé. Touggert la proportion de déchets inertes est au-dessus de la moyenne nationale, on remarque à l'inverse pour la ville de Médéa après pas de différence significative la moins grosse part de déchets inertes en proportion de la ménagère parmi les 3 villes étudiées.

**g). Déchets inertes :**

Médéa est la ville où la part de déchets à caractère inerte parmi les 3 villes étudiées est la plus faible, par opposition à Touggourt où elle est au-dessus de la moyenne nationale.

### *h). Autres déchets :*

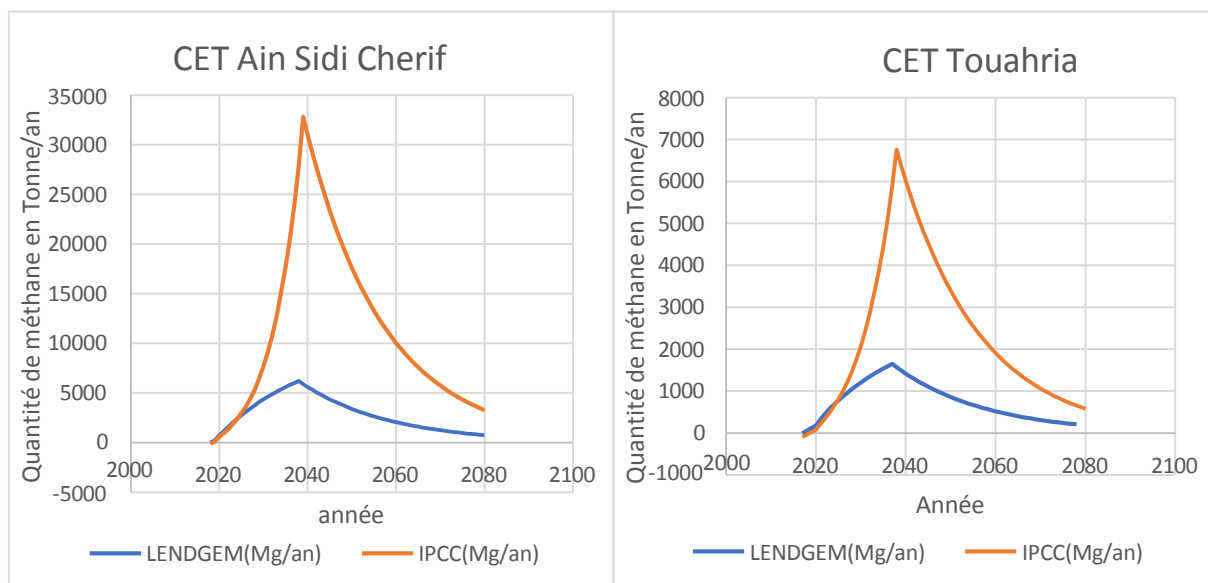
Dans la catégorie « Autres déchets », Médéa présente une part importante de déchets et élevée par rapport à la moyenne nationale à exploiter par l'intermédiaire d'un travail d'analyse complémentaire.

## **III.2. Evaluation du biogaz**

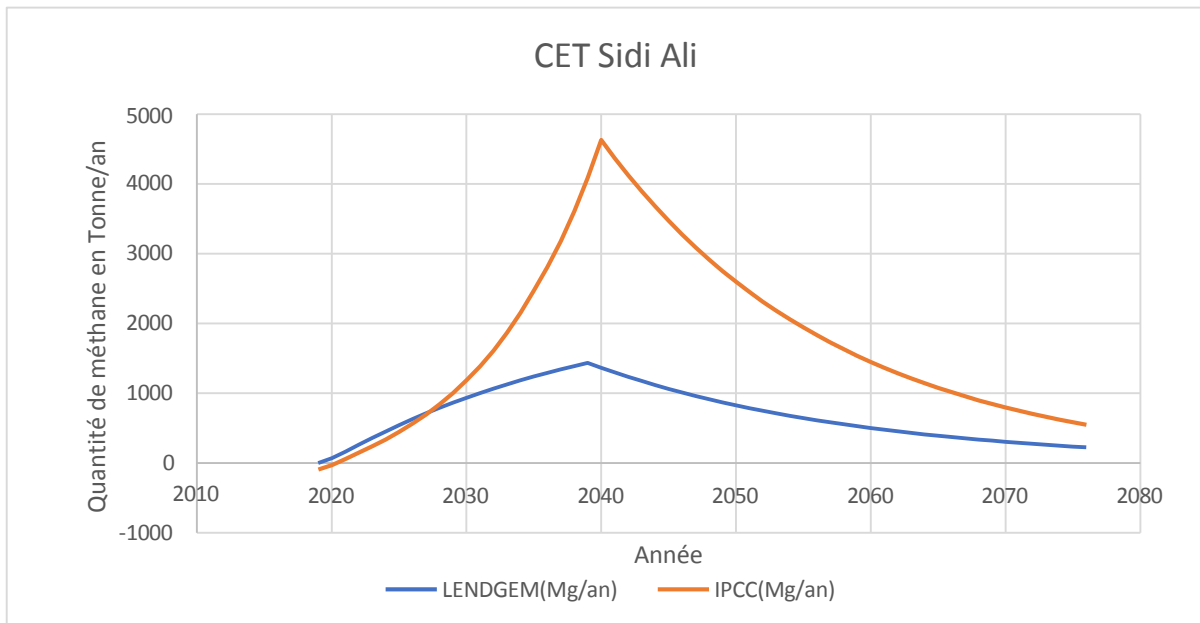
L'évaluation de ce potentiel est essentielle pour déterminer les opportunités et les défis liés à l'exploitation du biogaz dans le pays. Cette évaluation permettra de mieux comprendre les possibilités de production d'énergie renouvelable, de gestion des déchets et de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

### **III.2.1. Biogaz générés dans la wilaya de Mostaganem**

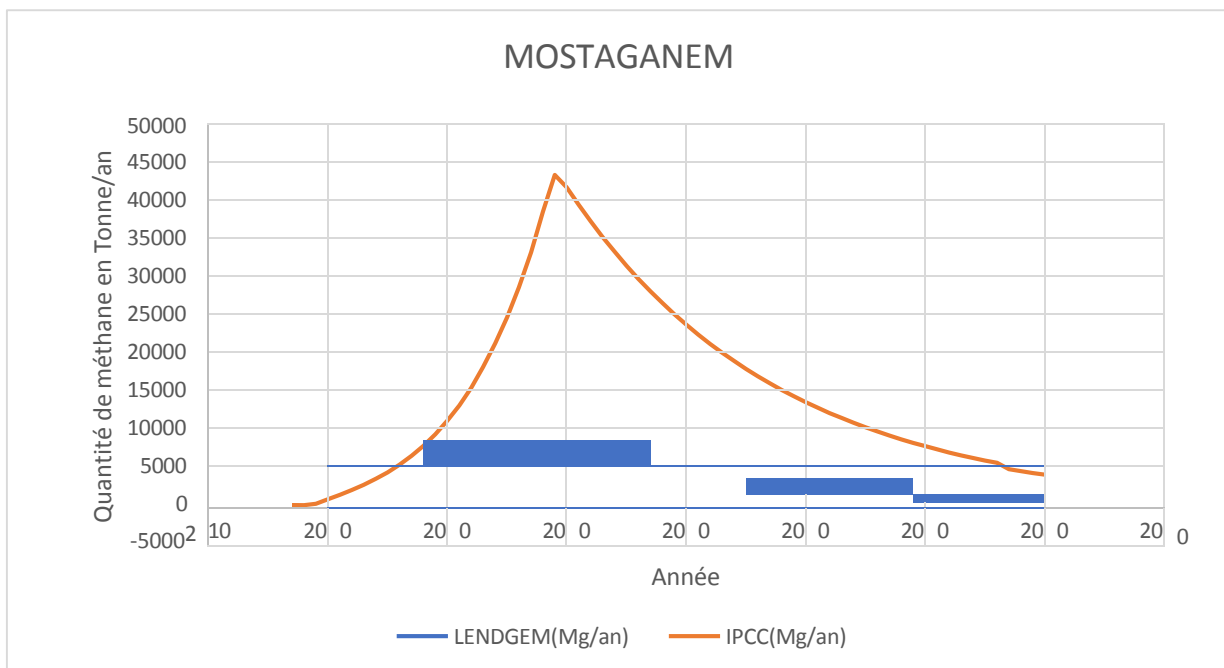
La wilaya de Mostaganem, située dans le nord-ouest de l'Algérie, dispose d'un potentiel important pour la production de biogaz grâce à ses ressources agricoles et à ses déchets organiques. La valorisation de ces ressources pourrait contribuer à la diversification de la matrice énergétique locale.



**Figure III.2-1: biogaz généré par le CET Ain Sidi Cherif et par le CET Touahria**



**Figure III.2-2: biogaz généré par le CET Sidi Ali**



**Figure III.2-3: biogaz généré par la wilaya de MOSTAGANEM**

C'est à travers l'évaluation de plusieurs centres d'enfouissement technique que l'étude consacrée à la valorisation du méthane produit à partir des déchets solides urbains dans la wilaya de Mostaganem a été réalisée dans une double approche de calculs, IPCC (méthode internationale) et LENGEM (méthode nationale). Les résultats obtenus diffèrent nettement aussi bien en termes de quantités estimées qu'au niveau du comportement temporel de la production.

En effet, globalement, en 2038, la méthode IPCC estime à 44 000 tonnes par an la production maximale alors que la méthode LENGEM estime celle-ci à seulement 13 000 tonnes par an. Le modèle IPCC est basé sur des hypothèses de dégradation plus optimistes que celles retenues par LENGEM en tant que modèle de référence adapté au contexte national.

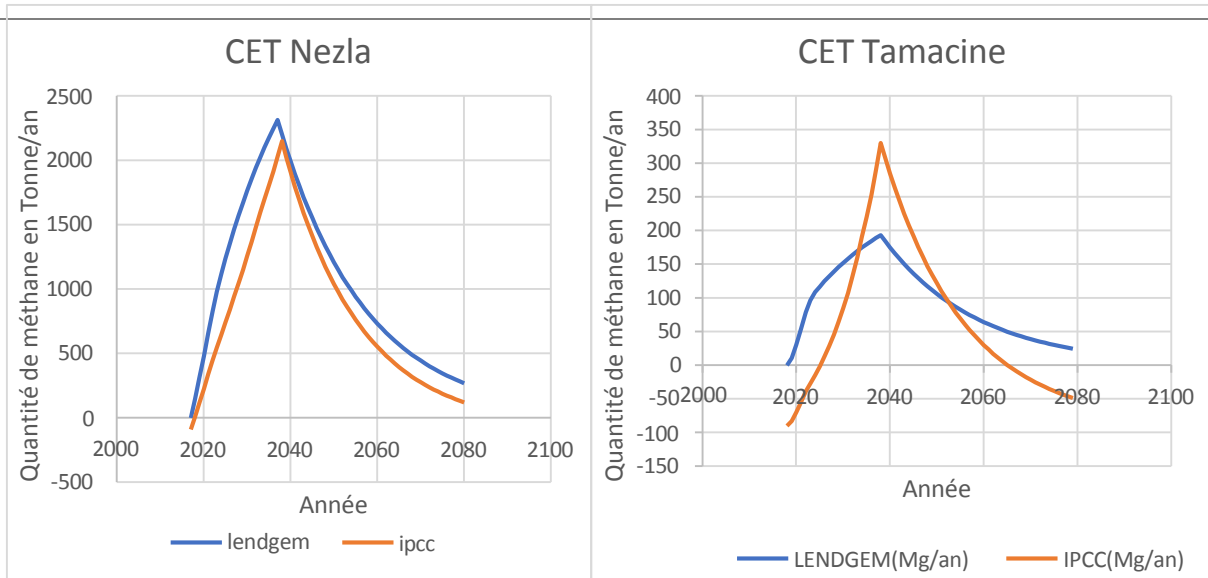
Parmi les sites évalués, le CET Ain Sidi Cherif est le principal producteur de méthane de la wilaya de Mostaganem et est estimé avoir une production maximale de méthane de l'ordre de 33 000 tonnes/an selon IPCC et de 7500 tonnes/an selon LENGEM. Dans cette perspective, ce site pourrait être une position stratégique probante en vue de la mise en œuvre d'une unité de valorisation énergétique.

Les CET de Touahria et de Sidi Ali ont, pour leur part, des rendements modestes (7 000 et 4 500 tonnes/an pour l'IPCC et 2 000 et 1 500 tonnes/an pour LENGEM), et ne montrent pas, en termes de volumes, des potentialités équivalentes, mais permettent néanmoins d'envisager des projets de valorisation de proximité et décentralisée, incluant des unités de taille réduite ou en cogénération.

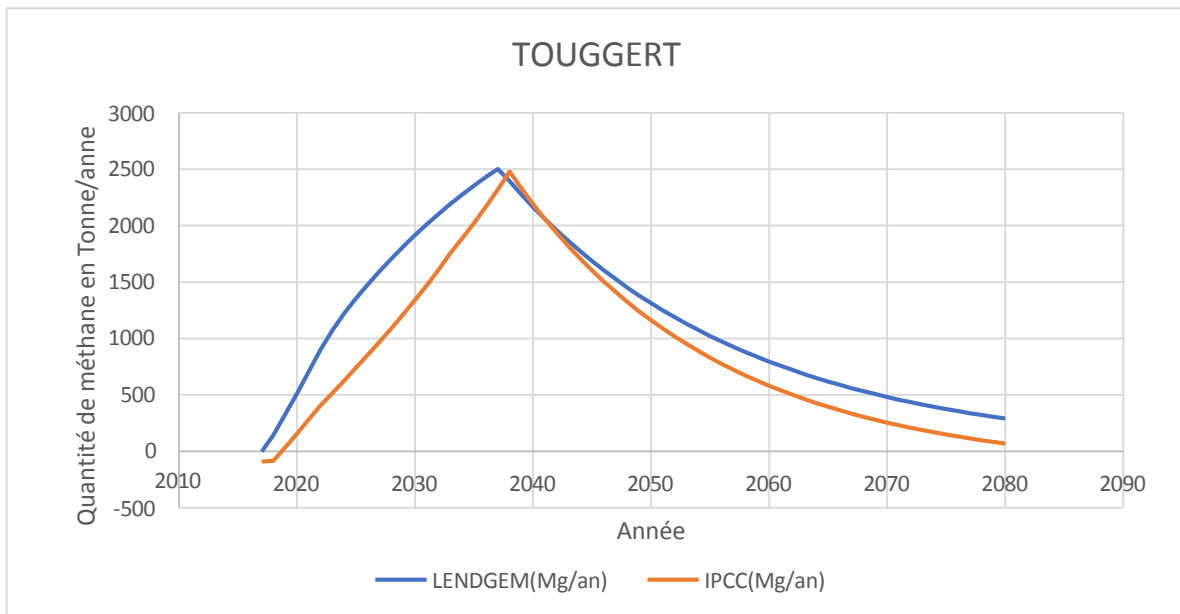
La période comprise entre 2030 et 2050 constitue dès lors une période clé pour la récupération et la valorisation du méthane sur la wilaya de Mostaganem, qui pourrait s'affiner pour tomber plus précisément au regard des estimations et des données de terrain dans l'optique d'une construction de scénarios réalistes de commercialisation du biogaz en termes d'injection dans le réseau gazier ou sous forme de production d'énergie renouvelable locale.

### **III.2.2. Biogaz généré dans la wilaya de Touggert**

La wilaya de Touggourt, située dans le sud-est de l'Algérie, dispose d'un potentiel pour la production de biogaz à partir de ses ressources agricoles et de ses déchets organiques. La production de biogaz dans cette région pourrait contribuer à la diversification de la matrice énergétique locale et à la gestion efficace des déchets.



**Figure III.2-4: biogaz généré par le CET Nezla et par le CET Tamacine**



**Figure III.2-5: biogaz généré par la wilaya de Touggert**

L’analyse des deux centres d’enfouissement technique (CET) localisés à la wilaya de Touggourt : Tamacine et Nezla, notamment la courbe exprimant la production globale montre des différences importantes entre volumes produits et profils d’évolution.

Au sein des espaces de la wilaya de Touggourt, l’étude de la production de biogaz permet d’identifier une forte dissymétrie entre Nezla et Tamacine au sein de la modélisation des

CET technique pour ce qui est tant de volume que de profil évolutif. En effet, le CET de Nezla fait état d'un niveau de production très nettement plus significatif au moment du maximum qui se situe entre 2038 et 2040, avec environ 2200 tonnes/an selon IPCC et 2000 tonnes/an selon LENGDEM pour la durée moyenne de référence au moment du grand maximum ; la courbe est en fait assez symétrique, sur la montée, puis après un ralentissement lent, l'intégralité du potentiel méthanogène du CET se dévoile au tumulte d'emblée, traduisant une exploitation rationnelle et plus contrôlée d'un site assez étendu. Il en va tout autrement du CET de Tamacine qui ne montre qu'un potentiel assez limité en déchets, le maximum de volume n'en demeure pas moins intéressant autour de 2040 de 320 tonnes/an (IPCC, LENGDEM) contre 220 tonnes/an en LENGDEM..., mais qui devra être considérablement diminué pour aller vers 130-140 au moment du déclin. La courbe montre une montée très rapide au moment de son capital initial, mais sans grands volumes, dépouillée encore au maximum aboutissant sur un déclin amorcé doucement.

En considérant l'ensemble des données à l'échelle de la wilaya, la courbe totale de la wilaya de Touggourt s'élève à 2 700 tonnes/an pour LENGDEM et 2 400 tonnes/an pour l'IPCC, ce qui corrobore bien les faibles performances du CET de Nezla, son principal pôle de production. Tamacine pèse encore peu dans ce total.

Au total, le CET de Nezla est la principale source de biogaz de la wilaya de Touggourt, ouvrant ainsi des perspectives réelles de valorisation énergétique des déchets. Le site de Tamacine, moins productif, pourrait être inclus dans une stratégie locale de valorisation des déchets et de production d'énergie renouvelable, à condition qu'il soit couplé à une gestion des déchets.

### **III.2.3. Biogaz générés dans la wilaya de Medea**

La wilaya de Médéa, située dans le nord de l'Algérie, présente des opportunités pour la production de biogaz à partir de ses déchets organiques et agricoles. Cette initiative pourrait réduire les émissions de gaz à effet de serre et créer des opportunités économiques pour la région.

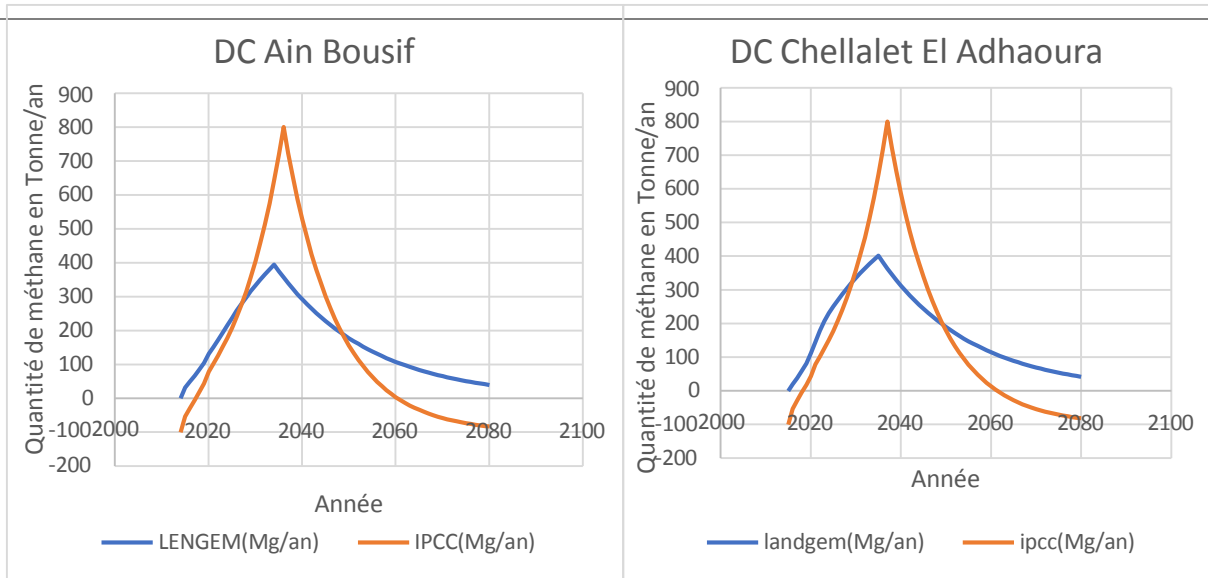


Figure III.2-6: biogaz généré par le DC Ain Boucif et par le DC Chellalet El Adhaoura

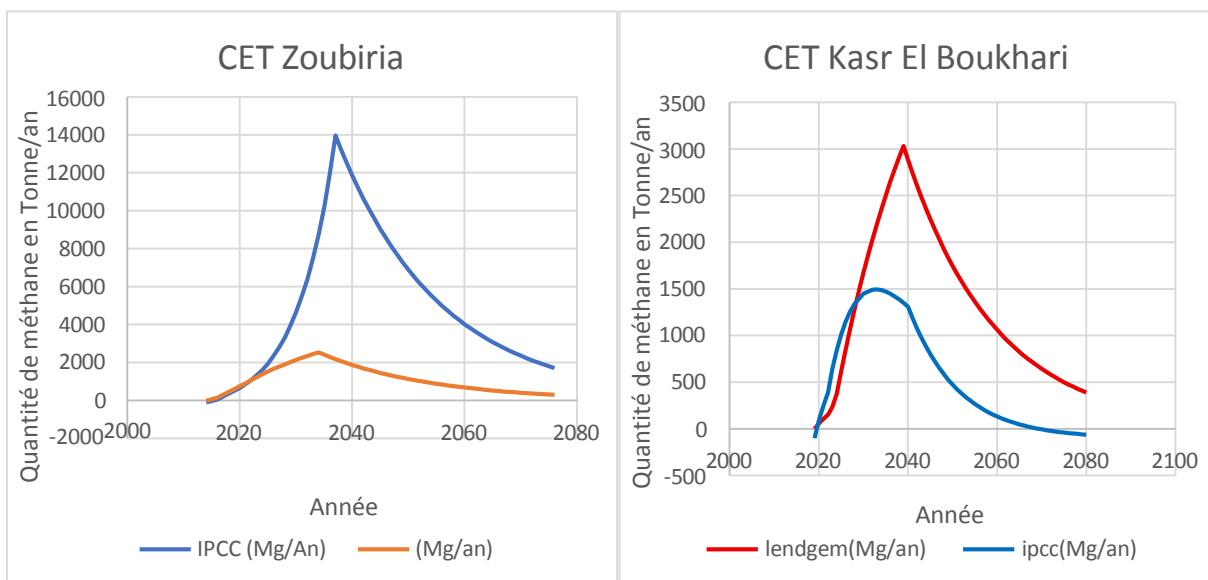
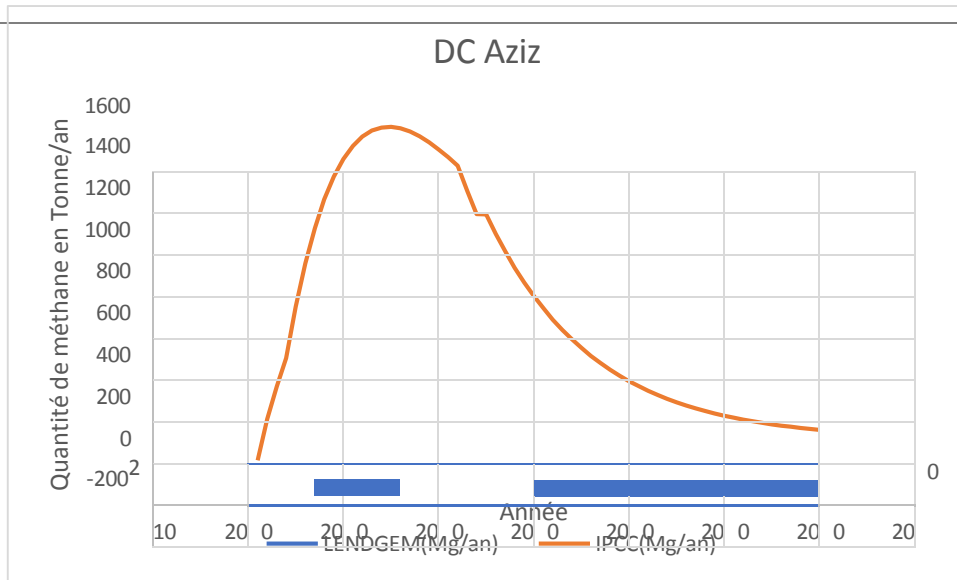
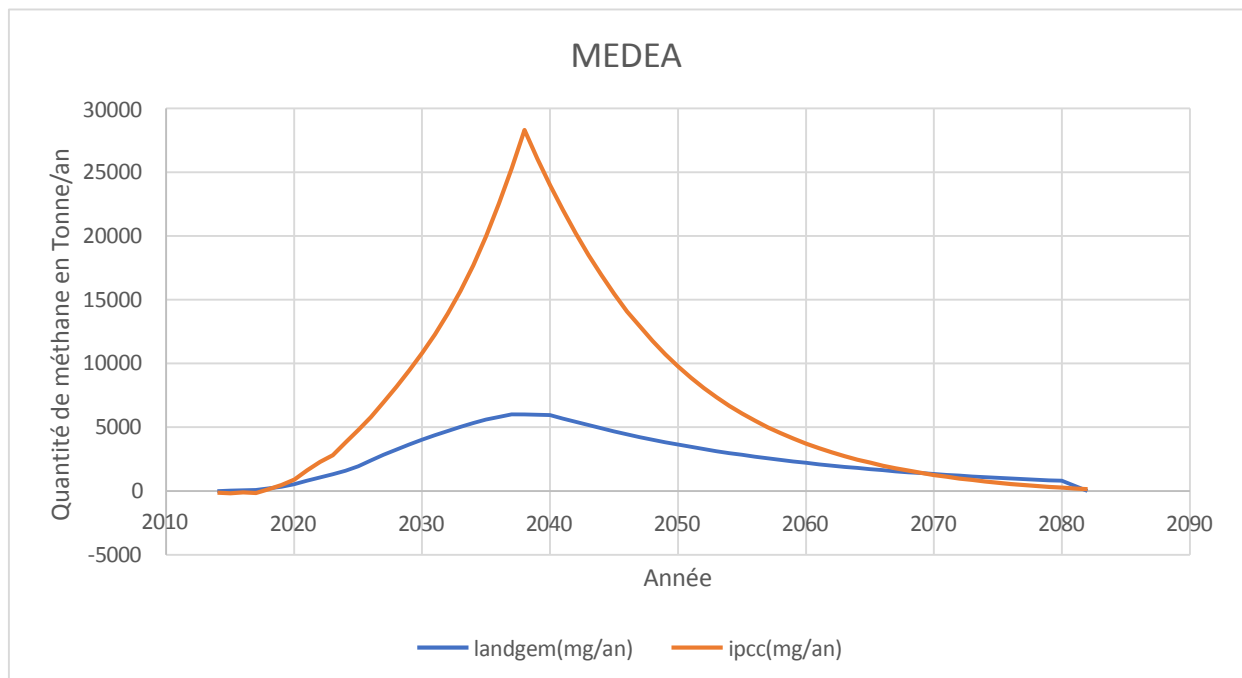


Figure III.2-7: biogaz généré par le CET Zoubiria et par le CET Kasr El Boukhari



**Figure III.2-8: biogaz généré par la DC Aziz**



**Figure III.2-9: biogaz généré par la wilaya de Medea**

L’analyse des quantités de méthane produites par les différents centres d’enfouissement et décharges contrôlées de la wilaya de Médéa, selon les méthodes IPCC et LENGEM, fait ressortir des écarts significatifs tant en termes de volumes que de dynamique temporelle.

La méthode IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), à portée internationale, estime des quantités de méthane bien plus élevées, atteignant un pic global d’environ 28 000 tonnes/an autour de 2038-2040, s’appuyant sur des coefficients d’émission recommandés,

intégrant des scénarios optimisés de dégradation. Quant à la seconde méthode, d'origine nationale (LENGEM), ses estimations, plus prudentes, ne dépassent pas 5 000 tonnes/an, tout en ayant une dynamique du même type, au sein du cadre spécifique attendu en Algérie.

La mise en développement commercial du biogaz, notamment par le biais d'unités de valorisation énergétique et/ou de production de biométhane, ne peut pas ne pas être précédée d'un passage à l'échelon local de l'essai de validation des hypothèses choisies pour assurer la rentabilité de ces projets.

D'un point de vue économique, il est intéressant d'évaluer la période 2030-2045 pour la commercialisation du méthane, les quantités atteignant leur maximum dans cette période. L'installation de systèmes de captage, de purification et d'injection dans le réseau gazier ou de cogénération électrique pourrait représenter une opportunité de diversification de la forme d'énergie pour la région, à condition d'effectuer une analyse coût-bénéfice sérieuse, en tenant compte des quantités réelles exploitables (sans doute intermédiaires entre les deux méthodes), des investissements nécessaires et du prix du gaz sur le marché.

### **III.3. Total Landfall Gas (les gaz d'enfouissement)**

Le modèle LandGem a été utilisé pour estimer les émissions de dioxyde de carbone, de méthane et de composés organiques non méthaniques (NMOC) provenant des gaz d'enfouissement. Ce calcul repose sur le rendement en méthane ( $L_0$ ), le taux de génération de méthane  $k$  et les NMOC. Cependant, ces derniers n'ont qu'un impact négligeable sur l'estimation globale des émissions (moins de 1%), car le modèle LandGem considère que le méthane et le  $CO_2$  constituent presque la totalité des émissions des gaz d'enfouissement.

*Tableau III.3-1: total Landfall Gas pour les 3 wilayas (7 CET, 3 DC)*

	LFG	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	NMOC	Année du pic
DC AIN BOUCIF	1,344E+06	6,721E+05	6,721E+05	5,377E+03	2035
DC CHELLALET EL ADHAOURA	4,130E+06	2,065E+06	2,065E+06	1,652E+04	2036
CET ZOUBIRIA	3,353E+07	1,676E+07	1,676E+07	1,341E+05	2040
CET KSAR EL BOUKHARI	1,877E+06	9,384E+05	9,384E+05	7,507E+03	2037
DC AZIZ	4,174E+06	2,087E+06	2,087E+06	1,670E+04	2039
CET AIN SIDI CHERIF	1,128E+08	5,638E+07	5,638E+07	4,510E+05	2038
CET TOUAHRIA	2,346E+07	1,173E+07	1,173E+07	9,383E+04	2039
CET SIDI ALI	1,617E+07	8,085E+06	8,085E+06	6,468E+04	2040
CET NEZLA	1,119E+07	5,594E+06	5,594E+06	4,475E+04	2038
CET TAMACINE	2,084E+06	1,042E+06	1,042E+06	8,335E+03	2038
<b>Moyenne Nationale</b>	2,108E+07	1,054E+07	1,054E+07	8,428E+04	2038

Les données présentées dans le tableau montrent que les centres d'enfouissement technique (CET) et les décharges contrôlées (DC) étudiés atteindront leur pic de production de gaz de décharge (LFG) entre 2035 et 2040, avec une moyenne nationale estimée autour de 2038. Ce délai traduit la dynamique naturelle de biodégradation anaérobie des matières organiques présentes dans les déchets ménagers.

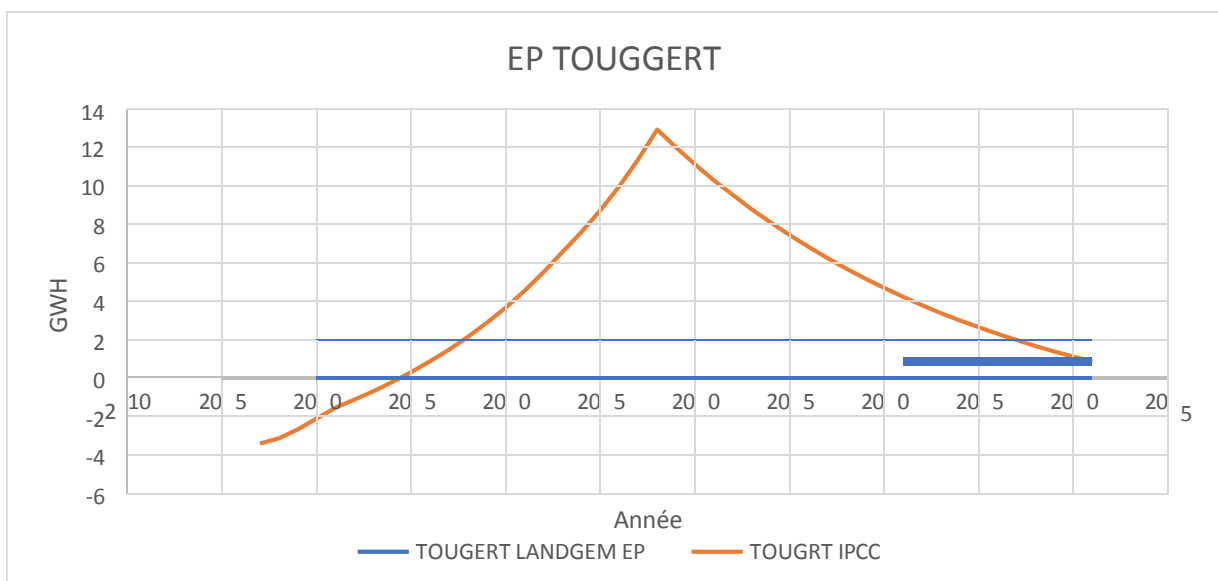
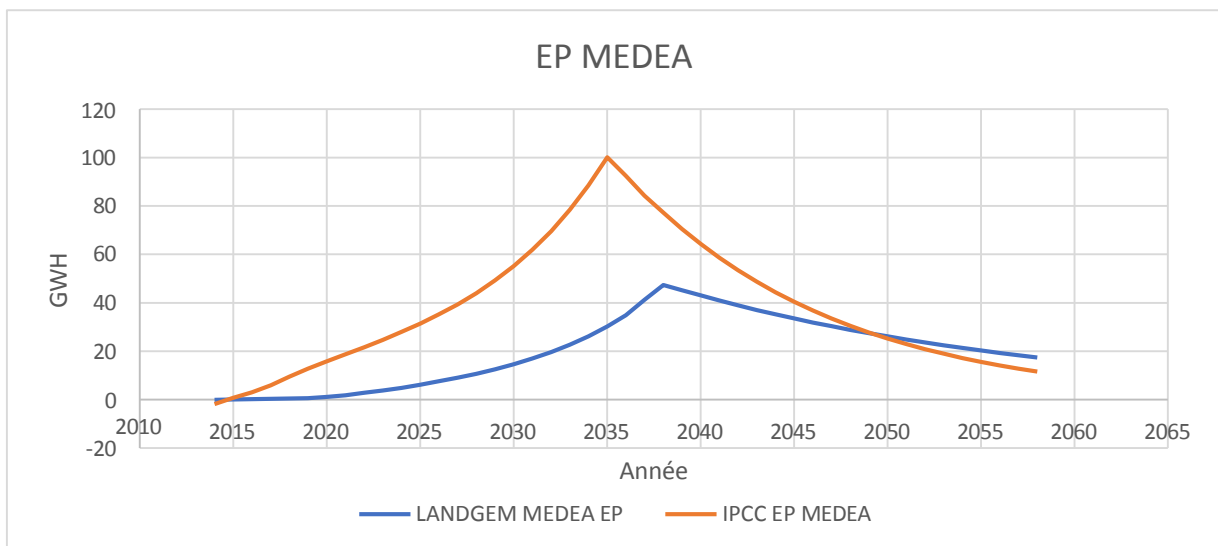
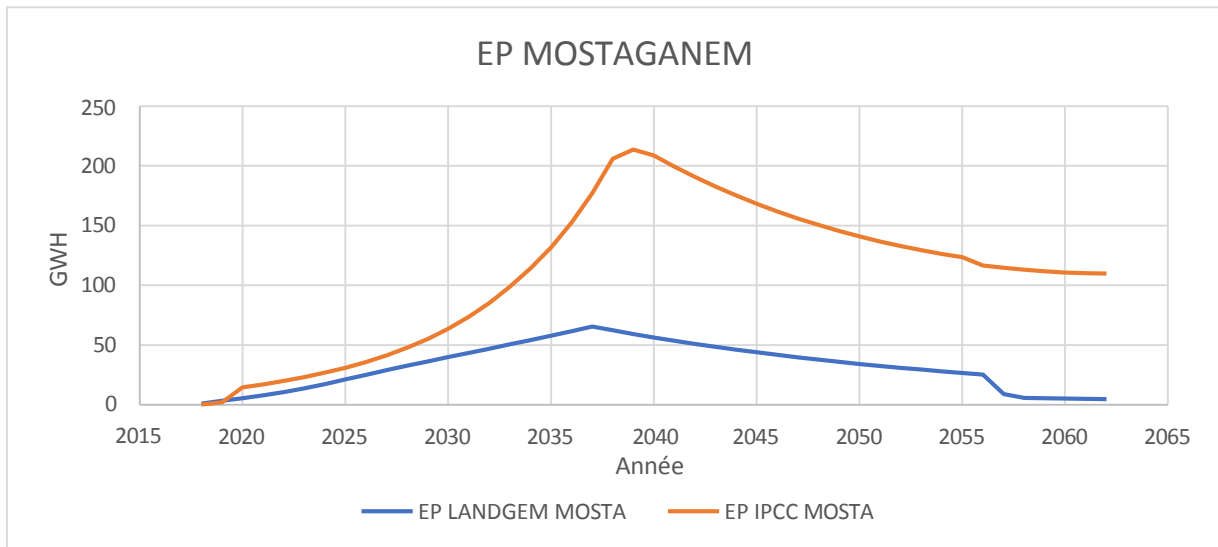
Les volumes de gaz produits varient significativement selon la quantité de déchets reçue par chaque site. Le CET Aïn Sidi Cherif se distingue comme le site le plus émetteur, avec une production annuelle projetée de 112,8 millions de m<sup>3</sup> de LFG, dont 56,38 millions de m<sup>3</sup> de méthane (CH<sub>4</sub>). Ce niveau de production confirme son rôle prépondérant dans les flux de gaz à effet de serre (GES) au niveau national.

À l'échelle nationale, la moyenne annuelle de production de LFG s'élève à 21,08 millions de m<sup>3</sup>, composée approximativement à parts égales de méthane (10,54 millions de m<sup>3</sup>) et de dioxyde de carbone (10,54 millions de m<sup>3</sup>), avec une fraction mineure de composés organiques non-méthaniques (NMOC), estimée à 84 280 m<sup>3</sup>/an. Cette répartition souligne la dominance du méthane dans les

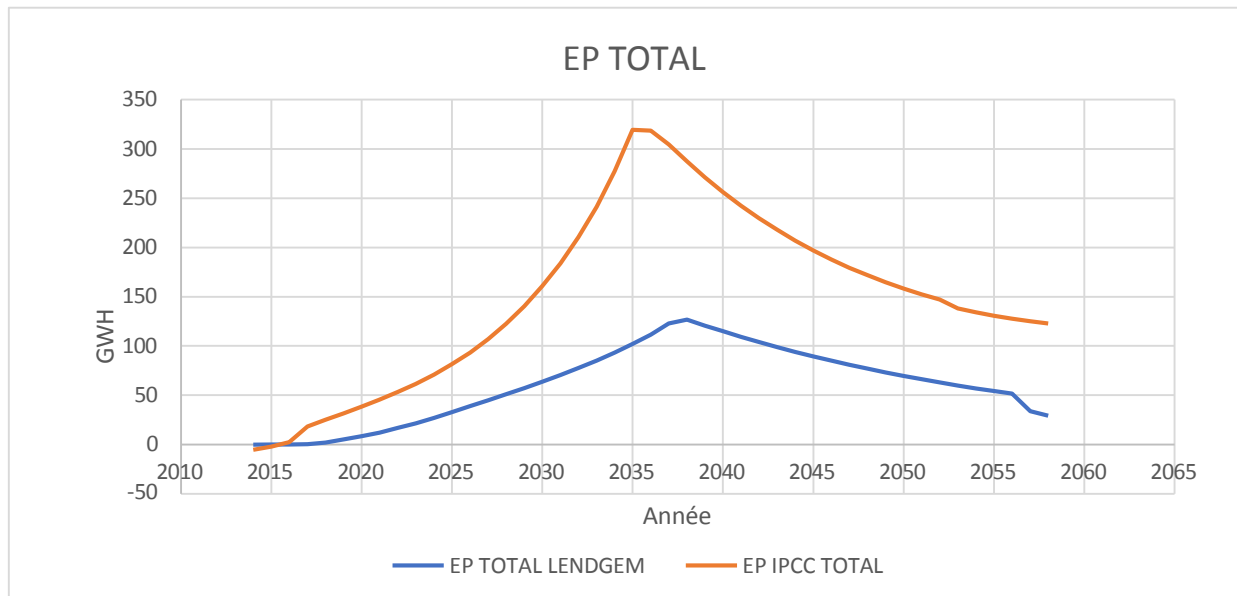
Émissions dèS CET, gaz dont le pouvoir réchauffant global est estimé à 28–36 fois supérieur à celui du CO<sub>2</sub> sur une période de 100 ans.

En absence de systèmes efficaces de captage et de valorisation, ces émissions contribuent de manière significative aux changements climatiques globaux. En revanche, si elles étaient correctement exploitées, ces quantités représentent un potentiel énergétique important, pouvant être converti en électricité ou chaleur, et ainsi participer activement à la transition énergétique du pays.

### III.4. Potentiel énergétique



**Figure III.4-1: potentiel énergétique de les 3 wilayas (MOSTAGANEM, MEDEA, TOUGGERT]**



**Figure III.4-2: potentiel énergétique total pour les 3 wilayas**

L'analyse des graphiques relatifs à la capacité de production d'électricité potentiellement associée à l'exploitation du biogaz dans les trois wilayas fera ici l'objet d'une comparaison. On aperçoit des courbes assez différentes aussi bien en matière de volume que de calage temporel des surcroîts.

Mostaganem se distingue tout particulièrement par son potentiel énergétique plus important que deux autres wilayas. Avec la méthode IPCC, la production d'électricité à partir du biogaz est au maximum de plus de 210 GWh/an autour de 2037, tandis que la méthode LENGDEM situerait ce maximum autour de 85 GWh/an. Cette performance s'explique par la population et la quantité de déchets qui alimentent bien les CET de la région.

Médéa, au contraire est de potentiel intermédiaire, avec un maximum énergétique estimé autour de 95 GWh/an (IPCC) et 35 GWh/an (LENGDEM), à peine au-dessus de Mostaganem. Malgré une production moins conséquente, ce territoire affiche un profil énergétique exploitable, surtout pour des installations locales ou des réseaux autonomes.

Touggourt enfin affiche le plus faible potentiel des trois wilayas. Le maximum atteint est autour de 13 GWh/an pour l'IPCC, et de 6 GWh/an pour la méthode LENGDEM. Cette

Production résiduelle est certainement liée à un volume de déchets à la population moins dense et à une industrie réduite.

Pour résumer la situation, la comparaison met en évidence que Mostaganem serait pour la valorisation énergétique du biogaz le plus avantage, suivi par le profil de Médéa qui révèle des potentiels corrects, et enfin le schéma d'exploitation de Touggourt qui semblerait en retrait. Il faut cependant relever qu'une faible production sur des territoires isolés comme Touggourt n'est pas stérile pour le projet d'autonomie énergétique de l'espace. L'association de ces trois types de profils révèle la nécessité de calibrer les stratégies de valorisation aux spécificités locales, selon le potentiel de gisement qu'offre le territoire et le niveau des besoins énergétiques qu'il requiert.

### **III.5. Impact environnementale**

Les résultats obtenus montrent que les centres d'enfouissement technique (CET) des wilayas étudiées — Médéa (902,082 tonnes/jour), Mostaganem (733,288 tonnes/jour) et Touggourt (82,191 tonnes/jour) — génèrent annuellement des quantités significatives de gaz à effet de serre (GES). Selon les estimations du modèle LandGEM, ces émissions s'élèvent respectivement à 1 961,279 Mg/an pour Médéa, 4 208,969 Mg/an pour Mostaganem et 1 356,213 Mg/an pour Touggourt. Ces valeurs devraient connaître une augmentation notable d'ici 2035, atteignant respectivement 5 602,547 Mg/an, 8 387,848 Mg/an et 2 356,069 Mg/an, soit un total cumulé de 408,88 Gg éq. CO<sub>2</sub>. Ce niveau d'émission illustre le rôle important joué par ces sites dans le réchauffement climatique global.

En parallèle, ces mêmes volumes de méthane, largement perdus à l'atmosphère, représentent un potentiel énergétique considérable. En effet, leur valorisation pourrait permettre la production d'environ 102 GWh/an d'électricité renouvelable d'ici 2035. Une telle récupération contribuerait non seulement à atténuer les impacts environnementaux liés aux émissions de GES, mais aussi à diversifier les sources d'énergie nationales tout en favorisant une transition énergétique durable.

Ainsi, l'absence de systèmes efficaces de captage et de valorisation du biogaz constitue une double perte : écologique, par l'augmentation des émissions de méthane — gaz bien plus puissant que le CO<sub>2</sub> —, et économique, par le gaspillage d'une ressource énergétique locale sous-exploitée. La mise en œuvre rapide de stratégies de gestion intégrée des déchets, couplée à des technologies modernes de traitement du biogaz, apparaît donc comme une priorité pour

Transformer ces sources d'émissions polluantes en opportunités énergétiques et environnementales.

---

### Conclusion :

---

Au terme des travaux menés, l'on peut conclure sans ambages que la valorisation du biogaz provenant de centres d'enfouissement technique (CET) permettra d'envisager la production d'énergie renouvelable en Algérie, en regard du potentiel méthanogène important mis en évidence dans les wilayas de Mostaganem, Médéa et Touggourt à partir de déchets solides urbains, bien que les sites présentent d'importantes disparités en termes de volumes traités, de chronologie de pic de production et d'intensité d'exploitation.

Les courbes fournies selon les méthodes IPCC et LENGDEM montrent qu'en général, les CET de ces régions suivent une courbe en cloche, avec une montée progressive et atteinte d'un pic de biogaz entre 2035 et 2040, suivi d'un déclin régulier. Mostaganem est particulièrement mise en avant, avec des quantités de production de biogaz particulièrement importantes, au CET de Ain Sidi Cherif, en particulier, alors que Médéa présente un profil produisant une plus faible intensité mais plus régulière de biogaz. Pour sa part, Touggourt, avec ses volumes plus limités, propose un intéressant gisement de valorisation pour le milieu semi-désertique.

Il convient aussi de rappeler que la comparaison des deux méthodes de calcul utilisées perçues dans ce chapitre atteste d'un choix méthodologique. La méthode IPCC tend à surestimer les volumes par rapport à l'usage de LENGDEM qui semble assimiler assez bien les réalités locales. L'exposé sur la nécessité de contextualiser les modèles d'étude, de même que de valider les projections par des mesures de terrain, paraît pertinent à ce stade de notre réflexion.

Sur le plan énergétique, la valorisation du méthane par sa récupération à présent pour produire de l'électricité constitue l'opportunité double d'atténuer l'empreinte environnementale des sites de décharges à ciel ouvert tout en contribuant à la portion des énergies renouvelables dans le mix énergétique des pays. Dans le cas de l'Algérie où les ressources fossiles dominent encore largement, ceci pourrait être l'occasion d'amorcer le développement de filières de biogaz qui favoriserait la transition énergétique et la décentralisation de l'électricité en milieu rural et particulièrement dans les zones isolées.

Il convient dans ce cadre de rappeler que la valorisation énergétique des déchets en Algérie sera à saisir à condition de promouvoir des politiques publiques et d'initier les nécessaires aptitudes techniques en matière de communes pour attirer les investissements spécifiques à sa réalisation et opter pour une gestion durable des déchets qui pourrait conférer un développement plus propre, plus résilient et plus équitable.

---

**Référence bibliographique :**

---

- [1] Guermoud, N., Bouzid, H., & Benderdouche, N. (2023). Treatment of household waste leachates of the city of Mostaganem using the up-flow anaerobic sludge blanket technique. *Desalination and Water Treatment*, 307, 251–257. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29916>
- [2] Eyebiyi, E. P. (2010). *Gérer les déchets ménagers en Afrique : Le Bénin entre local et global* (Coll. Études africaines). Paris, France : L'Harmattan. 224 pages. ISBN 978-2-296-13337-2
- [3] *Rapport sur la caractérisation des déchets ménagers et assimilés en Algérie pour l'année 2014*. Alger.
- [4] Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank. <http://hdl.handle.net/10986/30317>
- [5] Sauri-Riancho, M. R., Gamboa-Marrufo, M., Reza-Bacelis, G., Cahuich-Poot, N., Méndez-Novelo, R., & Stentiford, E. I. (2013). Superficial methane emissions from a landfill in Merida, Yucatan, Mexico. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 1 (3), 299–310. [https://doi.org/10.1016/S1405-7743\(13\)72244-3](https://doi.org/10.1016/S1405-7743(13)72244-3)
- [6] ADEME. 2001. *Gérer le gaz de décharge : techniques et recommandations* (Brochure, 145 p. ; Collection « Connaître pour agir : guides et cahiers techniques »). Angers, France : ADEME.
- [7] SOLAGRO. 2009. *Techniques de production d'électricité à partir de biogaz et de gaz de synthèse* (Étude RECORD no 07-0226/1A, 253 p.). Toulouse, France
- [8] Nicolas Dupont. *Valorisation du biogaz de fermentation : combustion catalytique*. Thèse de doctorat. Université Claude Bernard - Lyon I, 2010.
- [9] Bilal Abderezzak. *Optimisation de l'utilisation du biogaz des méthaniseurs*. Thèse de Magister. Université M'hamed Bougara, Boumerdes. 20 juin 2011
- [10] Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani et al. (Eds.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*

Change. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>

[11] Srivastava, A. N., & Chakma, S. (2024). Quantification of landfill gas generation and energy recovery estimation from the municipal solid waste landfill sites of Delhi, India. *Energy Sources, Part A : Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 46 (1), 7453–7466.

[12] Ogunjuyigbe, A. S. O., Ayodele, T. R., & Alao, M. A. (2017). Electricity generation from municipal solid waste in some selected cities of Nigeria: An assessment of feasibility, potential and technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 149–162. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.177>

[13] Agence Nationale des Déchets. (2024). Rapport sur les niveaux de gaspillage alimentaire chez les familles algériennes et les différents opérateurs économiques publics et privés.

[14] SNGID. (2035). Stratégie nationale sur la gestion intégrée des déchets : programme de soutien à la politique du secteur environnemental en Algérie, étude sur la stratégie nationale et le plan d'action pour la gestion intégrée et la valorisation des déchets à l'horizon 2035.

Consulté en septembre 2020, à l'adresse : <https://www.me.gov.dz/fr/dechets-etrecyclage/>