

Université kasdi merbah - Ouargla
Faculté des Hydrocarbures, des Energies Renouvelables et des Sciences de
la terre et de l'univers
Département des Energies Renouvelables



MÉMOIRE DE MASTER ACADÉMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Énergies Renouvelables En Mécanique

Présenté par :

Aymen Talbi

Aouam Baba Ali

Thème

**VALORISATION ÉNERGÉTIQUE DES DÉCHETS MÉNAGERS COMME
LEVIER DU DÉVELOPPEMENT DURABLE : APPROCHE JURIDIQUE,
TECHNIQUE, ÉCONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE.**

Soutenu publiquement

Le : 02 / 06 / 2026

Devant le Jury :

Mr.	Ben Menin Djamel	Professeur	Président	UKM Ouargla
Mr.	Zobeidi Chahinaz	M.C.A	Examinatrice	UKM Ouargla
Mr.	Berrbeuh Med Hafed	M.C.A	Encadreur	UKM Ouargla

Année universitaire : 2025 / 2026

Remerciements

نشكر الله عز وجل الذي انعم علينا بإتمام هذا العمل المتواضع, فبقدرته و عونه كانت لنا القوة والصبر لمواصلة إتمام هذا العمل, كما نتقدم بجزيل الشكر وعظيم الامتنان وعميق التقدير إلى أستاذنا الفاضل المشرف:

الدكتور بربح محمد الحافظ

لقبوله الإشراف على هذا العمل, ولما منحه لنا من وقت وجهد وتوجيه و إرشاد وتشجيع لإنجاز هذه المذكرة كما لا يفوتونا أن نتقدم بجزيل الشكر إلى أستاذينا الكرمين عضوي لجنة المناقشة:

رئيس اللجنة البروفيسور جمال بن منين

والأستاذة المناقشة الدكتورة زبيدي شاهيناز

كما لا يفوتنا أن نتقدم بجزيل الشكر إلى موظفي وعمال مؤسسة مراكز الردم التقني بورقلة وبالأخص عمال مركز الردم بامنديل كما نخص بالشكر كل من السيد دوادي عبد السلام لوقوفه معنا وعلى ما قدموه لنا من معلومات كافية وقيمة.

كما لا ننسى أن نشكر والدينا الكريمين وأصدقائنا وجميع الأسرة الجامعية ونخص بالذكر السيد غربي ابراهيم رئيس قسم الطاقات المتجددة و الدكتور بلطرش جمال الدين و كل أساتذة قسم الطاقات المتجددة وكل من ساندنا وشجعنا من بعيد وقريب ولو بكلمة أو دعوة صالحة

طالبي أيمن و عوام بابا علي

Dédicace

(وَقُلْ رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا)

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، وبفضله تتحقق الأمنيات، وبعونه تصل الخطى إلى غاياتها. له الشكر أولاً وآخرًا، ظاهرًا وباطنًا.

لم تكن الرحلة قصيرة ولا ينبغي لها أن تكون لم يكن الحلم قريبًا ولا الطريق كان محفوفًا بالتسهيلات لكني فعلتها و نلتها.

لى الذي زين اسمي بأجمل الألقاب، من دعمني بلا حدود وأعطاني بلا مقابل..

من علمني أن الدنيا كفاح داعمي الاول في مسيرتي و سندي وقوتي وملاذي بعد الله

إلى فخري واعتزازي

... ابي...

إلى من جعل الله الجنة تحت أقدامها واحتضني قلبا قبل يدها وسهلت لي الشدائد بدعائها إلى القلب الحنون والشمعة التي كانت لي في

الليالي المظلمات سر قوتي ونجاحي

...امي...

إلى ضلعي الثابت وأمان ايامي الى من شددت عضدي بهم فكانوا لي ينابيع ارتوي منها إلى خيرة أيامي وصوفتها إلى قرة عيني

... إخوتي...

صديق الطفولة و رفيقي : بن سعيد عبد الرؤوف

الى الدكتور غربي ابراهيم رئيس قسم الطاقات المتجددة والدكتور جمال الدين بلطرش على ما قدموه لي من دعم و تحفيز طوال مسيرتي

الأكاديمية

الى كل اساتذة قسم الطاقات المتجددة كل بإسمه و جميل وسمه و رتبته

الى الانسة جديعي اسمهان التي ساندتني ووقفت جانبي طوال مسيرتي الدراسية

لكل من كان عوناً وسنداً في هذا الطريق... للأصدقاء الأوفياء ورفقاء السنين (مريم , عزيز , سفيان , إلياس , طاه , حيدر)

زملائي و زميلاتي في المنظمة الوطنية للتضامن الطلابي لأصحاب الشدائد والأزمات

الى كل الطاقم الإداري لجامعة قاصدي مرباح و الخدمات الجامعية ومن تسنى لي العمل معهم خلال مسيرتي النضالية

أيمن طالبي

بسم الله و الصلاة و السلام على رسول الله صلى الله عليه و سلم

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات ، نشكر الله تعالى على توفيقه لنا لاتمام هذا العمل المتواضع

نهدي ثمرة هذا الجهد الى الوالدين الكريمين ، حفزهما الله ادام عليهما بالصحة و العافية عرفانا بما قدماه من جهد طوال مسيرتنا الدراسية كما نهدي هذا العمل

الى جميع العائلة و الاصدقاء و كل من ساندنا من قريب او من بعيد .

نتقدم بأسمى عبارات الشكر و التقدير الى كل الاسرة الجامعية عامة و قسم الطاقات المتجددة بصفة خاصة على ما قدموه لنا من تكوين علمي و معرفي طيلة

السنوات الدراسية كما نتوجه بجزيل الشكر الى رئيس القسم الدكتور غربي ابراهيم على جهوده المبذولة و حرصه الدائم على الارتقاء بمستوى التكوين .

كما نتقدم بخالص الامتنان الى مؤطرنا ، الدكتور بربح محمد الحافظ على ما قدمه لنا من نصائح علمية و توجيهات قيمة التي ساهمت بشكل كبير على انجاز هذه

المذكرة .

ولا يفوتنا ان نشكر جميع الاساتذة الأفاضل الذين كانت لهم بصمة في تقديم تكويننا متميزا دون استثناء الذين كان لهم دورا كبيرا في مسيرتنا العلمية ، و في

الاخير نسأل الله تعالى ان يجزي الجميع خير الجزاء

عوام بابا علي

Table des matières

.1	Lettres latines	
.2	Lettres grecques	

Introduction générale	1
------------------------------	----------

Chapitre I : Gestion des déchets ménagers et problématique des centres d'enfouissement techniques		3
I.3	Introduction	4
I.4	Généralités sur les déchets ménagers.....	4
I.4.1	Définition des déchets ménagers.....	4
I.4.2	Origine et sources des déchets.....	5
I.4.3	Classification des déchets ménagers	5
I.4.4	Composition et caractéristiques physico-chimiques.....	7
I.5	Impacts environnementaux et économiques des déchets ménagers	8
I.5.1	Pollution de l'air.....	8
I.5.2	Pollution des eaux et des sols	9
I.5.3	Risques sanitaires	10
I.5.4	Coûts économiques liés à la gestion des déchets	10
I.6	Gestion des déchets ménagers	10
I.6.1	Collecte et transport	10
I.6.2	Tri et traitement.....	11
I.6.3	Recyclage et valorisation	12
I.6.4	Politique de gestion des déchets en Algérie.....	13
I.7	Centres d'enfouissement techniques (CET)	13
I.7.1	Définition et rôle des CET.....	13
I.7.2	Conception et fonctionnement des CET.....	13
I.7.3	Systèmes de traitement des lixiviats	15
I.7.4	Systèmes de captage des biogaz.....	15
I.8	Performances environnementales et économiques des CET	16
I.8.1	Évaluation environnementale des CET.....	16
I.8.2	Coûts d'exploitation et de gestion.....	17
I.8.3	Avantages des CET.....	17
I.8.4	Limites des CET.....	17
I.9	Nécessité des solutions alternatives.....	18
I.9.1	Saturation des CET.....	18
I.9.2	Émissions de gaz à effet de serre.....	18

I.9.3	Contraintes environnementales et économiques.....	18
I.9.4	Transition vers la valorisation énergétique.....	18
I.10	Conclusion.....	19
Chapitre II	Valorisation énergétique des déchets ménagers et développement durable	20
II.1	Introduction	21
II.2	Généralités sur la valorisation énergétique.....	21
II.2.1	Définition et principes.....	21
II.2.2	Types de valorisation énergétique.....	22
II.2.3	Importance énergétique et environnementale	23
II.3	Technologies de valorisation énergétique des déchets ménagers	23
II.3.1	Incinération avec récupération d'énergie	23
II.3.2	Méthanisation des déchets organiques	24
II.3.3	Production et valorisation du biogaz	25
II.3.4	Pyrolyse et gazéification.....	25
II.4	Dimension environnementale de la valorisation énergétique.....	26
II.4.1	Réduction des émissions de gaz à effet de serre	26
II.4.2	Réduction des volumes de déchets enfouis	26
II.4.3	Protection des ressources naturelles	26
II.4.4	Contribution à l'économie circulaire	26
II.5	Dimension juridique et réglementaire	28
II.5.1	Cadre juridique international.....	28
II.5.2	Réglementation algérienne relative aux déchets	28
II.5.3	Lois liées à la protection de l'environnement	29
II.5.4	Acceptabilité sociale et sensibilisation environnementale.....	29
II.6	Dimension économique de la valorisation énergétique	30
II.6.1	Production d'énergie et rentabilité.....	30
II.6.2	Réduction des coûts d'enfouissement.....	31
II.6.3	Création d'emplois verts	31
II.6.4	Investissements et contraintes financières.....	32
II.7	Contribution de la valorisation énergétique au développement durable.....	32
II.7.1	Dimension environnementale	32
II.7.2	Dimension économique.....	32
II.7.3	Dimension sociale	33
II.7.4	Perspectives de développement durable en Algérie	33
II.8	Conclusion.....	33
Chapitre III	Potentiel énergétique du CET d'Ouargla	34
III.1	Introduction	35
III.2	Présentation du Centre d'Enfouissement Technique d'Ouargla.....	35

III.2.1	Localisation géographique	35
III.2.2	Conditions climatiques	35
III.2.3	Couverture démographique et communes desservies	36
III.2.4	Caractéristiques techniques du site.....	36
III.2.5	Exploitation actuelle et enjeux.....	36
III.3	Quantité et composition des déchets ménagers au CET d'Ouargla	37
III.3.1	Quantité annuelle et répartition des déchets reçus	37
III.3.2	Composition des déchets ménagers	38
III.3.3	État actuel du recyclage et perte de potentiel de valorisation	40
III.4	Évaluation du potentiel énergétique par le modèle du GIEC (IPCC).....	40
III.4.1	Équation du modèle	40
III.4.2	Paramètres retenus	41
III.4.3	Production annuelle de méthane	41
III.5	Potentiel énergétique du biogaz.....	42
III.5.1	Énergie brute produite.....	42
III.5.2	Production électrique récupérable	42
III.5.3	Interprétation des résultats.....	43
III.6	Dimensionnement préliminaire d'un système de captage et de valorisation du biogaz.....	43
III.6.1	Scénario technologique proposé.....	43
III.6.2	Réseau de captage du biogaz.....	44
III.6.3	Traitement du biogaz avant valorisation.....	44
III.6.4	Groupe électrogène à biogaz.....	45
III.6.5	Adaptation au contexte saharien	45
III.6.6	Synthèse du dimensionnement.....	46
III.7	Analyse économique du projet	46
III.7.1	Investissement initial (CAPEX).....	46
III.7.2	Coûts d'exploitation annuels (OPEX)	47
III.7.3	Revenus annuels générés	47
III.7.4	Indicateurs de rentabilité	48
III.7.5	Discussion économique	48
III.8	Impacts environnementaux et contribution au développement durable.....	49
III.8.1	Réduction des émissions de gaz à effet de serre	49
III.8.2	Réduction des nuisances environnementales	49
III.8.3	Contribution au développement durable.....	49
III.8.4	Comparaison entre le scénario actuel et le scénario proposé.....	50
III.9	Conclusion.....	51

Liste des figures

I.1	Évolution projetée de la production mondiale des déchets ménagers (2016–2050)	5
I.2	Classification simplifiée des déchets ménagers.....	7
I.3	Composition des déchets ménagers en Algérie.....	8
I.4	Schéma des flux d'émissions atmosphériques d'un centre d'enfouissement technique (CET).....	9
I.5	Schéma simplifié de gestion intégrée des déchets ménagers.....	12
I.6	Structure simplifiée d'un centre d'enfouissement technique	14
I.7	Schéma simplifié d'une installation de captage et de valorisation du biogaz de CET.....	16
I.8	Transition des centres d'enfouissement techniques vers les systèmes de valorisation énergétique.....	19
II.1	Hiérarchie des modes de traitement des déchets	22
II.2	Schéma simplifié d'une unité d'incinération avec récupération d'énergie.....	24
II.3	Schéma simplifié d'une unité de méthanisation	25
II.4	Schéma simplifié de production et de valorisation du biogaz	25
II.5	Schéma de l'économie circulaire appliquée aux déchets ménagers	27
II.6	Chronologie simplifiée de la réglementation algérienne relative aux déchets	29
II.7	Schéma simplifié du financement d'un projet de valorisation énergétique.....	32
III.1	Vue générale du Centre d'Enfouissement Technique d'Ouargla.....	37
III.2	Contribution de la valorisation énergétique aux dimensions du développement durable	51

Liste des tableaux

I.3	Principales sources des déchets ménagers et types de déchets générés.....	5
I.4	Classification des déchets ménagers selon différents critères.....	6
I.5	Composition typique des déchets ménagers dans différents contextes (%) .	7
I.6	Composition typique d'un lixiviat de CET jeune.....	9
I.7	Structure typique des coûts de gestion des déchets	10
I.8	État des infrastructures de gestion des déchets en Algérie (2022).....	13
I.9	Principaux composants d'un CET moderne	14
II.1	Classification des procédés de valorisation énergétique	22
II.2	Avantages et limites de l'incinération avec récupération d'énergie.....	23
II.3	Principaux paramètres de fonctionnement d'une unité de méthanisation.....	24
II.4	Principaux bénéfices environnementaux de la valorisation énergétique	27
II.5	Principaux textes réglementaires liés à la gestion et à la valorisation des déchets en Algérie	30
II.6	Indicateurs économiques simplifiés des principales technologies	31
II.7	Exemples d'emplois liés à la valorisation énergétique	31
III.1	Répartition mensuelle des déchets reçus au CET d'Ouargla en 2025.....	38
III.2	Composition moyenne des déchets ménagers du CET d'Ouargla.....	39
III.3	Principaux paramètres physico-chimiques des déchets ménagers	39
III.4	Paramètres utilisés pour l'estimation du méthane.....	41
III.5	Synthèse du potentiel énergétique du CET d'Ouargla	43
III.6	Caractéristiques techniques du réseau de captage	44
III.7	Caractéristiques du groupe électrogène proposé.....	45
III.8	Synthèse du dimensionnement préliminaire	46
III.9	Répartition estimative de l'investissement initial.....	47
III.10	Principales charges d'exploitation annuelles.....	47
III.11	Indicateurs économiques estimés du projet	48
III.12	Comparaison entre le scénario actuel et le scénario de valorisation énergétique	50

Résumé

Cette étude évalue le potentiel énergétique du méthane issu des déchets ménagers du CET d'Ouargla via le modèle IPCC. Les résultats montrent une quantité annuelle de 62 664 tonnes de déchets avec 58% de matière organique, produisant 6 428 tonnes/an de méthane (17,95 millions m³/an de biogaz). La valorisation permettrait de générer 31,3 GWh/an d'électricité pour alimenter 10 400 foyers. L'analyse économique indique un investissement de 650 millions DA pour un revenu annuel de 375,6 millions DA. Le projet éviterait l'émission de 180 000 tCO₂-équivalent/an. Cette solution durable réduit les émissions de GES et améliore la gestion des déchets en saharien algérien.

Mots-clés : Déchets ménagers, CET d'Ouargla, Biogaz, Méthane, Valorisation énergétique, Développement durable, Énergie renouvelable

Abstract

This study evaluates the methane energy potential of household waste at the Ouargla landfill using the IPCC model. Results show 62,664 tonnes/year of waste with 58% organic matter, producing 6,428 tonnes/year of methane (17.95 million m³/year of biogas). Energy recovery would generate 31.3 GWh/year of electricity to power 10,400 households. Economic analysis indicates a 650 million DZD investment with 375.6 million DZD annual revenue. The project would avoid 180,000 tCO₂-equivalent/year emissions. This sustainable solution reduces GHG emissions and improves waste management in Algerian Saharan regions.

Keywords: Household waste, Ouargla landfill, Biogas, Methane, Energy recovery, Sustainable development, Renewable energy

المخلص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم الإمكانيات الطاقوية لغاز الميثان الناتج عن النفايات المنزلية بمركز الردم التقني بورقلة باستخدام نموذج IPCC أظهرت النتائج أن الكمية السنوية للنفايات تبلغ 62.664 طن/سنة بنسبة مواد عضوية 58%، مما ينتج عنه 6.428 طن/سنة من الميثان أي 17,95 مليون م³/سنة من البيوغاز. يمكن استغلال هذا الغاز لإنتاج 31,3 جيغاواط / ساعة من الكهرباء لتغذية حوالي 10.400 غرفة . أظهرت الدراسة جدوى اقتصادية باستثمار أولي 650 مليون دينار وعائد سنوي 375,6 مليون دينار. كما يساهم المشروع في تفادي 180.000 طن من مكافئ CO₂ سنوياً. تعد هذه التقنية حلاً مستداماً يقلل انبعاثات الغازات الدفيئة ويحسن تسيير النفايات في المناطق الصحراوية الجزائرية.

الكلمات المفتاحية: نفايات منزلية، مركز الردم التقني بورقلة، بيوغاز، ميثان، تجميع طاقي، تنمية مستدامة، طاقة متجددة

.1 Lettres latines

Symbole	Signification	Unité
M	Masse annuelle de déchets enfouis	t/an
Q_{CH_4}	Quantité annuelle de méthane produite	t/an
V_{CH_4}	Volume annuel de méthane	m ³ /an
V_{biogaz}	Volume annuel total de biogaz	m ³ /an
DOC	Carbone organique dégradable (Degradable Organic Carbon)	sans unité
DOC_f	Fraction du DOC réellement décomposée	sans unité
F	Fraction volumique de méthane dans le biogaz	sans unité
E_{brute}	Énergie brute annuelle	GWh/an
E_{elec}	Énergie électrique annuelle	GWh/an
PCI	Pouvoir calorifique inférieur	kJ/kg ou kWh/m ³
P_{moy}	Puissance électrique moyenne	MW
N_{foyers}	Nombre de foyers alimentés	sans unité
R_{an}	Revenus annuels	DA/an
B_{net}	Bénéfice net annuel	DA/an
$CAPEX$	Investissement initial (Capital Expenditures)	DA
$OPEX$	Coûts d'exploitation annuels (Operating Expenditures)	DA/an
PBP	Délai de récupération (Payback Period)	an
VAN	Valeur actuelle nette	DA
TRI	Taux de rendement interne	%
ROI	Retour sur investissement	%
PRG	Pouvoir de réchauffement global	sans unité

.2 Lettres grecques

Symbole	Signification	Unité
η_{elec}	Rendement électrique du moteur	%
ρ_{CH_4}	Masse volumique du méthane	kg/m ³

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

La croissance démographique, l'urbanisation rapide ainsi que l'évolution des modes de consommation ont entraîné une augmentation continue de la production des déchets ménagers à travers le monde. Cette situation représente aujourd'hui un défi environnemental, économique et sanitaire majeur, particulièrement dans les pays en développement où les infrastructures de gestion des déchets demeurent parfois insuffisantes face à l'augmentation des quantités produites.

En Algérie, l'accroissement de la population urbaine et l'amélioration progressive du niveau de vie ont conduit à une augmentation importante des déchets ménagers générés quotidiennement. La gestion de ces déchets constitue désormais une problématique prioritaire pour les collectivités locales en raison des impacts environnementaux associés à leur accumulation, notamment la pollution des sols, des eaux souterraines et de l'air, ainsi que les émissions de gaz à effet de serre.

Afin de limiter ces impacts, les centres d'enfouissement techniques (CET) ont été développés comme solution de gestion contrôlée des déchets ménagers. Ces infrastructures permettent d'assurer l'élimination des déchets dans des conditions plus sécurisées grâce à des systèmes d'étanchéité, de drainage des lixiviats et de captage du biogaz. Toutefois, malgré les améliorations apportées par les CET par rapport aux décharges sauvages, plusieurs contraintes persistent, notamment la saturation progressive des sites, les coûts élevés d'exploitation et les émissions importantes de méthane issues de la décomposition anaérobie des matières organiques.

Le méthane constitue l'un des principaux gaz à effet de serre responsables du réchauffement climatique. Cependant, ce gaz représente également une source d'énergie renouvelable pouvant être valorisée sous forme d'électricité ou de chaleur. Dans ce contexte, la valorisation énergétique du biogaz issu des centres d'enfouissement techniques apparaît comme une solution durable permettant à la fois de réduire les impacts environnementaux des déchets et de produire une énergie valorisable.

La valorisation énergétique des déchets ménagers s'inscrit aujourd'hui dans les principes du développement durable et de l'économie circulaire. Elle contribue à réduire les volumes de déchets enfouis, à limiter les émissions de gaz à effet de serre et à diversifier les sources énergétiques. Plusieurs technologies de valorisation énergétique existent actuellement, telles que l'incinération avec récupération d'énergie, la méthanisation, la gazéification et la valorisation du biogaz des CET.

Dans les régions sahariennes algériennes, et particulièrement dans la wilaya d'Ouargla, la gestion des déchets ménagers représente un enjeu croissant lié à l'augmentation de la population et à l'expansion urbaine. Le Centre d'Enfouissement Technique d'Ouargla reçoit quotidiennement d'importantes quantités de déchets ménagers contenant une forte proportion de matières organiques biodégradables favorables à la production de biogaz.

Introduction générale

Dans ce contexte, cette étude a pour objectif principal d'évaluer le potentiel énergétique des déchets ménagers enfouis au niveau du CET d'Ouargla et d'analyser les possibilités de valorisation énergétique du biogaz produit. L'étude vise également à mettre en évidence les bénéfices environnementaux, énergétiques et économiques associés à la mise en place d'un système de captage et de valorisation du biogaz adapté au contexte saharien.

Pour atteindre ces objectifs, ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux :

- **Le premier chapitre** présente les généralités relatives aux déchets ménagers, leurs impacts environnementaux ainsi que les principes de gestion des centres d'enfouissement techniques.
- **Le deuxième chapitre** est consacré à l'étude des différentes technologies de valorisation énergétique des déchets ménagers ainsi qu'à leur contribution au développement durable sur les plans environnemental, économique et social.
- **Le troisième chapitre** porte sur une étude appliquée au Centre d'Enfouissement Technique d'Ouargla. Il comprend l'analyse des quantités et de la composition des déchets ménagers, l'évaluation du potentiel de production de biogaz à l'aide du modèle IPCC, ainsi qu'une étude préliminaire de faisabilité technique, énergétique et économique d'un système de valorisation énergétique du biogaz.

À travers cette étude, il s'agit de montrer que la valorisation énergétique des déchets ménagers peut constituer une solution durable permettant d'améliorer la gestion des déchets tout en contribuant à la transition énergétique et à la protection de l'environnement dans les régions sahariennes algériennes.

CHAPITRE I

Gestion des déchets ménagers et problématique des centres d'enfouissement techniques

I.3 Introduction

L'augmentation démographique associée à une urbanisation soutenue a conduit à une forte hausse de la quantité de déchets ménagers produits, phénomène qui représente désormais un défi environnemental et sanitaire de grande ampleur [1, 3]. L'amoncellement des déchets génère de multiples effets dommageables, parmi lesquels figurent la contamination des sols, la pollution des eaux souterraines et la dégradation de la qualité de l'air [1, 3].

Pour remédier à ces nuisances, les centres d'enfouissement technique (CET) ont été conçus comme une réponse permettant une gestion maîtrisée des résidus ménagers. Dans le contexte algérien, le cadre juridique régissant cette activité est fixé par la loi n°01-19, qui porte sur la gestion, le contrôle et l'élimination des déchets [5]. Néanmoins, en dépit des avancées accomplies, plusieurs contraintes demeurent, à savoir les rejets de biogaz, la génération de lixiviats, ainsi que le remplissage croissant des sites [2, 4].

Ce chapitre expose les notions fondamentales concernant les déchets ménagers, leurs conséquences sur l'environnement et l'économie, de même que les principes directeurs de leur gestion et le mode opératoire des centres d'enfouissement technique (CET).

I.4 Généralités sur les déchets ménagers

I.4.1 Définition des déchets ménagers

La catégorie des déchets ménagers englobe l'ensemble des résidus issus des activités domestiques, auxquels s'ajoutent les déchets assimilés provenant des commerces et des services [1]. Conformément à la loi algérienne n°01-19, cette classification intègre également certains déchets volumineux ainsi que les déchets verts [5].

Les résidus ménagers se composent essentiellement de matières organiques, de plastiques, de papiers, de verre et de métaux. Leur répartition varie en fonction du niveau socioéconomique, des comportements de consommation ainsi que du degré d'urbanisation des populations [1].

D'après les projections de l'UNEP publiées en 2024, le volume global des déchets municipaux pourrait excéder 3,8 milliards de tonnes d'ici l'année 2050 [3].

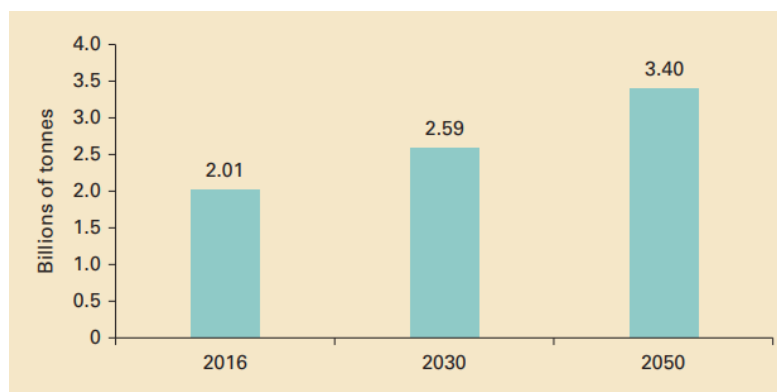


Figure I.1: Évolution projetée de la production mondiale des déchets ménagers (2016–2050)

Source : World Bank, What a Waste 2.0 (2018).

I.4.2 Origine et sources des déchets

Les résidus ménagers trouvent leur origine essentiellement dans les foyers, les commerces, les administrations ainsi que les marchés publics. Leur volume et leur nature fluctuent en fonction du contexte socioéconomique et du degré de développement des pays concernés [3, 4].

Dans les pays en développement, la fraction organique représente généralement la composante dominante des déchets ménagers, tandis que dans les pays industrialisés les déchets plastiques et les emballages sont plus importants.

Table I.3: Principales sources des déchets ménagers et types de déchets générés

Source	Types de déchets générés
Ménages	Déchets organiques, plastiques, papiers, verre
Marchés	Déchets alimentaires et végétaux
Restaurants	Restes alimentaires et emballages
Administrations	Papier, carton et équipements usagés
Commerces	Emballages, plastiques et cartons

Source : Adapté de [1, 4].

I.4.3 Classification des déchets ménagers

Il est possible de catégoriser les déchets ménagers selon différents critères : leur composition, leur source de production, ou encore leur filière de valorisation [1, 2].

Table I.4: Classification des déchets ménagers selon différents critères

Critère	Catégories	Exemples
Nature	Déchets organiques	Restes alimentaires, déchets verts
	Déchets recyclables	Papier, carton, plastique, verre
	Déchets dangereux	Piles, solvants, médicaments
	Déchets inertes	Gravats, sable, céramique
Origine	Déchets ménagers	Ordures domestiques
	Déchets assimilés	Déchets de commerces et services
Valorisation	Valorisation matière	Déchets recyclables
	Valorisation organique	Déchets compostables
	Valorisation énergétique	Déchets à haut pouvoir calorifique

Source : Adapté de [1, 2].

Dans les pays en voie de développement, la part biodégradable issue des matières organiques peut atteindre 60 à 70 % de l'ensemble du gisement de déchets [8].

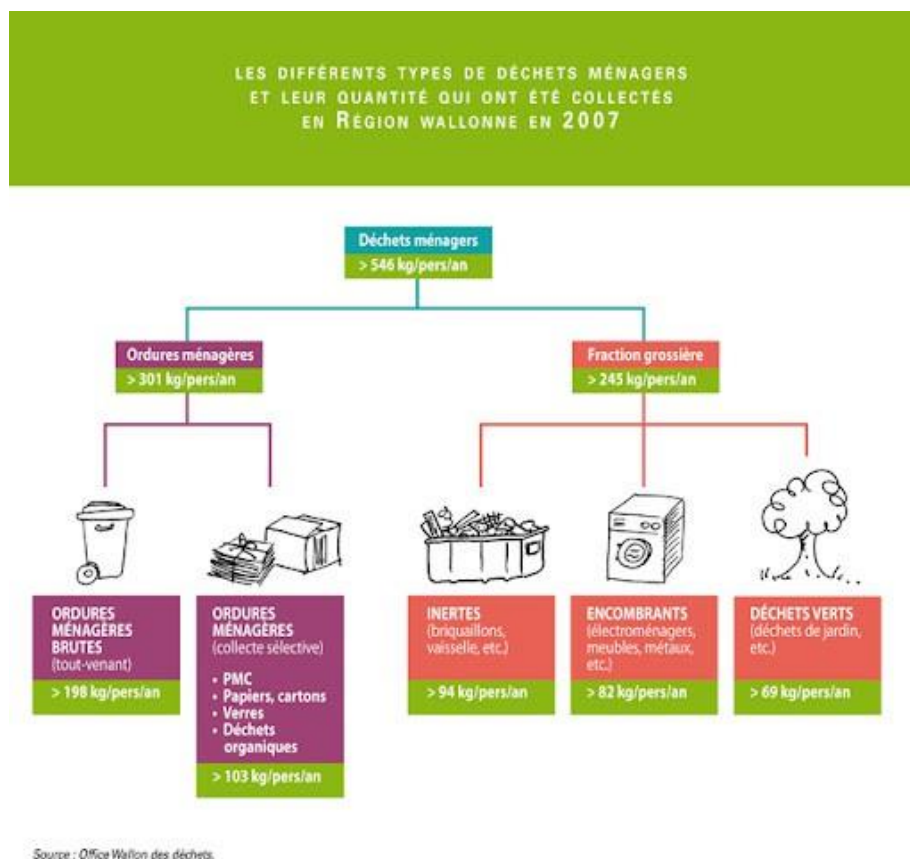


Figure I.2: Classification simplifiée des déchets ménagers

Source : Adapté de l'Office Wallon des Déchets (2007).

I.4.4 Composition et caractéristiques physico-chimiques

La nature des résidus ménagers évolue en fonction des pratiques de consommation et du degré de développement économique de chaque région [3, 4].

Table I.5: Composition typique des déchets ménagers dans différents contextes (%)

Composant	Pays à revenu élevé	Pays à revenu intermédiaire	Pays à faible revenu
Matières organiques	25–35	55–65	60–75
Papiers/Cartons	20–30	10–15	5–10
Plastiques	10–15	10–15	8–12
Verre	5–10	2–5	1–3
Métaux	3–8	2–4	1–3
Textiles	3–6	2–5	2–4
Autres	10–15	5–10	3–8

Source : Adapté de [3, 4].

En Algérie, les résidus ménagers se caractérisent par une teneur élevée en matières organiques ainsi qu'un taux d'humidité important, ce qui a une incidence directe sur les méthodes de traitement et les filières de valorisation [8].

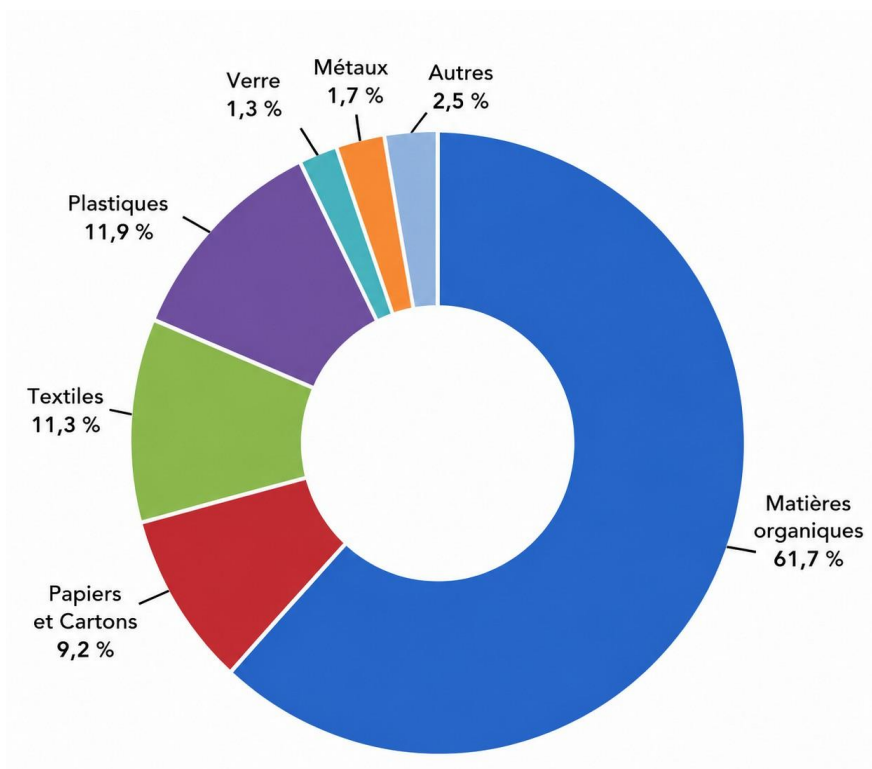


Figure I.3: Composition des déchets ménagers en Algérie

Source : Adapté de Scarlat et al. (2015).

Parmi les caractéristiques physiques et chimiques qui permettent de décider comment traiter les déchets, on trouve principalement la densité, l'humidité, le pouvoir calorifique inférieur (PCI) et le rapport entre le carbone et l'azote (C/N) [1, 6].

I.5 Impacts environnementaux et économiques des déchets ménagers

I.5.1 Pollution de l'air

Lorsque les déchets ménagers sont entreposés ou enfouis dans des conditions non maîtrisées, ils engendrent d'importants rejets dans l'atmosphère [2, 3]. La dégradation en l'absence d'oxygène (anaérobie) de la fraction organique génère essentiellement du méthane (CH_4) et du dioxyde de carbone (CO_2).

Le méthane constitue habituellement 50 à 55 % du biogaz généré et présente un pouvoir de réchauffement global environ 28 fois plus élevé que celui du CO_2 [3]. Par ailleurs, la combustion à l'air libre des résidus ménagers émet des particules fines, des dioxines ainsi que divers gaz toxiques nocifs pour la santé humaine.

D'après les données de l'UNEP publiées en 2024, le secteur des déchets contribue à hauteur d'environ 5 % des émissions planétaires de gaz à effet de serre [3].

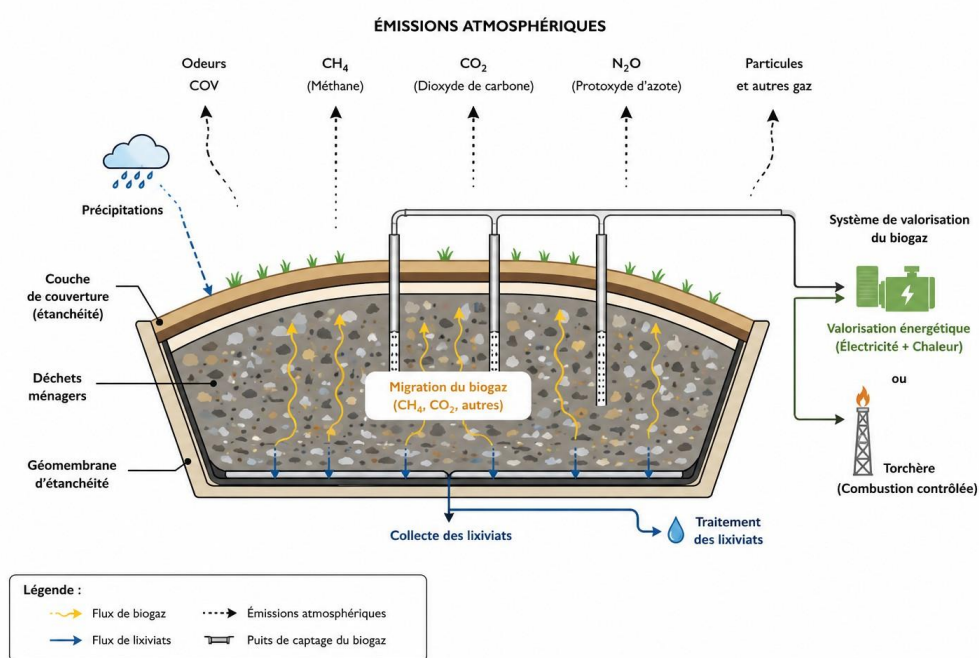


Figure I.4: Schéma des flux d'émissions atmosphériques d'un centre d'enfouissement technique (CET)

Source : Adapté de [2, 3, 8].

I.5.2 Pollution des eaux et des sols

La contamination des sols et des ressources hydriques est essentiellement due à la formation de lixiviats, ces effluents liquides issus de la percolation des eaux au travers des déchets stockés [1, 2].

Table I.6: Composition typique d'un lixiviat de CET jeune

Paramètre	Concentration typique (mg/L)	Valeur limite de rejet
DCO	10 000 – 60 000	120
DBO ₅	4 000 – 20 000	30
NH ₄ ⁺	500 – 2 000	10
Métaux lourds	0.1 – 2	Traces

Source : Adapté de [1, 2].

En l'absence de dispositifs d'étanchéité performants, les lixiviats sont susceptibles de polluer les sols, les nappes phréatiques ainsi que les eaux de surface [4].

I.5.3 Risques sanitaires

Les déchets ménagers comportent de multiples risques pour la santé, tant pour les employés du secteur que pour les communautés vivant à proximité des sites de gestion [3].

- Risques infectieux liés aux déchets putrescibles .
- Risques toxiques liés aux métaux lourds et substances dangereuses .
- Risques accidentels tels que les incendies et explosions liés au méthane.

Une mauvaise gestion des déchets favorise également la prolifération des insectes et rongeurs responsables de plusieurs maladies infectieuses.

I.5.4 Coûts économiques liés à la gestion des déchets

La prise en charge des déchets ménagers constitue un fardeau financier considérable pour les collectivités territoriales [4].

Table I.7: Structure typique des coûts de gestion des déchets

Poste de coût	Part du coût total (%)	Observations
Collecte et transport	60–80	Principal poste de dépense
Traitement et élimination	15–30	Exploitation des CET et maintenance
Administration	5–10	Gestion et contrôle environnemental

Source : Adapté de [4].

À ces dépenses directes viennent s'ajouter divers coûts indirects engendrés par la contamination des sols, les répercussions sanitaires ainsi que les émissions de gaz à effet de serre [3].

I.6 Gestion des déchets ménagers

I.6.1 Collecte et transport

La collecte représente l'étape initiale du processus de gestion des résidus ménagers et correspond généralement à la fraction la plus élevée des dépenses globales de gestion [4]. Cette opération vise à rassembler les déchets générés par les foyers pour les acheminer vers les installations de traitement ou les centres d'enfouissement technique (CET).

La collecte peut être organisée selon plusieurs modes :

- **Collecte porte-à-porte** : les déchets sont récupérés directement auprès des ménages .

- **Collecte par points de regroupement** : les déchets sont déposés dans des conteneurs collectifs .
- **Collecte sélective** : certains flux recyclables tels que le papier, le verre ou les plastiques sont collectés séparément.

La performance du système de collecte repose essentiellement sur trois facteurs : la disponibilité des équipements, l'efficacité de l'organisation municipale, ainsi que les comportements des citoyens. En Algérie, le taux de couverture de la collecte demeure relativement satisfaisant dans les grandes agglomérations, mais reste encore limité dans certaines zones rurales et sahariennes [5].

I.6.2 Tri et traitement

Le tri des déchets vise à isoler les différentes fractions valorisables ou dangereuses, dans le but de diminuer les volumes destinés à l'enfouissement [2]. On peut principalement identifier les catégories suivantes :

- **Le tri à la source** : réalisé directement par les ménages avant la collecte ;
- **Le tri en centre** : effectué manuellement ou mécaniquement après la collecte des déchets.

Parmi les principales méthodes de traitement applicables aux déchets ménagers figurent le compostage, l'incinération, la méthanisation et le recyclage. Selon Kumar et Samadder [6], l'évolution des technologies de valorisation participe à l'amélioration des performances des systèmes contemporains de gestion des résidus.

En Algérie, la collecte sélective ainsi que les installations de tri restent encore peu développées, ce qui entraîne l'enfouissement d'une large fraction des déchets sans aucune valorisation préalable [5].

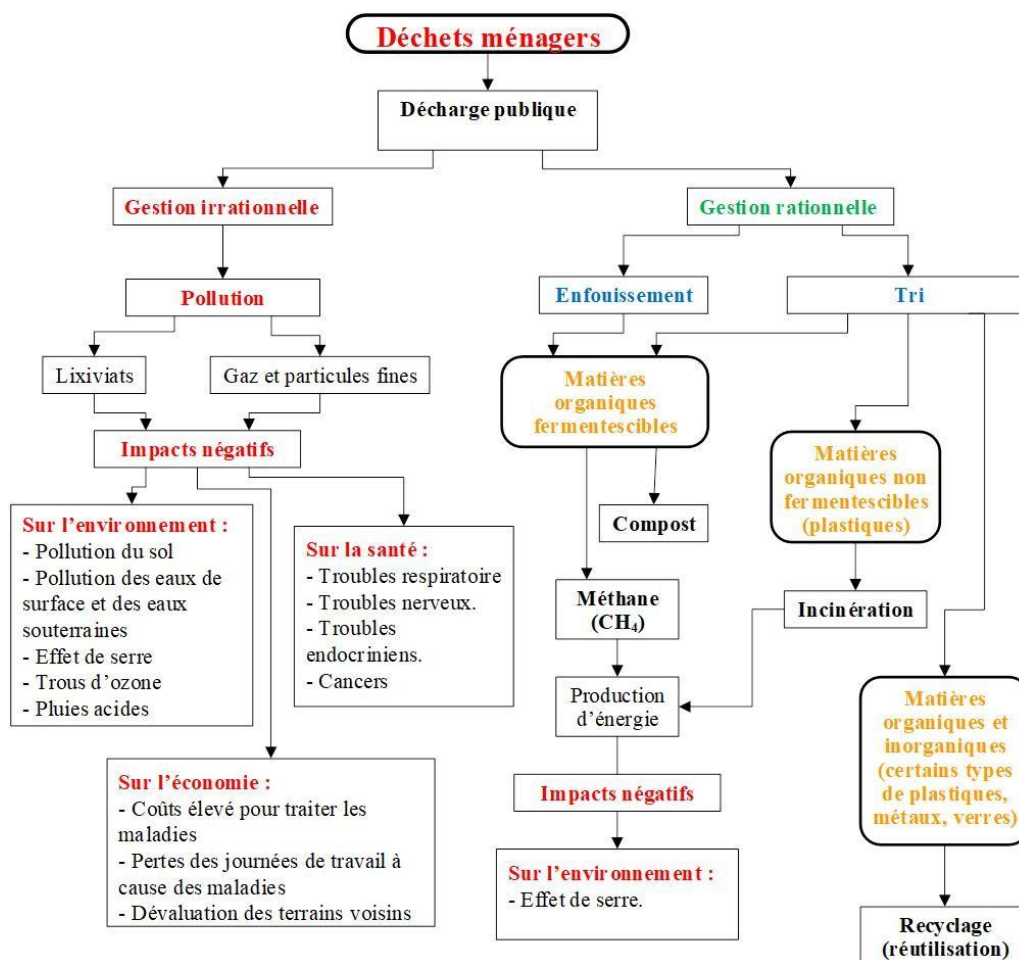


Figure I.5: Schéma simplifié de gestion intégrée des déchets ménagers

Source : Adapté de la littérature scientifique.

I.6.3 Recyclage et valorisation

Le recyclage vise à réintégrer certains matériaux extraits des déchets dans le processus de production, ce qui permet de diminuer à la fois l'exploitation des ressources naturelles et les volumes dirigés vers l'enfouissement [1]. Les matières les plus couramment recyclables comprennent le papier, le carton, les plastiques, le verre ainsi que les métaux.

D'après les données de l'UNEP publiées en 2024, le taux de recyclage des déchets ménagers à l'échelle mondiale reste encore relativement modeste, une proportion importante des résidus étant toujours enfouie ou éliminée sans aucune forme de valorisation [3].

La valorisation de la fraction organique, en particulier par le compostage, consiste à convertir les déchets biodégradables en un amendement destiné à l'agriculture. D'autres technologies, comme la méthanisation ou l'incinération couplée à une récupération d'énergie, permettent également de générer de l'énergie à partir des résidus ménagers.

I.6.4 Politique de gestion des déchets en Algérie

La politique algérienne en matière de gestion des déchets s'est consolidée à partir des années 2000, suite à l'adoption de la loi n°01-19 portant sur la gestion, le contrôle et l'élimination des déchets [5]. Ce texte législatif s'appuie sur plusieurs principes fondamentaux, parmi lesquels figurent la réduction à la source, la valorisation des résidus, ainsi que le principe du pollueur-payeur.

Dans ce cadre, le Programme National de Gestion des Déchets Ménagers (PNGDM) a permis la réalisation de plusieurs centres d'enfouissement techniques (CET) dans différentes wilayas du pays.

Table I.8: État des infrastructures de gestion des déchets en Algérie (2022)

Infrastructure	Objectif PNGDM	Réalisé	Taux de réalisation
CET	58	42	72 %
Décharges contrôlées	180	60	33 %
Centres de tri	150	15	10 %
Centres de compostage	50	6	12 %

Source : Adapté de [5].

En dépit des avancées accomplies, plusieurs obstacles demeurent, à savoir l'insuffisance des infrastructures de tri, les difficultés budgétaires, ainsi que le développement limité des filières de valorisation et de recyclage [5].

I.7 Centres d'enfouissement techniques (CET)

I.7.1 Définition et rôle des CET

Les centres d'enfouissement technique (CET) constituent des infrastructures spécialement conçues pour assurer le stockage maîtrisé des déchets dans des conditions conformes aux exigences environnementales et sanitaires [1]. Ils se substituent progressivement aux décharges sauvages grâce à l'intégration de dispositifs d'étanchéité, de systèmes de collecte des lixiviats et de captage du biogaz.

La fonction première des CET consiste à réduire les répercussions environnementales associées à l'enfouissement des déchets, en particulier la contamination des sols, la pollution des nappes phréatiques et les émissions dans l'atmosphère [2]

Dans la hiérarchie des modes de traitement, le CET occupe généralement la position la plus basse, intervenant après les opérations de recyclage et de valorisation des déchets.

I.7.2 Conception et fonctionnement des CET

La conception d'un centre d'enfouissement technique (CET) s'appuie sur divers dispositifs techniques visant à atténuer les risques de pollution [1, 2].

Table I.9: Principaux composants d'un CET moderne

Composant	Fonction	Éléments techniques
Étanchéité de fond	Empêcher l'infiltration des lixiviats	Argile compactée et géomembrane HDPE
Drainage des lixiviats	Collecter les lixiviats	Drains perforés et couche drainante
Bassin de stockage	Stocker temporairement les lixiviats	Bassin étanche revêtu
Captage du biogaz	Extraire le méthane produit	Puits verticaux et conduites de collecte
Couverture finale	Limiter les infiltrations et nuisances	Couche d'étanchéité et terre végétale

Source : Adapté de [1, 2].

Les déchets sont déposés par couches successives puis compactés afin de réduire le volume occupé. En fin d'exploitation, le site est recouvert par une couverture finale limitant les infiltrations d'eau et les émissions diffuses de biogaz.

CAPTAGE DU BIOGAZ DE DÉCHARGE

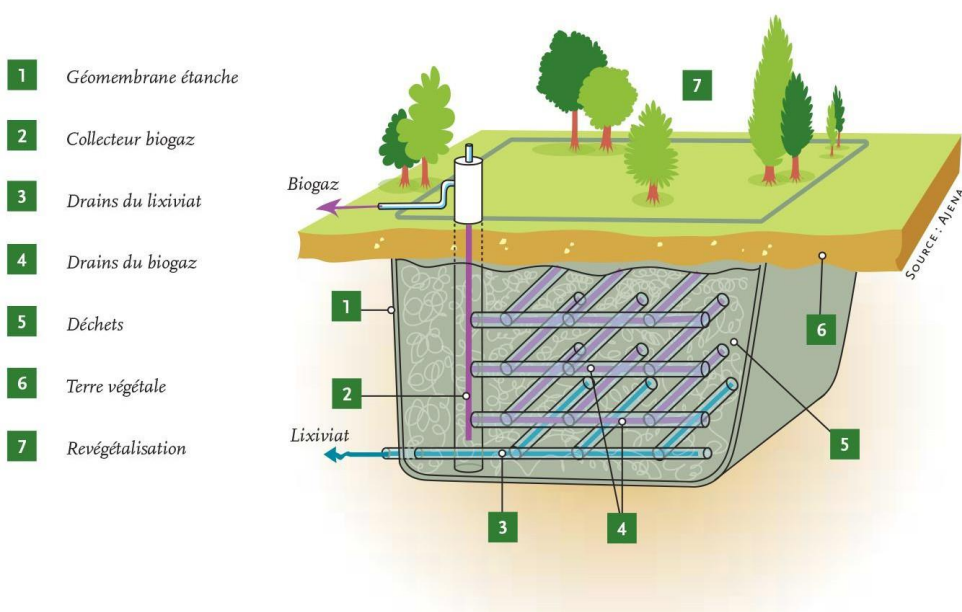


Figure I.6: Structure simplifiée d'un centre d'enfouissement technique

Source : Adapté de la littérature scientifique.

I.7.3 Systèmes de traitement des lixiviats

Les lixiviats générés au sein des centres d'enfouissement technique (CET) présentent une charge polluante élevée et requièrent donc un traitement approprié avant tout rejet dans l'environnement naturel [1]. Leur composition fluctue en fonction de l'âge du CET ainsi que de la nature des déchets enfouis.

Les principales techniques utilisées sont :

- le traitement biologique .
- les procédés physico-chimiques .
- la filtration membranaire .
- l'évaporation contrôlée.

Dans de nombreux centres d'enfouissement technique (CET) des pays en développement, les moyens de traitement demeurent inadéquats, ce qui accroît les risques de contamination des sols et des ressources hydriques [5].

I.7.4 Systèmes de captage des biogaz

La dégradation en l'absence d'oxygène (anaérobie) des matières organiques au sein des centres d'enfouissement technique (CET) génère un biogaz composé essentiellement de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2) [8]. Cette production de biogaz peut se prolonger durant plusieurs dizaines d'années après l'enfouissement des résidus [6].

Le captage du biogaz permet :

- de réduire les émissions de gaz à effet de serre .
- de limiter les risques d'incendie et d'explosion .
- de produire de l'énergie par valorisation énergétique.

Le système de captage repose généralement sur des puits verticaux reliés à un réseau de conduites conduisant le biogaz vers des torchères ou des unités de valorisation énergétique.

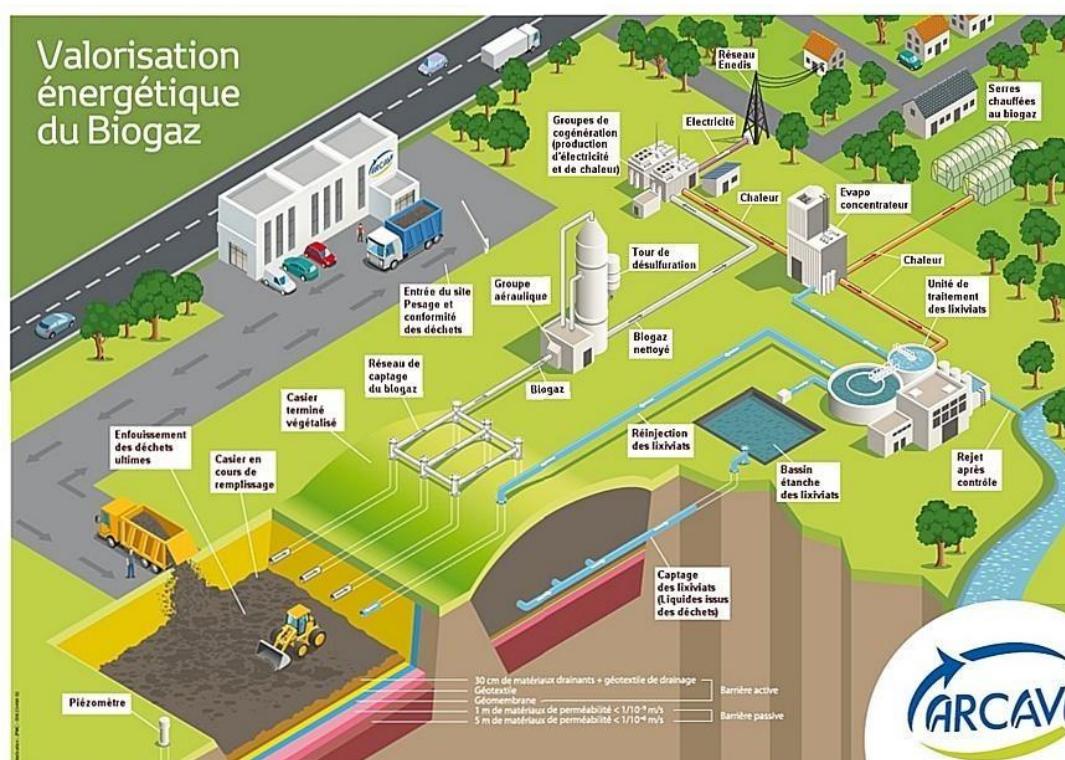


Figure I.7: Schéma simplifié d'une installation de captage et de valorisation du biogaz de CET

Source : Adapté de la littérature scientifique.

I.8 Performances environnementales et économiques des CET

I.8.1 Évaluation environnementale des CET

Les centres d'enfouissement technique (CET) offrent une réduction des impacts environnementaux par rapport aux décharges non contrôlées. Toutefois, leur performance est étroitement liée à la qualité des infrastructures ainsi qu'à la rigueur du suivi environnemental assuré [1, 2].

L'évaluation environnementale des CET repose principalement sur plusieurs indicateurs :

- les émissions de biogaz .
- la qualité des lixiviats .
- la stabilité des déchets enfouis .
- les nuisances olfactives et atmosphériques.

D'après diverses recherches menées sur les centres d'enfouissement technique (CET) de la région méditerranéenne, un grand nombre de ces installations souffrent encore de lacunes techniques, en particulier en ce qui concerne le traitement des lixiviats et la récupération du biogaz [2, 3].

I.8.2 Coûts d'exploitation et de gestion

L'exploitation des centres d'enfouissement technique (CET) requiert des investissements considérables, notamment pour l'aménagement des alvéoles de stockage, le traitement des lixiviats ainsi que l'entretien des équipements [4].

Les principaux coûts concernent :

- le personnel et les équipements .
- le traitement des lixiviats .
- la maintenance des réseaux de drainage et de captage .
- le suivi environnemental post-fermeture.

Le coût d'exploitation fluctue en fonction du niveau technologique des infrastructures ainsi que des exigences environnementales mises en œuvre [5].

I.8.3 Avantages des CET

Les centres d'enfouissement technique (CET) offrent de multiples atouts en comparaison avec les décharges non contrôlées [1, 4] :

- réduction des nuisances environnementales .
- protection partielle des sols et des eaux .
- possibilité de captage et de valorisation du biogaz .
- amélioration des conditions d'hygiène publique.

Ces avantages expliquent pourquoi les CET demeurent largement utilisés dans les pays en développement, notamment en Algérie [5].

I.8.4 Limites des CET

En dépit de leurs atouts, les centres d'enfouissement technique (CET) comportent diverses faiblesses significatives sur les plans environnemental et économique [2, 3, 4].

- émissions résiduelles de méthane .
- production continue de lixiviats .
- saturation progressive des sites .
- occupation importante des sols .
- coûts de suivi post-fermeture.

En plus, enterrer des déchets qu'on pourrait recycler ou valoriser, c'est gaspiller des ressources précieuses, et ça va complètement à l'encontre des principes de l'économie circulaire [3].

I.9 Nécessité des solutions alternatives

I.9.1 Saturation des CET

Comme on produit de plus en plus de déchets, les CET finissent par se remplir peu à peu. Du coup, il faut ouvrir de nouveaux sites, ce qui pose des problèmes : trouver du terrain, protéger l'environnement, et réunir l'argent nécessaire [5].

Dans plusieurs régions, les difficultés liées à la disponibilité des terrains et à l'acceptation sociale compliquent la création de nouveaux CET.

I.9.2 Émissions de gaz à effet de serre

Les centres d'enfouissement technique (CET) sont une source majeure d'émissions de méthane résultant de la décomposition anaérobie des matières organiques [3, 8]. Même lorsque des systèmes de captage efficaces sont installés, une fraction du biogaz continue de s'échapper dans l'atmosphère.

D'après l'UNEP (2024), réduire les émissions de gaz à effet de serre venant des déchets est un moyen important dans les stratégies mondiales pour lutter contre le réchauffement climatique [3].

I.9.3 Contraintes environnementales et économiques

Les impacts environnementaux des centres d'enfouissement technique (CET) portent essentiellement sur le traitement des lixiviats, les nuisances odorantes, ainsi que la contamination des sols et des ressources hydriques [2]. À ces contraintes s'ajoutent des difficultés économiques liées aux frais d'exploitation, d'entretien et de surveillance après la fermeture des sites.

Dans de nombreux pays en développement, les moyens financiers et techniques disponibles demeurent inadéquats pour garantir une gestion durable des déchets [4].

I.9.4 Transition vers la valorisation énergétique

Face aux insuffisances des centres d'enfouissement technique (CET), la valorisation énergétique se présente comme une alternative durable permettant à la fois de diminuer les volumes de déchets dirigés vers l'enfouissement et de générer de l'énergie [6].

Les principales technologies de valorisation comprennent :

- l'incinération avec récupération énergétique ;
- la méthanisation ;
- la gazéification ;
- la valorisation du biogaz.

Selon Makarichi et ses collaborateurs [7], les technologies contemporaines de valorisation énergétique participent à la diminution des émissions de gaz à effet de serre tout en améliorant la gestion des déchets en milieu urbain.

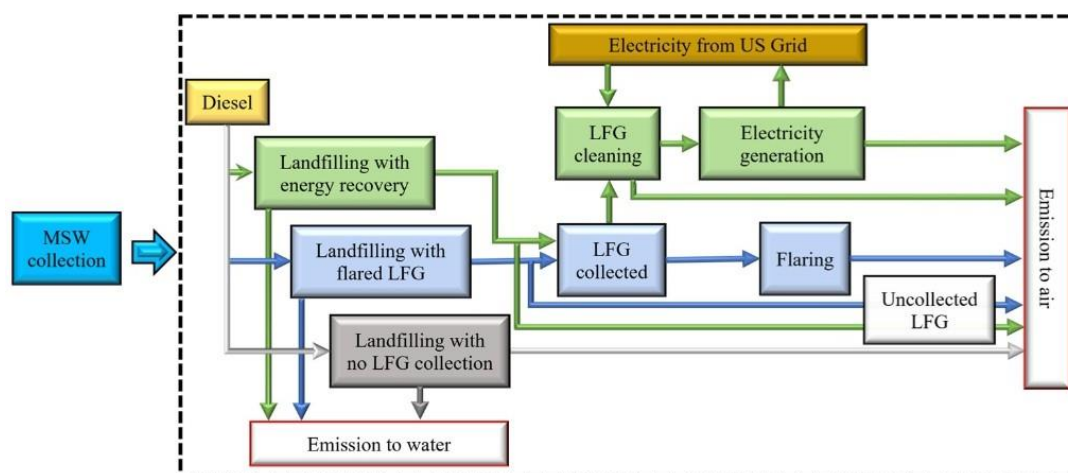


Figure I.8: Transition des centres d'enfouissement techniques vers les systèmes de valorisation énergétique

Source : Adapté de [6, 7].

I.10 Conclusion

La gestion des déchets ménagers représente aujourd'hui un enjeu environnemental, sanitaire et économique majeur. Les centres d'enfouissement techniques ont permis d'améliorer les conditions d'élimination des déchets par rapport aux décharges sauvages, notamment grâce aux systèmes de confinement, de drainage et de captage du biogaz.

Cependant, malgré ces améliorations, les CET présentent plusieurs limites liées aux émissions de gaz à effet de serre, à la production des lixiviats, à la saturation des sites et aux coûts de gestion. Ces contraintes montrent la nécessité de développer des solutions alternatives plus durables basées sur la réduction, le recyclage et la valorisation énergétique des déchets.

Dans ce contexte, le chapitre suivant sera consacré à l'étude des technologies de valorisation énergétique des déchets ménagers ainsi qu'à leur contribution au développement durable.

CHAPITRE II

Valorisation énergétique des déchets ménagers et développement durable

II.1 Introduction

Compte tenu des insuffisances environnementales et économiques des centres d'enfouissement technique (CET) présentées dans le chapitre précédent, la valorisation énergétique des déchets ménagers constitue désormais une option durable qui permet à la fois de diminuer les volumes de déchets enfouis et de produire de l'énergie renouvelable [9, 12]. Cette stratégie s'appuie sur diverses technologies capables de convertir les déchets en chaleur, en électricité ou en biogaz.

La valorisation énergétique participe également à l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, à la sauvegarde des ressources naturelles ainsi qu'au renforcement de l'économie circulaire [11]. Dans cette optique, de nombreux pays ont intégré les technologies de valorisation énergétique dans leurs politiques de gestion durable des déchets, afin de satisfaire aux objectifs du développement durable établis par la Commission Brundtland [13].

Ce chapitre expose les principales technologies de valorisation énergétique applicables aux déchets ménagers, ainsi que leurs dimensions environnementales, économiques et réglementaires. Une importance particulière sera accordée à leur contribution au développement durable et aux perspectives de déploiement de ces filières dans le contexte algérien.

II.2 Généralités sur la valorisation énergétique**II.2.1 Définition et principes**

La valorisation énergétique des déchets regroupe l'ensemble des procédés visant à convertir le potentiel énergétique contenu dans les résidus ménagers en une énergie exploitable, que ce soit sous forme de chaleur, d'électricité ou de biogaz [9]. Cette approche permet de diminuer les volumes de déchets orientés vers l'enfouissement tout en participant à la production d'énergie renouvelable.

Dans la hiérarchie des modes de traitement, la valorisation énergétique occupe une position intermédiaire : elle intervient après le recyclage et avant l'élimination définitive. Elle concerne principalement les déchets pour lesquels la valorisation matière n'est pas réalisable sur les plans technique ou économique [12].

Le principe général repose sur la transformation des matières organiques ou combustibles à l'aide de procédés biologiques ou thermiques, afin de récupérer une énergie utile et de limiter le recours aux combustibles fossiles.



Figure II.1: Hiérarchie des modes de traitement des déchets

II.2.2 Types de valorisation énergétique

La valorisation énergétique des déchets ménagers englobe divers procédés destinés à générer de l'énergie à partir des fractions combustibles ou biodégradables des résidus [9, 12]. Les principales technologies employées se répartissent entre les procédés thermochimiques et les procédés biologiques.

Table II.1: Classification des procédés de valorisation énergétique

Type de procédé	Principe	Produits énergétiques	Déchets adaptés
Incineration	Combustion complète des déchets	Chaleur, électricité	Déchets à fort pouvoir calorifique
Pyrolyse	Décomposition thermique sans oxygène	Gaz de synthèse, bio-huile	Déchets secs et plastiques
Gazéification	Oxydation partielle à haute température	Syngas, électricité	Déchets homogénéisés
Méthanisation	Dégradation biologique anaérobie	Biogaz, chaleur, électricité	Déchets organiques biodégradables

Source : Adapté de [9, 10, 12].

La sélection de la technologie repose essentiellement sur la nature des déchets, leur teneur en eau, leur pouvoir calorifique, ainsi que sur les contraintes économiques et environnementales [10, 8].

II.2.3 Importance énergétique et environnementale

La valorisation énergétique occupe une place significative dans la gestion durable des déchets ménagers. Elle permet à la fois de diminuer les quantités de résidus envoyés à l'enfouissement et de générer une énergie d'origine renouvelable [12].

Cette approche permet également :

- de limiter les émissions de gaz à effet de serre
- de réduire la consommation des combustibles fossiles
- de prolonger la durée de vie des centres d'enfouissement techniques
- de favoriser l'économie circulaire

D'après Scarlat et ses collègues [8], les déchets ménagers représentent une source d'énergie importante dans les pays africains, car ils contiennent beaucoup de matières organiques qui peuvent se décomposer.

II.3 Technologies de valorisation énergétique des déchets ménagers**II.3.1 Incinération avec récupération d'énergie**

L'incinération consiste à soumettre les déchets ménagers à une combustion à haute température dans le but de réduire leur volume tout en captant l'énergie générée, sous forme de chaleur ou d'électricité [12]. Ce procédé permet une diminution volumétrique substantielle des résidus, pouvant atteindre 80 à 90 %.

Le procédé repose sur la combustion des déchets dans des fours spécialisés associés à des chaudières de récupération énergétique. Les installations modernes utilisent des systèmes de traitement des fumées afin de limiter les émissions atmosphériques.

Table II.2: Avantages et limites de l'incinération avec récupération d'énergie

Avantages	Limites
Réduction importante du volume des déchets	Investissement élevé
Production continue d'énergie	Coût du traitement des fumées
Réduction des déchets enfouis	Émissions atmosphériques à contrôler

Source : Adapté de [9, 12].

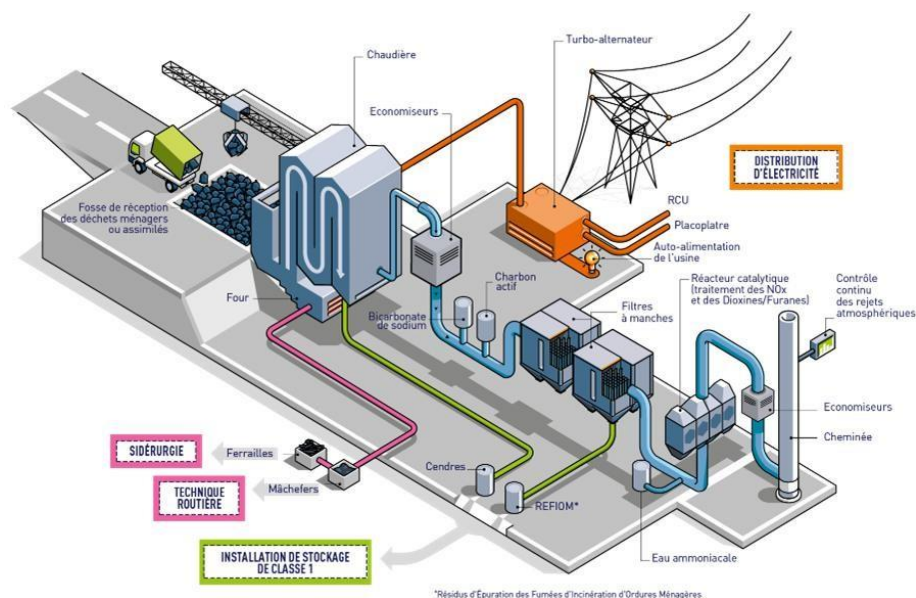


Figure II.2: Schéma simplifié d'une unité d'incinération avec récupération d'énergie

Source : Adapté de [12].

II.3.2 Méthanisation des déchets organiques

La méthanisation constitue un procédé biologique de dégradation en l'absence d'oxygène (anaérobie) de la matière organique, permettant ainsi la production de biogaz [11]. Cette technologie convient particulièrement aux déchets présentant une forte teneur en matières organiques biodégradables.

Le biogaz ainsi généré peut être employé pour produire de l'électricité, de la chaleur, ou être converti en biométhane après un processus d'épuration.

Table II.3: Principaux paramètres de fonctionnement d'une unité de méthanisation

Paramètre	Valeur optimale
Température	35–55 °C
pH	6.5–8
Temps de séjour	20–40 jours
Rapport C/N	20–30

Source : Adapté de [11].

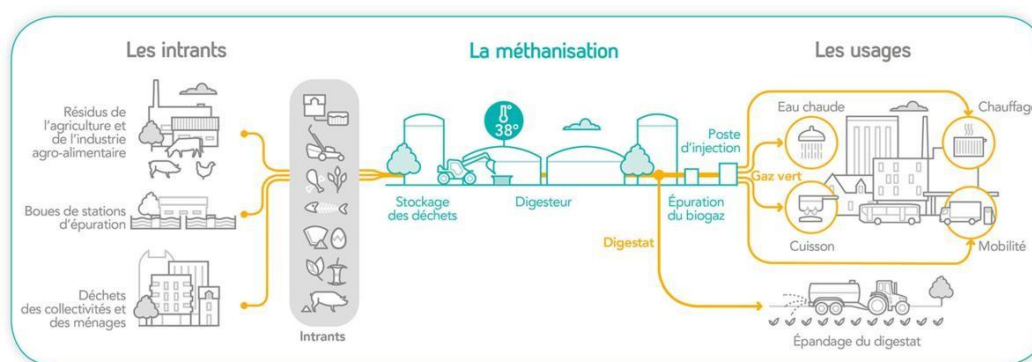


Figure II.3: Schéma simplifié d'une unité de méthanisation

Source : Adapté de [11].

II.3.3 Production et valorisation du biogaz

Le biogaz est essentiellement constitué de méthane et de dioxyde de carbone [14]. Il peut être généré soit dans des unités dédiées à la méthanisation, soit dans les centres d'enfouissement technique (CET) par le biais de la dégradation anaérobie des déchets organiques.

La valorisation énergétique du biogaz contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre tout en produisant une énergie renouvelable.

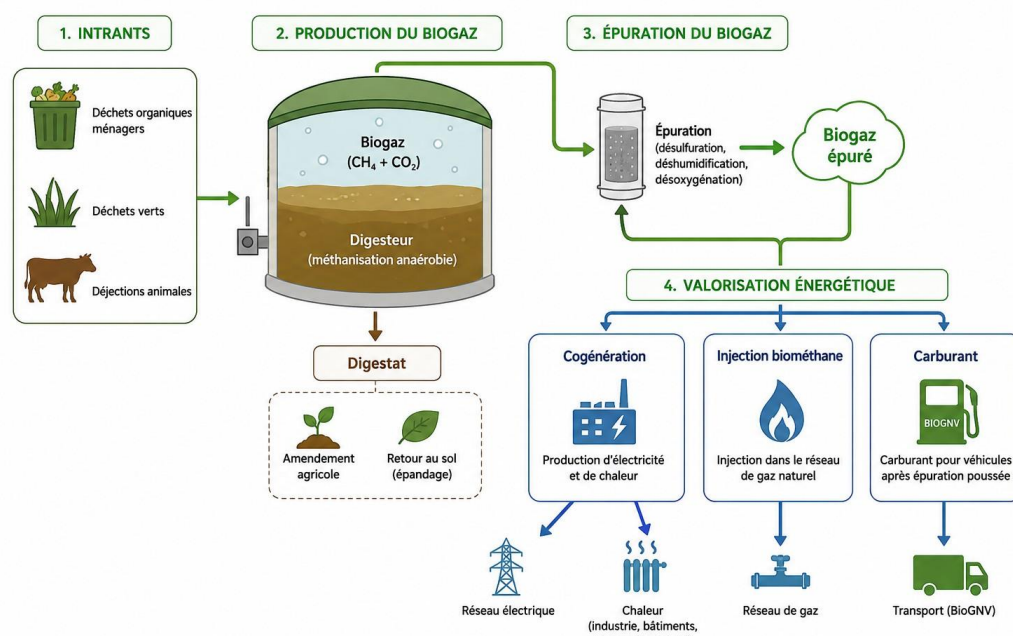


Figure II.4: Schéma simplifié de production et de valorisation du biogaz

II.3.4 Pyrolyse et gazéification

La pyrolyse et la gazéification sont des procédés thermochimiques qui permettent de transformer les déchets en gaz de synthèse ainsi qu'en combustibles énergétiques [10].

La pyrolyse correspond à une décomposition thermique réalisée en l'absence d'oxygène, tandis que la gazéification repose sur une oxydation partielle à haute température. Ces technologies offrent un rendement énergétique attractif, mais exigent des déchets relativement homogènes et présentant une faible teneur en humidité.

Selon Lee [10], ces procédés demeurent encore peu répandus dans les pays en développement en raison des contraintes technologiques et économiques qui y sont associées.

II.4 Dimension environnementale de la valorisation énergétique

II.4.1 Réduction des émissions de gaz à effet de serre

La valorisation énergétique des déchets participe à l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, d'une part en limitant la production de méthane issu de l'enfouissement, et d'autre part en se substituant partiellement aux énergies fossiles [9, 11].

La collecte et la valorisation du biogaz permettent de récupérer le méthane généré lors de la dégradation des matières organiques, ce qui réduit l'empreinte climatique des centres d'enfouissement technique. Par ailleurs, l'énergie produite à partir des déchets peut remplacer une partie de l'électricité générée par le charbon ou le gaz naturel.

II.4.2 Réduction des volumes de déchets enfouis

Les technologies de valorisation énergétique permettent de réduire de manière significative les volumes de déchets dirigés vers l'enfouissement [12]. L'incinération peut diminuer le volume des résidus jusqu'à 90 %, tandis que la méthanisation valorise la fraction organique biodégradable.

Cette réduction contribue à prolonger la durée de vie des centres d'enfouissement techniques et à limiter les besoins en nouveaux sites de stockage.

II.4.3 Protection des ressources naturelles

La valorisation énergétique contribue à la sauvegarde des ressources naturelles en diminuant la consommation de combustibles fossiles [11, 12]. Elle permet également de réduire l'utilisation de terrains requis pour l'implantation de nouveaux centres d'enfouissement technique (CET).

Par ailleurs, certaines technologies favorisent la récupération de sous-produits valorisables tels que le compost, les mâchefers ou le digestat.

II.4.4 Contribution à l'économie circulaire

La valorisation énergétique s'inscrit tout à fait dans l'économie circulaire, ce modèle qui vise à mieux utiliser les ressources et à produire moins de déchets [11]. Ici, ce qu'on ne peut pas recycler devient une source d'énergie qu'on peut réinjecter dans le système de production.

Cette approche favorise une gestion plus durable des déchets ménagers tout en réduisant les impacts environnementaux associés à l'enfouissement.

Table II.4: Principaux bénéfices environnementaux de la valorisation énergétique

Aspect environnemental	Contribution
Réduction des déchets enfouis	Diminution des volumes stockés en CET
Réduction des émissions de GES	Captage et valorisation du méthane
Protection des ressources naturelles	Réduction de l'utilisation des combustibles fossiles
Économie circulaire	Valorisation énergétique des déchets ultimes

Source : Adapté de [9, 11, 12].



Figure II.5: Schéma de l'économie circulaire appliquée aux déchets ménagers

II.5 Dimension juridique et réglementaire

II.5.1 Cadre juridique international

La valorisation énergétique des déchets s'inscrit dans plusieurs accords internationaux pour protéger l'environnement et réduire les gaz à effet de serre [12, 13].

L'Accord de Paris et la Convention-cadre des Nations Unies sur le climat encouragent les solutions qui limitent les émissions venant des déchets. Dans ce cadre, récupérer et valoriser le biogaz est considéré comme une action qui favorise la transition énergétique.

Par ailleurs, certaines directives européennes relatives à la gestion des déchets établissent une hiérarchie des modes de traitement fondée sur la prévention, le recyclage, la valorisation énergétique et l'élimination finale.

II.5.2 Réglementation algérienne relative aux déchets

En Algérie, la gestion des déchets est essentiellement régie par la loi n°01-19 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets [5]. Ce texte législatif fixe les principes fondamentaux en matière de prévention, de tri, de valorisation et de traitement des résidus.

Le texte encourage également les opérations de valorisation des déchets afin de réduire les quantités destinées à l'enfouissement et de limiter les impacts environnementaux associés.

Cependant, le développement des technologies de valorisation énergétique reste confronté à plusieurs contraintes réglementaires et techniques, notamment l'absence de cadres spécifiques pour certaines installations de traitement énergétique.

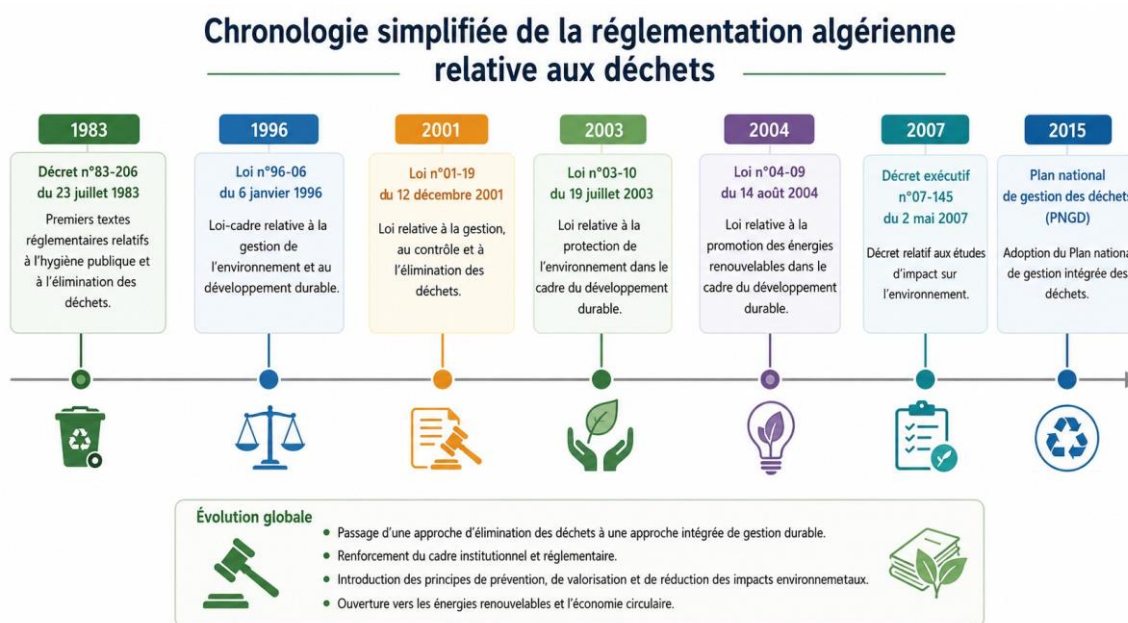


Figure II.6: Chronologie simplifiée de la réglementation algérienne relative aux déchets

Source : Adapté de la réglementation algérienne.

II.5.3 Lois liées à la protection de l'environnement

Plusieurs textes réglementaires viennent compléter le cadre juridique de la gestion des déchets en Algérie [5]. La loi relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable impose notamment la réalisation d'études d'impact environnemental pour les projets susceptibles de générer des nuisances.

D'autres dispositions concernent également la promotion des énergies renouvelables ainsi que l'encouragement des technologies visant à réduire les émissions polluantes et à préserver les ressources naturelles.

II.5.4 Acceptabilité sociale et sensibilisation environnementale

La réussite des projets de valorisation énergétique dépend également de leur acceptabilité par les populations locales [9, 12]. Certaines installations, en particulier les incinérateurs, peuvent générer des préoccupations liées aux rejets atmosphériques, aux nuisances olfactives ou aux impacts sanitaires potentiels.

Dans ce contexte, la sensibilisation environnementale et l'information des populations jouent un rôle essentiel pour améliorer l'adhésion aux projets de gestion durable des déchets.

Le développement de campagnes de sensibilisation et la participation des citoyens aux programmes de tri et de valorisation contribuent à renforcer l'efficacité des politiques environnementales.

Table II.5: Principaux textes réglementaires liés à la gestion et à la valorisation des déchets en Algérie

Texte réglementaire	Année	Objectif principal
Loi n°01-19 relative aux déchets	2001	Gestion, contrôle et valorisation des déchets
Loi n°03-10 relative à l'environnement	2003	Protection de l'environnement et développement durable
Loi n°04-09 sur les énergies renouvelables	2004	Promotion des énergies renouvelables
Décret sur les études d'impact	2007	Encadrement des études environnementales

Source : Adapté de la réglementation algérienne [5]

II.6 Dimension économique de la valorisation énergétique

II.6.1 Production d'énergie et rentabilité

La valorisation énergétique permet de produire de l'électricité et de la chaleur à partir des déchets ménagers [12]. Cette production contribue à diversifier les sources d'énergie tout en générant des revenus supplémentaires pour les collectivités locales.

La rentabilité des installations dépend principalement de la composition des déchets, du coût d'enfouissement, du prix de l'électricité et de la taille de l'unité de traitement [9, 8]. Les grandes installations présentent généralement de meilleures performances économiques grâce aux économies d'échelle.

Table II.6: Indicateurs économiques simplifiés des principales technologies

Technologie	Coût d'investissement	Rendement énergétique	Rentabilité
Incinération	Élevé	Élevé	Bonne à grande échelle
Méthanisation	Moyen	Moyen	Bonne pour déchets organiques
Valorisation du biogaz	Faible à moyen	Moyen	Rentable sur les CET existants

Source : Adapté de [9, 12, 8].

II.6.2 Réduction des coûts d'enfouissement

La valorisation énergétique contribue à réduire les volumes de déchets dirigés vers les centres d'enfouissement technique (CET), ce qui entraîne une baisse des coûts associés au transport, à l'exploitation des CET ainsi qu'au traitement des lixiviats [12].

Cette réduction contribue également à prolonger la durée de vie des infrastructures existantes et à limiter les investissements nécessaires pour la création de nouveaux sites d'enfouissement.

II.6.3 Création d'emplois verts

Le développement des filières de valorisation énergétique encourage la création d'emplois dans les secteurs du tri, de l'exploitation ainsi que de la maintenance des installations [11, 12].

Ces activités nécessitent des compétences techniques et contribuent au développement d'une économie verte basée sur la gestion durable des déchets.

Table II.7: Exemples d'emplois liés à la valorisation énergétique

Secteur	Types d'emplois
Collecte et tri	Agents de tri, opérateurs de collecte
Exploitation des unités	Techniciens, ingénieurs, conducteurs
Maintenance	Maintenance industrielle et contrôle
Gestion environnementale	Suivi environnemental et sécurité

Source : Adapté de [11, 12].

II.6.4 Investissements et contraintes financières

En dépit de leurs atouts, les technologies de valorisation énergétique requièrent des investissements initiaux considérables, de même que des compétences techniques pointues [9]. Les principales contraintes concernent les coûts élevés des équipements, l'absence de financements adaptés et les difficultés liées à l'exploitation des installations dans certains pays en développement.

Le recours aux partenariats public-privé et aux mécanismes internationaux de financement environnemental peut contribuer au développement de ces projets [8].

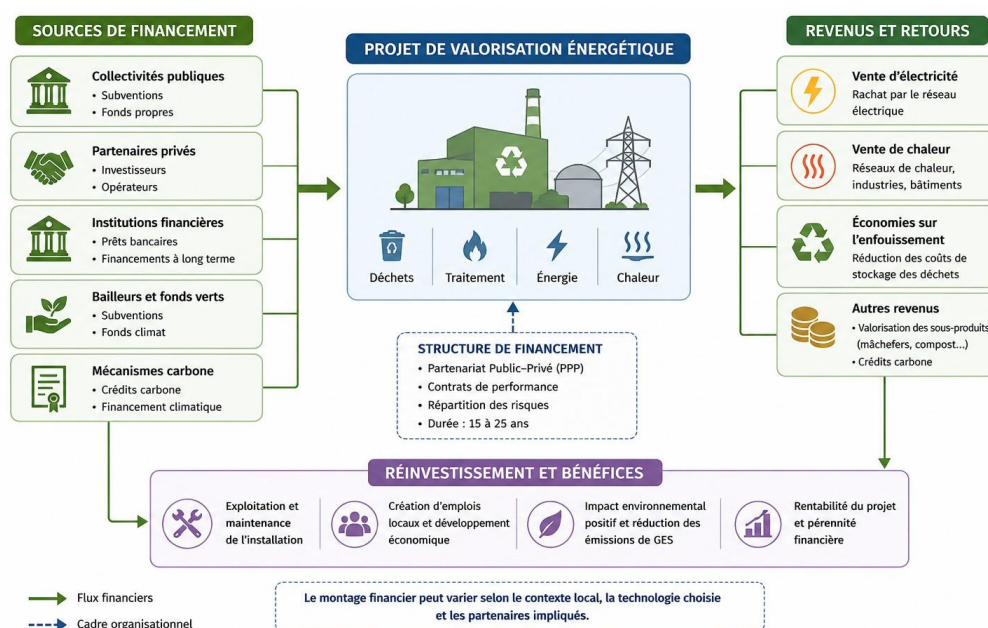


Figure II.7: Schéma simplifié du financement d'un projet de valorisation énergétique

II.7 Contribution de la valorisation énergétique au développement durable

II.7.1 Dimension environnementale

La valorisation énergétique permet d'atténuer les répercussions environnementales associées à l'enfouissement des déchets, en particulier les émissions de gaz à effet de serre ainsi que la contamination des sols et des ressources hydriques [9, 11]. Elle contribue également à diminuer les volumes de déchets dirigés vers les centres d'enfouissement technique (CET) et à préserver les ressources naturelles.

Cette approche s'inscrit dans les objectifs du développement durable relatifs à la protection de l'environnement et à la gestion durable des ressources [13].

II.7.2 Dimension économique

La valorisation énergétique stimule le développement économique par la production d'énergie, la diminution des coûts liés à l'enfouissement, ainsi que la création de nouvelles

Elle permet également de diversifier les sources énergétiques et de renforcer la sécurité énergétique, particulièrement dans les pays confrontés à une augmentation continue de la production des déchets.

II.7.3 Dimension sociale

Le déploiement des technologies de valorisation énergétique participe à l'amélioration des conditions sanitaires ainsi qu'à la diminution des nuisances associées aux décharges non contrôlées [11].

Ces projets favorisent également la création d'emplois verts dans les domaines de l'exploitation, de la maintenance et du suivi environnemental.

II.7.4 Perspectives de développement durable en Algérie

L'Algérie possède un potentiel considérable pour le développement de projets de valorisation énergétique, en raison de l'augmentation des volumes de déchets ménagers ainsi que de la part élevée de matières organiques biodégradables qu'ils contiennent [8].

Le développement de ces technologies pourrait contribuer à améliorer la gestion des déchets, à réduire les impacts environnementaux et à soutenir la transition énergétique nationale.

Toutefois, la réussite de cette transition nécessite un renforcement du cadre réglementaire, des investissements adaptés et une meilleure sensibilisation environnementale.

II.8 Conclusion

La valorisation énergétique des déchets ménagers constitue une solution durable permettant de réduire les impacts environnementaux liés à l'enfouissement tout en produisant une énergie renouvelable. Les différentes technologies étudiées, notamment l'incinération, la méthanisation et la valorisation du biogaz, offrent des perspectives intéressantes pour améliorer la gestion des déchets ménagers.

Au-delà de ses bénéfices environnementaux, la valorisation énergétique contribue également au développement économique et social grâce à la création d'emplois verts, à la réduction des coûts d'enfouissement et à la diversification des sources d'énergie.

Cependant, le développement de ces technologies nécessite un cadre réglementaire adapté, des investissements importants ainsi qu'une meilleure sensibilisation environnementale.

Dans ce contexte, la valorisation énergétique apparaît comme un levier essentiel pour atteindre les objectifs du développement durable, particulièrement dans les pays en développement comme l'Algérie.

CHAPITRE III

Étude du potentiel énergétique des déchets ménagers du Centre d'Enfouissement Technique d'Ouargla

III.1 Introduction

Après avoir présenté dans les chapitres précédents les principes de gestion des déchets ménagers ainsi que les principales technologies de valorisation énergétique, ce chapitre est consacré à une étude appliquée au Centre d'Enfouissement Technique (CET) d'Ouargla.

L'objectif principal est d'évaluer le potentiel énergétique du biogaz produit par les déchets ménagers enfouis et d'analyser la faisabilité technique, environnementale et économique d'un système de valorisation énergétique adapté au contexte saharien algérien.

L'étude repose sur les données réelles de production de déchets du CET d'Ouargla ainsi que sur la méthodologie du GIEC (IPCC) pour l'estimation du méthane généré par la décomposition anaérobie des déchets organiques. Les résultats obtenus permettront d'estimer la quantité de biogaz produite, le potentiel électrique récupérable et les émissions de gaz à effet de serre pouvant être évitées grâce à la valorisation énergétique.

III.2 Présentation du Centre d'Enfouissement Technique d'Ouargla

III.2.1 Localisation géographique

La wilaya d'Ouargla est située dans le Sud-Est algérien, au cœur de la région saharienne, à environ 800 km au sud de la capitale Alger. Le Centre d'Enfouissement Technique (CET) d'Ouargla, destiné aux déchets ménagers et assimilés, est implanté à environ 15 km au nord-est du centre-ville, dans la zone de Bordj Saïda [17, 18].

Le site a été choisi afin de limiter les nuisances liées à l'enfouissement des déchets tout en assurant l'accessibilité aux véhicules de collecte desservant les communes environnantes.

Les études géotechniques réalisées lors de l'implantation du CET ont montré que le sol est principalement constitué de formations sableuses et calcaires présentant une forte perméabilité [19]. Cette configuration géologique a nécessité la mise en place d'un système d'étanchéité artificielle à base de géomembranes en polyéthylène haute densité (PEHD) afin de limiter les infiltrations des lixiviats vers les couches profondes du sol et de protéger les eaux souterraines.

III.2.2 Conditions climatiques

La région d'Ouargla se caractérise par un climat saharien chaud et aride marqué par :

- des températures estivales élevées pouvant dépasser 45 °C
- une faible pluviométrie annuelle
- une forte évaporation
- des vents fréquents chargés de sable

Ces conditions influencent directement la décomposition des déchets et la production du biogaz.

III.2.3 Couverture démographique et communes desservies

Le CET d'Ouargla assure la gestion des déchets d'un ensemble de communes en expansion démographique. Les principales communes contributrices sont Ouargla (chef-lieu), Rouissat, Sidi Khouiled, Ain Beida et N'Goussa. La population totale de cette zone de collecte est estimée à plus de 250 000 habitants, avec une croissance soutenue qui se traduit par une augmentation corrélative du gisement de déchets.

III.2.4 Caractéristiques techniques du site

Le CET d'Ouargla s'étend sur une superficie d'environ 40 hectares avec une capacité de stockage importante destinée à répondre aux besoins croissants de la région en matière de gestion des déchets ménagers [18, 19].

Le centre est constitué de casiers d'enfouissement équipés d'un système d'étanchéité multicouche associant une géomembrane en polyéthylène haute densité (PEHD) et une couche d'argile compactée afin de limiter les infiltrations des lixiviats vers le sol [19].

Des réseaux de drainage permettent la collecte des lixiviats, lesquels sont dirigés vers des bassins d'évaporation adaptés aux conditions climatiques sahariennes caractérisées par un fort taux d'ensoleillement. Le site dispose également de puits de dégazage destinés au captage du biogaz produit par la décomposition des déchets organiques, bien que la valorisation énergétique de ce gaz reste encore limitée.

Par ailleurs, le CET est équipé d'un pont-bascule électronique assurant le suivi des tonnages de déchets réceptionnés. Il comprend également des infrastructures administratives ainsi qu'une zone de tri permettant la récupération partielle des matériaux recyclables.

III.2.5 Exploitation actuelle et enjeux

Selon les données de l'EPWG CET d'Ouargla, le centre reçoit quotidiennement une quantité importante de déchets ménagers provenant des communes environnantes, estimée à environ 170 tonnes par jour [18].

L'enfouissement constitue actuellement le principal mode de traitement utilisé sur le site. Toutefois, l'exploitation du CET fait face à plusieurs contraintes techniques et environnementales, notamment l'usure progressive des équipements, l'augmentation continue des quantités de déchets réceptionnées ainsi que la saturation progressive de certaines zones d'enfouissement.

Par ailleurs, la production de biogaz issue de la décomposition des matières organiques reste faiblement exploitée malgré son potentiel énergétique important. L'accumulation

de méthane dans les casiers peut également représenter un risque environnemental et sécuritaire en cas de mauvaise gestion du dégazage.

Dans ce contexte, le développement d'un système de captage et de valorisation énergétique du biogaz apparaît comme une solution pertinente permettant à la fois de réduire les impacts environnementaux et de produire une énergie valorisable.



Figure III.1: Vue générale du Centre d'Enfouissement Technique d'Ouargla

III.3 Quantité et composition des déchets ménagers au CET d'Ouargla

III.3.1 Quantité annuelle et répartition des déchets reçus

L'exploitation du Centre d'Enfouissement Technique (CET) d'Ouargla est assurée par l'Établissement Public de Gestion des Centres d'Enfouissement Technique (EPWG CET). Selon les données collectées pour l'année 2025, la quantité totale de déchets ménagers réceptionnée au niveau du centre est estimée à :

$$M = 62\,664,36 \text{ tonnes/an}$$

Le tableau suivant présente la répartition mensuelle des déchets reçus selon les principales communes desservies par le CET.

Table III.1: Répartition mensuelle des déchets reçus au CET d'Ouargla en 2025

Mois	Ouargla	Rouissat	Sidi Khouiled	N'Goussa	Ain Beida	Total
Janvier	3252,00	—	1053,92	200,32	—	4506,24
Février	3431,76	—	1600,90	201,66	—	5234,32
Mars	3334,74	—	1720,62	181,62	—	5236,98
Avril	2753,82	—	1690,52	180,64	—	4624,98
Mai	2877,24	—	1765,64	203,22	175,74	5021,84
Juin	3282,00	—	1736,46	228,40	233,98	5480,84
Juillet	2353,34	—	1688,38	164,08	284,72	4490,52
Août	1806,14	—	1699,34	128,92	275,92	3910,32
Septembre	3289,00	632,84	1535,74	168,48	343,84	5970,00
Octobre	3386,96	543,88	1839,20	202,06	383,06	6355,16
Novembre	4143,30	786,90	1677,54	179,66	425,20	7212,60
Décembre	3984,06	479,42	1689,44	217,90	324,08	6694,90
Total	37 894,36	2 443,04	19 697,70	2 256,96	2 446,54	62 664,36

Source : EPWG CET Ouargla (2025).

Les résultats montrent une augmentation progressive des quantités de déchets reçues au niveau du CET, principalement liée à la croissance démographique, à l'urbanisation ainsi qu'à l'amélioration des services de collecte.

La commune d'Ouargla représente le principal contributeur avec environ 60 % du tonnage total annuel, suivie par la commune de Sidi Khouiled. Cette concentration des apports traduit l'importance de la pression urbaine exercée sur les infrastructures de gestion des déchets dans la région.

III.3.2 Composition des déchets ménagers

La composition des déchets ménagers constitue un paramètre essentiel dans l'évaluation du potentiel de production de biogaz. Les analyses disponibles au niveau du CET d'Ouargla, associées aux données typologiques des régions sahariennes, montrent une forte dominance de la fraction organique biodégradable.

Table III.2: Composition moyenne des déchets ménagers du CET d'Ouargla

Type de déchet	Pourcentage (%)
Matières organiques	58
Plastiques	18
Papier / Carton	8
Verre	5
Métaux	4
Textiles	3
Déchets inertes	2
Autres	2
Total	100

Source : Données EPWG CET d'Ouargla (2025).

La fraction organique représente plus de la moitié des déchets réceptionnés au niveau du CET. Cette caractéristique est fréquente dans les pays en développement où les déchets ménagers contiennent une proportion importante de matières fermentescibles issues des restes alimentaires et des déchets verts.

Cette composition est favorable à la production de biogaz par dégradation anaérobie. En revanche, la forte humidité des déchets réduit leur pouvoir calorifique et limite l'efficacité d'une valorisation thermique directe par incinération.

Table III.3: Principaux paramètres physico-chimiques des déchets ménagers

Paramètre	Valeur moyenne
Humidité (%)	55 – 65
Matière organique volatile (% MS)	45 – 50
Carbone organique dégradable (DOC)	0,20 – 0,25
Pouvoir calorifique inférieur (PCI)	1800 – 2200 kJ/kg
Densité moyenne	0,35 t/m ³

Source : Adapté de [12, 15, 20].

Les paramètres physico-chimiques observés montrent que les déchets du CET d'Ouargla présentent un potentiel intéressant pour la production de biogaz. La teneur relativement élevée en matière organique biodégradable favorise la génération de méthane, tandis que

le faible pouvoir calorifique inférieur limite l'intérêt d'une incinération classique sans prétraitement préalable.

III.3.3 État actuel du recyclage et perte de potentiel de valorisation

Les données fournies par l'EPWG CET d'Ouargla montrent que les activités de recyclage restent très limitées. Sur une quantité totale de 62 664 tonnes de déchets réceptionnées durant l'année 2025, seulement 88,88 tonnes de matériaux recyclables ont été récupérées, soit un taux de valorisation matière estimé à environ 0,14 %.

Ce faible taux de récupération s'explique principalement par l'absence de collecte sélective à la source ainsi que par les limites du tri manuel réalisé directement au niveau du site d'enfouissement. Certaines perturbations techniques et opérationnelles observées au cours de l'exploitation ont également contribué à réduire l'efficacité des opérations de récupération.

Cette situation met en évidence une perte importante de ressources potentiellement valorisables. En effet, une grande partie des déchets recyclables et des matières organiques fermentescibles est actuellement enfouie sans traitement préalable.

Dans ce contexte, le développement d'une filière de valorisation énergétique apparaît comme une solution complémentaire permettant de réduire les volumes enfouis et de récupérer une partie du potentiel énergétique des déchets. Toutefois, cette approche doit s'accompagner progressivement d'une politique de tri sélectif et d'amélioration des filières de recyclage afin d'optimiser la gestion durable des déchets ménagers.

III.4 Évaluation du potentiel énergétique par le modèle du GIEC (IPCC)

L'évaluation du potentiel de production de méthane au niveau du CET d'Ouargla repose sur la méthodologie proposée par le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC/IPCC) [15]. Cette approche est largement utilisée pour l'estimation des émissions de méthane provenant des centres d'enfouissement.

III.4.1 Équation du modèle

L'équation simplifiée utilisée pour estimer la production annuelle de méthane est donnée par :

$$Q_{CH_4} = M \times DOC \times DOC_f \times F \times \frac{16}{12}$$

Où :

- Q_{CH_4} : quantité annuelle de méthane produite (t/an) ;
- M : masse annuelle de déchets enfouis (t/an) ;

- DOC : fraction de carbone organique dégradable ;
- DOC_f : fraction du carbone organique effectivement décomposée ;
- F : fraction volumique de méthane dans le biogaz ;
- $\frac{16}{12}$: facteur de conversion du carbone en méthane.

III.4.2 Paramètres retenus

Les paramètres retenus pour le CET d'Ouargla sont présentés dans le tableau suivant.

Table III.4: Paramètres utilisés pour l'estimation du méthane

Paramètre	Valeur	Justification
Masse annuelle de déchets (M)	62 664 t	Données EPWG CET 2025
Carbone organique dégradable (DOC)	0,20	Déchets à forte humidité
Fraction décomposée (DOC_f)	0,77	Valeur recommandée par le GIEC
Fraction méthane (F)	0,50	Valeur moyenne des CET
Facteur de conversion	$\frac{16}{12}$	Constante de conversion

Source : Adapté du modèle IPCC [15].

III.4.3 Production annuelle de méthane

En appliquant les paramètres précédents, la production annuelle de méthane est estimée à :

$$Q_{CH_4} \approx 6\,428 \text{ t/an}$$

Le volume annuel de méthane est calculé par :

$$V_{CH_4} = \frac{Q_{CH_4} \times 1000}{0,716}$$

Le volume obtenu est estimé à :

$$V_{CH_4} \approx 8,98 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$$

Le volume total de biogaz produit est donc :

$$V_{biogaz} \approx 17,95 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$$

La production journalière moyenne de biogaz est estimée à :

$$V_{biogaz/jour} \approx 49\,200 \text{ m}^3/\text{jour}$$

III.5 Potentiel énergétique du biogaz

III.5.1 Énergie brute produite

Le pouvoir calorifique inférieur du méthane est estimé à :

$$PCI_{CH_4} = 9,97 \text{ kWh/m}^3$$

L'énergie brute annuelle disponible est donnée par :

$$E_{brute} = V_{CH_4} \times PCI_{CH_4}$$

L'énergie brute produite est estimée à :

$$E_{brute} \approx 89,5 \text{ GWh/an}$$

III.5.2 Production électrique récupérable

La conversion du biogaz en électricité est assurée par un moteur à biogaz présentant un rendement moyen de :

$$\eta_{elec} = 35\%$$

L'énergie électrique récupérable est alors :

$$E_{elec} = E_{brute} \times \eta_{elec}$$

La production électrique annuelle estimée est :

$$E_{elec} \approx 31,3 \text{ GWh/an}$$

La puissance électrique moyenne correspondante est :

$$P_{moy} \approx 3,6 \text{ MW}$$

Cette production pourrait alimenter environ :

$$N_{foyers} \approx 10\,400 \text{ foyers}$$

sur la base d'une consommation moyenne de 3000 kWh/an par foyer.

III.5.3 Interprétation des résultats

Les résultats obtenus montrent que le CET d'Ouargla possède un potentiel énergétique significatif lié à la forte proportion de déchets organiques biodégradables. La valorisation du biogaz permettrait non seulement de produire une énergie renouvelable, mais également de réduire les émissions de méthane libérées dans l'atmosphère.

Table III.5: Synthèse du potentiel énergétique du CET d'Ouargla

Paramètre	Valeur estimée
Masse annuelle de déchets	62 664 t/an
Production annuelle de méthane	6 428 t/an
Volume annuel de méthane	8,98 millions m ³ /an
Production annuelle de biogaz	17,95 millions m ³ /an
Production journalière de biogaz	49 200 m ³ /jour
Énergie brute annuelle	89,5 GWh/an
Production électrique annuelle	31,3 GWh/an
Puissance électrique moyenne	3,6 MW
Équivalent foyers alimentés	10 400 foyers

Source : Calculs réalisés à partir du modèle IPCC [15].

III.6 Dimensionnement préliminaire d'un système de captage et de valorisation du biogaz**III.6.1 Scénario technologique proposé**

Compte tenu des caractéristiques du CET d'Ouargla, notamment l'absence de tri sélectif à la source, la forte proportion de déchets organiques ainsi que la disponibilité d'un réseau électrique local, le scénario retenu consiste à mettre en place un système de captage du biogaz couplé à une unité de production d'électricité par moteur à combustion interne [9, 12, 16].

Cette solution présente plusieurs avantages : simplicité d'exploitation, modularité, adaptation aux gisements de taille moyenne et réduction des émissions de méthane. Par ailleurs, les conditions actuelles du site ne permettent pas l'installation d'une unité de méthanisation classique nécessitant un tri préalable des biodéchets.

III.6.2 Réseau de captage du biogaz

Le système de captage proposé repose sur l'installation de puits verticaux implantés dans les casiers d'enfouissement afin de collecter le biogaz produit par la décomposition anaérobie des déchets.

Le biogaz capté est ensuite transporté par un réseau de collecteurs vers une station centrale de traitement. Un système d'aspiration par ventilateur permet de maintenir une légère dépression afin d'assurer une extraction continue du gaz.

Table III.6: Caractéristiques techniques du réseau de captage

Élément	Caractéristique
Nombre de puits verticaux	15 – 20
Profondeur des puits	8 – 12 m
Espacement entre puits	30 – 50 m
Matériau des conduites	PEHD
Diamètre des collecteurs	200 – 300 mm
Système d'aspiration	Ventilateur à débit variable

Source : Élaboration personnelle à partir des données techniques du CET.

III.6.3 Traitement du biogaz avant valorisation

Avant son utilisation énergétique, le biogaz doit subir plusieurs opérations de traitement afin d'éliminer les impuretés susceptibles d'endommager le moteur ou de réduire les performances énergétiques.

Les principales étapes proposées sont :

1. Déshumidification du biogaz ;
2. Élimination du sulfure d'hydrogène (H_2S) ;
3. Filtration des particules ;
4. Compression légère avant combustion.

Ces traitements permettent d'améliorer la qualité du biogaz et de prolonger la durée de vie des équipements de valorisation.

III.6.4 Groupe électrogène à biogaz

La production électrique est assurée par un moteur à combustion interne spécialement adapté au biogaz. Sur la base des calculs précédents, la puissance électrique moyenne récupérable est estimée à environ 3,6 MW.

Afin de garantir un fonctionnement stable et de prendre en compte les variations saisonnières de production du biogaz, une puissance installée de 4 MW est retenue.

Table III.7: Caractéristiques du groupe électrogène proposé

Caractéristique	Valeur
Type de moteur	Moteur à biogaz
Puissance installée	4 MW
Rendement électrique	35 – 40 %
Disponibilité moyenne	85 – 90 %
Consommation spécifique	~0,5 m ³ CH ₄ /kWh

Source : Adapté de [12, 16].

III.6.5 Adaptation au contexte saharien

Les conditions climatiques d'Ouargla imposent certaines adaptations techniques spécifiques. Les températures élevées et la présence fréquente de poussières nécessitent notamment un système de refroidissement renforcé ainsi qu'une protection adaptée des équipements électriques et mécaniques.

L'utilisation de matériaux résistants aux rayonnements UV et à la corrosion est également recommandée afin d'assurer la durabilité des installations dans le contexte saharien.

III.6.6 Synthèse du dimensionnement**Table III.8: Synthèse du dimensionnement préliminaire**

Composant	Valeur estimée
Débit de biogaz traité	~2 050 m ³ /h
Puissance du blower	30 – 50 kW
Surface de la station	500 – 800 m ²
Personnel requis	6 – 10 personnes
Puissance électrique installée	4 MW

Source : Élaboration personnelle à partir des résultats de l'étude.

III.7 Analyse économique du projet

L'analyse économique du projet de valorisation du biogaz du CET d'Ouargla repose sur une estimation préliminaire des coûts d'investissement, des charges d'exploitation ainsi que des revenus issus de la production d'électricité.

Les hypothèses retenues sont les suivantes :

- durée de vie du projet : 20 ans
- taux d'actualisation : 8 %
- prix moyen de vente de l'électricité : 12 DA/kWh
- production électrique annuelle estimée : 31,3 GWh/an

III.7.1 Investissement initial (CAPEX)

L'investissement initial comprend les équipements de captage, les installations de traitement du biogaz, le groupe électrogène ainsi que les travaux de génie civil et de raccordement électrique.

Table III.9: Répartition estimative de l'investissement initial

Poste d'investissement	Coût estimé (DA)
Puits de captage et collecteurs	150 000 000
Station de traitement du biogaz	120 000 000
Groupe électrogène à biogaz	250 000 000
Travaux de génie civil	80 000 000
Raccordement électrique	50 000 000
Total estimé	650 000 000 DA

Source : Estimation réalisée à partir des données techniques du projet.

III.7.2 Coûts d'exploitation annuels (OPEX)

Les coûts d'exploitation comprennent principalement la maintenance des équipements, les salaires du personnel, les consommables ainsi que les dépenses énergétiques auxiliaires.

$$OPEX \approx 61,5 \text{ millions DA/an}$$

Table III.10: Principales charges d'exploitation annuelles

Poste de coût	Valeur annuelle (DA)
Maintenance	32 500 000
Personnel d'exploitation	18 000 000
Énergie auxiliaire	3 000 000
Consommables et pièces d'usure	5 000 000
Frais divers	3 000 000
Total OPEX	61 500 000 DA/an

III.7.3 Revenus annuels générés

Les revenus proviennent essentiellement de la vente de l'électricité produite à partir du biogaz.

$$R = E_{elec} \times Prix_{kWh}$$

Avec :

$$E_{elec} = 31,3 \times 10^6 \text{ kWh/an}$$

$$Prix_{kWh} = 12 \text{ DA/kWh}$$

Le revenu annuel estimé est donc :

$$R \approx 375,6 \text{ millions DA/an}$$

III.7.4 Indicateurs de rentabilité

Le bénéfice net annuel est donné par :

$$B_{net} = R - OPEX$$

$$B_{net} \approx 314 \text{ millions DA/an}$$

Les principaux indicateurs économiques obtenus sont présentés dans le tableau suivant.

Table III.11: Indicateurs économiques estimés du projet

Indicateur	Valeur estimée
Investissement initial (CAPEX)	650 millions DA
Coûts d'exploitation annuels	61,5 millions DA/an
Revenus annuels	375,6 millions DA/an
Bénéfice net annuel	314 millions DA/an
Temps de retour estimé (PBP)	3 – 5 ans
Valeur actuelle nette (VAN)	Positive
Taux de rendement interne (TRI)	Supérieur au taux d'actualisation

Source : Calculs réalisés à partir des hypothèses retenues.

III.7.5 Discussion économique

Les résultats obtenus montrent que le projet présente une rentabilité économique intéressante, principalement grâce au potentiel énergétique élevé du biogaz produit au niveau du CET d'Ouargla.

La valorisation énergétique permet également de réduire les coûts indirects liés à l'enfouissement des déchets et de prolonger la durée de vie des infrastructures existantes. Toutefois, la réussite du projet dépendra de plusieurs facteurs, notamment la stabilité des équipements, la maîtrise des coûts d'exploitation et l'existence d'un cadre réglementaire favorable à la vente de l'électricité produite.

III.8 Impacts environnementaux et contribution au développement durable

III.8.1 Réduction des émissions de gaz à effet de serre

Le captage et la valorisation énergétique du biogaz permettent de réduire significativement les émissions de gaz à effet de serre associées à l'enfouissement des déchets ménagers.

Le méthane (CH₄) issu de la décomposition des matières organiques possède un pouvoir de réchauffement global environ 28 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone sur une période de 100 ans [15].

Les émissions théoriques évitées peuvent être estimées par :

$$CO_{2-eq} = Q_{CH_4} \times PRG_{CH_4}$$

Avec :

$$Q_{CH_4} = 6\,428 \text{ t/an}$$

$$PRG_{CH_4} = 28$$

Les émissions évitées sont donc estimées à :

$$CO_{2-eq} \approx 180\,000 \text{ tCO}_{2-eq}/\text{an}$$

Cette réduction contribue directement à l'atténuation des impacts climatiques liés au secteur des déchets.

III.8.2 Réduction des nuisances environnementales

La mise en place d'un système de captage du biogaz permet également de réduire plusieurs nuisances environnementales observées au niveau des centres d'enfouissement.

Le captage limite notamment les émissions d'odeurs liées au sulfure d'hydrogène (H₂S) ainsi que la dispersion des composés organiques volatils. Il contribue également à réduire les risques liés à l'accumulation du méthane dans les casiers d'enfouissement.

Par ailleurs, la valorisation énergétique permet de diminuer la quantité de biogaz rejetée directement dans l'atmosphère tout en améliorant les conditions d'exploitation du site.

III.8.3 Contribution au développement durable

Le projet de valorisation énergétique proposé contribue à plusieurs dimensions du développement durable :

- réduction des émissions de gaz à effet de serre ;

- production d'électricité à partir d'une source renouvelable ;
- amélioration de la gestion des déchets ménagers ;
- réduction des nuisances environnementales ;
- création d'emplois techniques liés à l'exploitation des installations.

Le projet s'inscrit également dans plusieurs Objectifs de Développement Durable (ODD), notamment l'ODD 7 relatif à l'énergie propre, l'ODD 11 concernant les villes durables, l'ODD 12 lié à la gestion responsable des ressources ainsi que l'ODD 13 consacré à la lutte contre les changements climatiques.

III.8.4 Comparaison entre le scénario actuel et le scénario proposé

Afin d'évaluer l'intérêt de la valorisation énergétique du biogaz au niveau du CET d'Ouargla, une comparaison a été établie entre la situation actuelle, caractérisée par l'enfouissement sans récupération énergétique, et le scénario proposé intégrant un système de captage et de valorisation du biogaz.

Cette comparaison permet de mettre en évidence les principaux bénéfices environnementaux et énergétiques attendus du projet.

Table III.12: Comparaison entre le scénario actuel et le scénario de valorisation énergétique

Aspect	Situation actuelle	Scénario proposé
Gestion du biogaz	Rejet direct dans l'atmosphère	Captage et valorisation énergétique
Émissions de GES	Élevées	Réduites
Production d'énergie	Absente	31,3 GWh/an
Nuisances olfactives	Importantes	Réduites
Valorisation énergétique	Inexistante	Production électrique

Source : Élaboration personnelle à partir des résultats de l'étude.

L'analyse comparative montre que le scénario proposé présente des avantages significatifs par rapport à la situation actuelle. En plus de réduire les émissions de gaz à effet de serre et les nuisances environnementales associées à l'enfouissement, il permet la production d'une

énergie renouvelable valorisable localement. Ces résultats confirment la pertinence de la mise en place d'un système de captage et de valorisation du biogaz au CET d'Ouargla.

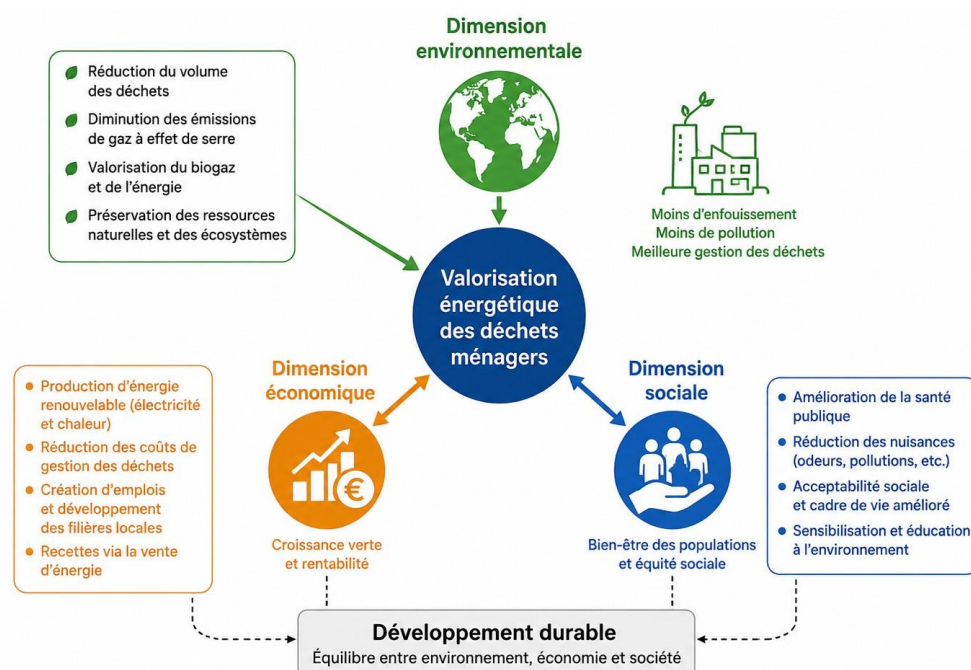


Figure III.2: Contribution de la valorisation énergétique aux dimensions du développement durable

III.9 Conclusion

Cette étude a permis d'évaluer le potentiel énergétique des déchets ménagers enfouis au niveau du Centre d'Enfouissement Technique (CET) d'Ouargla à travers une approche basée sur l'analyse des quantités de déchets, leur composition ainsi que l'application du modèle IPCC pour l'estimation du méthane produit.

Les résultats obtenus montrent que les déchets ménagers du CET présentent une forte proportion de matière organique biodégradable, favorable à la production de biogaz. La production annuelle de méthane a été estimée à environ 6 428 tonnes, correspondant à un volume important de biogaz pouvant être valorisé énergétiquement.

L'évaluation énergétique a montré qu'une production électrique d'environ 31,3 GWh/an pourrait être obtenue à partir du biogaz capté, ce qui représente un potentiel énergétique significatif pour la région d'Ouargla.

Le dimensionnement préliminaire proposé repose sur un système de captage du biogaz associé à un groupe électrogène d'une puissance installée de 4 MW. Les résultats de l'analyse économique montrent que ce projet présente une rentabilité intéressante grâce aux revenus générés par la production d'électricité et à la réduction des impacts liés à l'enfouissement des déchets.

Sur le plan environnemental, la valorisation énergétique du biogaz permettrait de

réduire les émissions de gaz à effet de serre, de limiter les nuisances environnementales et d'améliorer les conditions d'exploitation du CET. Le projet contribue également aux objectifs du développement durable à travers la production d'énergie renouvelable et l'amélioration de la gestion des déchets ménagers.

Ainsi, cette étude met en évidence l'intérêt technique, énergétique et environnemental de la valorisation du biogaz du CET d'Ouargla, tout en ouvrant des perspectives pour le développement de projets similaires dans d'autres régions sahariennes algériennes.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

La gestion des déchets ménagers constitue aujourd'hui un enjeu environnemental, économique et énergétique majeur à l'échelle mondiale. L'augmentation continue des quantités de déchets produites, associée à la croissance démographique et à l'urbanisation rapide, nécessite le développement de solutions durables permettant de réduire les impacts environnementaux liés à l'enfouissement tout en valorisant les ressources contenues dans les déchets.

Dans ce contexte, les centres d'enfouissement techniques représentent une amélioration importante par rapport aux décharges sauvages grâce aux dispositifs de confinement, de drainage des lixiviats et de captage du biogaz. Toutefois, malgré ces améliorations, l'enfouissement des déchets demeure associé à plusieurs contraintes environnementales telles que les émissions de méthane, la production de lixiviats et la saturation progressive des sites d'enfouissement.

La valorisation énergétique des déchets ménagers apparaît ainsi comme une alternative durable permettant de transformer les déchets en source d'énergie renouvelable tout en réduisant les impacts environnementaux associés à leur élimination. Les technologies étudiées dans ce travail, notamment la méthanisation, l'incinération avec récupération énergétique et la valorisation du biogaz, montrent que les déchets ménagers possèdent un potentiel énergétique important pouvant contribuer à la transition énergétique et au développement durable.

L'étude appliquée au Centre d'Enfouissement Technique d'Ouargla a permis de mettre en évidence l'existence d'un potentiel significatif de production de biogaz lié à la forte proportion de matières organiques biodégradables présentes dans les déchets ménagers de la région. Les résultats obtenus à partir du modèle IPCC ont montré qu'une quantité importante de méthane peut être produite par la décomposition anaérobie des déchets enfouis.

L'évaluation énergétique réalisée a permis d'estimer une production électrique récupérable importante pouvant contribuer à l'alimentation énergétique locale tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. Le projet proposé de captage et de valorisation énergétique du biogaz présente également des avantages environnementaux significatifs, notamment la réduction des nuisances olfactives, la limitation des émissions de méthane et l'amélioration des conditions d'exploitation du CET.

Sur le plan économique, les résultats de l'étude montrent que la valorisation énergétique du biogaz peut représenter une solution rentable à moyen terme grâce aux revenus générés par la production d'électricité et à la réduction des coûts indirects liés à la gestion des déchets. Le développement de ce type de projet pourrait également favoriser la création d'emplois techniques spécialisés dans les domaines de l'exploitation, de la maintenance et du suivi environnemental.

Conclusion générale

Par ailleurs, cette étude met en évidence l'importance d'intégrer progressivement les principes de l'économie circulaire dans les politiques de gestion des déchets ménagers en Algérie. La réduction à la source, le tri sélectif, le recyclage et la valorisation énergétique constituent des axes complémentaires permettant d'améliorer durablement la gestion des déchets et de limiter les impacts environnementaux associés à leur élimination.

Cependant, la réussite de ces projets nécessite plusieurs conditions essentielles, notamment le renforcement du cadre réglementaire, le développement des infrastructures de tri et de valorisation, la disponibilité des financements ainsi qu'une meilleure sensibilisation environnementale des citoyens et des collectivités locales.

Dans les régions sahariennes algériennes, les conditions climatiques particulières imposent également certaines adaptations techniques afin d'assurer la durabilité et l'efficacité des installations de valorisation énergétique. Malgré ces contraintes, les perspectives de développement de la valorisation du biogaz demeurent prometteuses compte tenu de l'augmentation continue des quantités de déchets ménagers et de la nécessité de diversifier les sources d'énergie.

En définitive, cette étude montre que la valorisation énergétique du biogaz issu des centres d'enfouissement techniques constitue une solution pertinente permettant de concilier gestion durable des déchets, production d'énergie renouvelable et protection de l'environnement. Elle ouvre également des perspectives intéressantes pour le développement de projets similaires dans d'autres régions algériennes confrontées aux mêmes problématiques environnementales et énergétiques.

BIBLIOGRAPHY

Bibliography

- [1] Tchobanoglous, G., & Theisen, H. (1993). *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*. New York: McGraw-Hill.
- [2] ADEME (Agence de la Transition Écologique). (2021). *Déchets chiffres-clés : Édition 2021*. Paris: ADEME Éditions.
- [3] United Nations Environment Programme (UNEP). (2024). *Global Waste Management Outlook 2024 – Beyond an Age of Waste: Turning Rubbish into a Resource*. Nairobi: UNEP.
- [4] Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington, DC: World Bank Group.
- [5] République Algérienne Démocratique et Populaire. (2001). Loi n° 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets. *Journal Officiel de la République Algérienne*, n°77.
- [6] Kumar, A., & Samadder, S. R. (2017). A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. *Waste Management*, 69, 407–422.
- [7] Makarichi, L., Jutidamrongphan, W., & Techato, K. (2018). The evolution of waste-to-energy incineration: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 812–821.
- [8] Scarlat, N., Motola, V., Dallemand, J. F., Monforti-Ferrario, F., & Mofor, L. (2015). Evaluation of energy potential of municipal solid waste from African urban areas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1269–1286.
- [9] Khan, I., & Kabir, Z. (2020). *Waste-to-energy generation technologies and the developing economies: A multi-criteria analysis for sustainability assessment*. *Renewable Energy*, 150, 320–333.
- [10] Lee, D. (2022). *Gasification of municipal solid waste (MSW) as a cleaner final disposal route: A mini-review*. *Bioresource Technology*, 344.
- [11] Ddiba, D., Andersson, K., Rosemarin, A., Schulte-Herbrüggen, H., & Dickin, S. (2022). *The circular economy potential of urban organic waste streams in low-*

Bibliography

- and middle-income countries*. Environment, Development and Sustainability, 24, 1116–1144.
- [12] Malav, L. C., Yadav, K. K., Gupta, N., Kumar, S., Sharma, G. K., Krishnan, S., & Ngo, H. H. (2020). *A review on municipal solid waste as a renewable source for waste-to-energy project in India: Current practices, challenges, and future opportunities*. Journal of Cleaner Production, 277, 123227.
- [13] World Commission on Environment and Development (WCED). (1987). *Our Common Future*. Oxford University Press, Oxford.
- [14] United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2005). *Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide*. Washington, DC: Office of Research and Development.
- [15] IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 5: Waste*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Japan.
- [16] IEA Bioenergy. (2018). *Biogas and Biomethane: Technologies and Utilisation*. International Energy Agency.
- [17] EPWG CET Ouargla. (2014). *Présentation du Centre d'Enfouissement Technique d'Ouargla*. Disponible sur : http://www.epwgcetouargla.com/ar/article_6.htm (consulté le 10 mai 2026).
- [18] EPWG CET Ouargla. (2012). *Rapport annuel du Centre d'Enfouissement Technique d'Ouargla*. Ouargla, Algérie.
- [19] Ferouhat, A. (2016). *Étude environnementale du Centre d'Enfouissement Technique d'Ouargla*. Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [20] ADEME. (2020). *Méthanisation et valorisation énergétique du biogaz*. Paris : Agence de la Transition Écologique.
- [21] Office National des Statistiques (ONS). (2022). *Données démographiques de la wilaya d'Ouargla*. Algérie.
- [22] World Bank. (2020). *Municipal Solid Waste Management and Waste-to-Energy in Developing Countries*. Washington DC.
- [23] European Environment Agency (EEA). (2021). *Greenhouse gas emission factors for waste management*. Copenhagen.
- [24] UN-Habitat. (2021). *Waste Wise Cities Tool Reference Manual*. Nairobi.