



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب بليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الميكانيك
Département de Mécanique

Mémoire de Master II

En Génie Mécanique

Option : Optimisation des Systèmes Énergétiques

Présenté par :

Mr Omar ABBAS

&

Mr Riad BELAMIRI

Estimation du potentiel énergétique d'un CET

Proposé par : **Dr N.KHELALFA (Univ Blida 1)**

Pr T.BENABDALLAH (ENP ORAN)

Année Universitaire 2016-2017

Dédicaces

Que ce travail témoigne de nos respects :

A nos parents :

Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer notre respect, notre considération et nos profonds sentiments envers eux,

Nous prions le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de Nous.

A toute les membres de nos familles.

Ils vont trouver ici l'expression de mes sentiments de respect et de reconnaissance pour le soutien qu'ils n'ont cessé de me porter.

A tous nos professeurs :

Leur générosité et leur soutien m'oblige de leurs témoigner notre profond respect et notre loyale considération.

A tous nos amis et nos collègues :

Ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.

RIAD

Dédicaces

Que ce travail témoigne de nos respects :

A nos parents :

Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer notre respect, notre considération et nos profonds sentiments envers eux,

Nous prions le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de Nous.

A toute les membres de nos familles.

Ils vont trouver ici l'expression de mes sentiments de respect et de reconnaissance pour le soutien qu'ils n'ont cessé de me porter.

A tous nos professeurs :

Leur générosité et leur soutien m'oblige de leurs témoigner notre profond respect et notre loyale considération.

A tous nos amis et nos collègues :

Ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.

OMAR

Remerciements :

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

*En second lieu, nous tenons à remercier notre promotrice Mme : **Dr N.KEhLELFA**, son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail, ainsi que toutes ces remarques constructives qui nous ont permis d'approfondir les connaissances scientifiques.*

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail Et de l'enrichir par leurs propositions.

*Nous tenons à exprimer notre gratitude envers l'ensemble de laboratoire **IPSIL PR BENABDELLAH** et **M^{lle} SANAA** qui nous ont beaucoup aidé notre travail.*

*Notre gratitude est aussi acquise à notre ami **HOUSSEM** qui nous a beaucoup aidé pour réalise ce projet.*

*On n'oublie pas **Mr N.SOUDANI**, et **Mme S.BOUCHEFER**, qui par leur compréhension et leur aide, on a pu accomplir notre travail de recherche.*

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci à tous et à toutes.

Sommaire

Sommaire :

Liste d'abréviations	5
Liste des Symboles	7
List des figures	8
Liste des tableaux	10
Résumé	11
Introduction Générale.....	14
Chapitre I : Recherche Bibliographie.....	17
Introduction	17
I.1. Evolution du Biogaz	18
I.2. Etat des lieux	19
I.2.1 Biogaz dans le monde	19
I.2.1.1. Biogaz en Europe	19
I.2.2. Biogaz au Etats Unis	22
I.2.3. Biogaz en Chine	22
I.2.4. Biogaz en Afrique	23
I.3. Etat de l'art	25
Introduction	25
I.3.1 Equations mathématiques des modèles d'ordre zéro et d'ordre un	26
I.3.1.1. Modèles d'ordre zéro	26
I.3.1.2. Modèles d'ordre un	26
I.3.2. Différences entre les modèles d'ordre zéro et d'ordre un	29
Conclusion	30
Chapitre II : Enjeux du Biogaz.....	32
II.1 Risques du biogaz	32
II.1.1 Risques du métier	32
II.1.1.1 Risques infectieux.....	32
II.1.1.2 Risque allergique	32
II.1.1.3 Atteinte psychologique	32

Sommaire

II.1.1.4 mesures de protection	32
II.1.2 La géo-membrane en Polyéthylène Haute Densité (PEHD)	33
II.1.2.1 La difficulté de manipulation des bâches en PEHD	34
II.2 Caractéristiques et toxicité des biogaz	35
II.2.1 Toxicité des biogaz	36
II.2.2 Pathologies liées à l'exposition aux biogaz : (et effets similaires ou croisés, dus à la pollution de l'eau par les lixiviats)	36
II.2.3 Accident survenu au CET	37
II.3 Pollution du biogaz	37
II.3.1 Pollution olfactive.....	37
II.3.2 Pollution mécanique	37
II.3.3 Pollution routière	38
II.3.4 Pollution sonore.....	38
Chapitre III : Caractérisation des déchets	40
III.1 Décharge sauvage	40
III.2 Description des décharges	40
III.2.1 La décharge contrôlée traditionnelle	40
III.2.2 La décharge contrôlée compactée	41
III.2.3 La décharge d'ordures préalablement broyées	41
III.3 Centre d'Enfouissement Technique CET	42
III.4 Définition du terme « déchet »	42
III.4.1 Les Déchets Ménagers et Assimilés (DMA)	43
III.4.2 Déchets encombrants	43
III.4.3 Déchets spéciaux	43
III.4.4 Déchets spéciaux dangereux	43
III.4.5 Déchets d'activité de soins	43
III.4.6 Déchets inertes	43
III.5 Composition physique des déchets en Algérie.....	44
III.6 Le recyclage	44
III.7 Compactage des déchets	45
III.8 Gaz à effet de serre GES	45
III.9 La biomasse	45
III.9.1 Définition de la biomasse	45
III.9.2 La potentielle biomasse	46
III.9.3 Les aspects positifs de la biomasse énergie.....	46

Sommaire

III.10 Le biogaz	46
III.10.1 Définition du biogaz.....	46
III.10.2 Compositions moyennes des biogaz	47
III.10.3 Les économies énergétiques de biogaz	47
III.10.4 Les avantages de biogaz	47
III.11 Le bio-méthane	48
III.11.1 Définition du bio-méthane	48
III.11.2 Les avantages du biométhane	48
Chapitre IV : Problématique et méthode de résolution	50
Partie (A) : Problématique.....	50
IV.A.1 problématique	50
Assainissements de L'environnement: à travers le traitement des eaux et la mise en sécurité des décharges et la bio-ré-médiation.....	50
Partie (B) : Méthode de résolution	52
IV.B.1 Modèle de prédiction de production de biogaz	52
Introduction	52
IV.B.1.1 Modèle cinétiques d'ordre 1 (Hoeks, 1983)	52
Partie (C): Méthode numérique de résolution	56
Introduction	56
IV.C.1 Sur MATLAB	56
IV.C.1.1 définition du programme MATLAB	56
IV.C.1.2 Organigramme de modèle du HOUKS sur MATLAB	57
IV.C.2 Sur JAVA	58
IV.C.2.1 définition du programme JAVA	58
IV.C.2.2 Organigramme de modèle du HOUKS sur JAVA	58
Conclusion	60
Chapitre V : Guide d'utilisateur du logiciel BIOlandGAS	62
Introduction	62
V.1 Compréhension du BIOlandGAS.....	62
V.2 Schéma de calcul.....	62
V.3 Description de logiciel	63
V.3.1 Action a performer	64
V.3.2 Caractéristiques d'enfouissement	65

Sommaire

V.3.3 Déterminer les paramètres du modèle	66
V.3.4Vérification des paramètres (INPUTS REVIEW).....	68
V.3.5 Visualisation des résultats	69
Chapitre VI : Simulations et Discussions des Résultats.....	72
Partie A : Validation de logiciel BIOlandGAS	72
VI.A.1. Les résultats tabulaires	73
VI. A.2. Les résultats graphiques	75
Conclusion.....	76
Partie B : Simulations sur le logiciel BIOlandGAS	76
VI. B.1. Première simulation	77
VI.B.1.1 Discussions des résultats	79
VI. B.2. Deuxième simulation	79
VI.B.2.1 Discussions des résultats	80
VI. B.3. Troisième simulation	81
VI.B.3.1 Discussions des résultats	82
VI. B.4. Quatrième simulation	82
VI.B.4.1 Discussions des résultats	84
VI. B.5. Cinquième simulation	84
VI.B.5.1 Discussions des résultats	86
Conclusion Générale	87
Références Bibliographiques	89

Liste d'abréviations

Liste d'abréviations :

ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

BPC : Bi-phényles Poly-chlorés Cancérigènes.

BT: Transformation Basse.

CAA : Clean Air Acte.

CET: Centre d'Enfouissement Technique de Déchets.

COD : Carbone Organique Dégradable.

CODD_m : Carbone Organique Dégradable Décomposé.

COV : Composés Organiques Volatils.

CSD: Centre de Stockage de Déchetset.

DMA : Déchets Ménagers et Assimilés.

EBA :European Biogas Association.

ENPO : L'école National Polytechnique d'Oran.

EPER-France : Pollutant Emission Register-France.

GBA : German Biogas Association.

GES : Gaz à Effet de Serre.

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques.

ISD : Installation du Stockage des Déchets.

IPSIL : Industrial Products & Systems Innovation Laboratory.

Ktep : Kilos Tonnes Equivalant pétrole.

Liste d'abréviations

LES : Lieu d'Enfouissement Sanitaire.

MEBC : Ministry of Environment of British Columbia.

MSW : Municipal Solid Waste.

MT : Moyenne Tension.

Mtep : Méga Tonne Equivalent Pétrole.

OM : Ordures Ménagères.

ONG : Organisation Non Gouvernementale.

PAM : Précipitation Moyenne Annuelle.

PED: Pays en Développement.

PEHD : Polyéthylène Haute Densité.

PET : Potentiel d'EvapoTranspiration.

POPs : Polluants Organiques Persistants.

PPB : Part Per Billion.

UE : Union Européen.

UV : Ultra Violets.

SWANA : Solid Waste Association of North America.

TAM : Température Annuelle Moyenne.

TEP: Tonnes Equivalent Pétrole.

Liste des Symboles :

A = quantité de déchet enfouie [tonne déchet].

c = facteur de conversion [m^3 biogaz/kg matière organique dégradée].

ζ = coefficient de dissimilation [fraction].

C_0 = quantité de matière organique dans le déchet enfoui [kg matière organique/tonne déchet].

C_{ij} : la concentration de la matière organique biodégradable de classe i par unité de masse de déchets [Kg/tonne].

C_{ij}^0 : concentration initiale [Kg/tonne].

ds : dimension de la fraction solide.

i = fraction de déchet avec constante de dégradation $k_{1,i}$ [fraction].

i = incréments de 1 an.

j = incréments de 0.1 an

K = constante de vitesse de génération de méthane [unité de temps⁻¹] [an^{-1}]

K_i : constance cinétique de réaction pour les déchets de catégories j [an^{-1}].

$K_{1,i}$ = constante de dégradation de la fraction de déchet i [an^{-1}].

L = facteur ou ensemble des facteurs qui représente le potentiel de génération de méthane pour un type de matière enfouie [unité de volume ou de masse de CH_4 par unité de masse de matière enfouie].

L_0 = potentiel de génération de méthane [m^3/Mg].

M = quantité de matière enfouie a l'année considérée [exprimée en unité de masse de matière enfouie] [Mg].

M_{ij} : masse de la catégorie de déchets i à l'année j [tonnes].

n = nombre d'années calculées [année de calcul - année initiale d'acceptation de matières enfouies].

Q_{CH_4} = génération annuelle de CH_4 après n années [unité de volume ou de masse produite par unité de temps] [m^3/an].

t = année considérée pour le calcul [an].

t_{ij} = âge de la j^e section de matière enfouie à la i^e année (années décimales)

t = âge de la matière enfouie [années]

t_j : durée du stockage [an].

α_t = génération annuelle de biogaz [m^3 biogaz/année].

List des figures

Figure 1.1 : Les cinq plus gros producteurs du biogaz en Europe	21
Figure 1.2 : Forme des courbes de décomposition d'ordre 0 et 1	29
Figure 4.1 : Organigramme du calcul de modèle du HOUKS	57
Figure 4.2 : Première étape de l'algorithme de l'interface sur JAVA	58
Figure 4.3 : La deuxième et la troisième étape de l'algorithme de l'interface sur JAVA	59
Figure 5.1: Fenêtre d'introduction de BIOlandGAS.....	63
Figure 5.2 : Les actions à performer sur BIOlandGAS.....	64
Figure 5.3 : Fenêtre des simulations précédente sur BIOlandGAS.....	64
Figure 5.4 : Les caractéristiques du CET sur BIOlandGAS.....	65
Figure 5.5 : Les caractéristiques du modèle sur BIOlandGAS.	67
Figure 5.6 : Les caractéristiques du modèle sur BIOlandGAS.	68
Figure 5.7 : Les caractéristiques du modèle sur BIOlandGAS.	68
Figure 5.8 : La fenêtre des résultats tabulaires de BIOlandGAS.	69
Figure 5.9 : Représentation graphique de BIOlandGAS.....	70
Figure 6.1 : Les masses des déchets utilisée pour les comparaisons.....	73
Figure 6.2 : Tableau des résultats de la simulation par BIOlandGAS	73
Figure 6.3 : Tableau des résultats de la simulation par landGEM	74
Figure 6.4 : Représentation graphique des résultats de la simulation via BIOlandGAS	75
Figure 6.5 : Représentation graphique des résultats obtenus par simulation via landGEM.....	75
Figure 6.6 : Les paramètres fixes durant les simulations	77
Figure 6.7 : Résultats tabulés de la simulation pour un casier classique	78
Figure 6.8 : Résultats graphiques de la simulation pour un casier classique	78
Figure 6.9 : Résultats graphiques pour le cas de la simulation en zone aride	79
Figure 6.10 : Résultats tabulaire de la simulation en zone aride.....	80
Figure 6.11 : Résultats tabulaire de la simulation pour le cas conventionnel aux Etats Unis..	81
Figure 6.12 : Résultats graphique de la simulation pour le cas conventionnel aux Etats Unis	82
Figure 6.13 : Résultats tabulaire de la simulation pour des valeurs d'inventaire conventionnelles à l'Etats Unis pour une zone aride	83
Figure 6.14 : Résultats graphique de la simulation pour des valeurs d'inventaire	

Liste des figures

conventionnelles à l'Etats Unis pour une zone aride	84
Figure 6.15 : Résultats tabulaire de la cinquième simulation	85
Figure 6.16 : Résultats graphique de la troisième simulation	85

Liste des tableaux :

Tableau 3.1: Les composants physiques des déchets en Algérie	44
Tableau 3.2 : Les composants moyens des biogaz.....	47
Tableau 4.1 : Plages de k recommandées par le GIEC selon le climat et la nature de la matière enfouie.....	54
Tableau 4.2 : Valeur de k recommandées par le LandGEM	55
Tableau 4.3 : Valeur de L0recommandées par le LandGEM.....	55
Tableau 5.1 : Noms de la feuille de calcul et fonctions dans BIOlandGAS. Description du logiciel.....	63

Résumé :

الملخص

صار الدليل على ملاحظة الاحتباس الحراري لاجد الفيه في السنوات الأخيرة بسبب الزيادة المستمرة في الغازات المسببة للاحتباس الحراري التي تشكل خطراً على كوكبنا، غاز الميثان (CH₄) واحد من أخطر غازات الاحتباس الحراري ويوجد في مصادر غاز الميثان، انبعاثات الغاز الحيوي من مراكز ردم النفايات، والتي تحتوى على ما بين 40% إلى 60% من الميثان، أنجز هذا العمل لأول مرة في الجزائر بالتعاون مع مختبر Ipsil المتواجد بالمدرسة الوطنية المتعددة التقنيات بوهرانو من أجل تقدير الطاقة الكامنة في مراكز ردم النفايات، قدمت هذه الوثيقة قاعدة بيانات للمخاطر والأخطار، وقضايا الغاز الحيوي الوضعية الصعبة لمراكز ردم النفايات في الجزائر، وتعتبر خطوة أولية في سياق مشروع ترمين الطاقة الكامنة في الغاز الحيوي، لهذا استخدمت نماذج التنبؤ بكمية الغاز الحيوي في مراكز ردم النفايات على شكل معادلات رياضية وتحويلها إلى واجهة بيانية (برنامج رقمي) الذي أطلق عليه BIOLandGAS، هذا البرنامج يسمح لنا بتقدير كمية انبعاثات غاز الميثان من الغاز الحيوي في مراكز ردم النفايات، المحاكاة سمحت لنا بالتحقق من صحة النموذج من خلال المقارنة مع نموذج آخر، كما سمحت المحاكاة بتقديم فكرة عامة عن إنتاج الغاز الحيوي داخل مراكز ردم النفايات وذلك بناء على عدة عوامل (معدل الرطوبة، نوع مركز الردم... الخ).

ABSTRACT

Scientific evidence of global warming has become indisputable in recent years because of a continuing increase in greenhouse gases (GHGs) that pose a danger to our planet, One of the most dangerous GHGs is methane (CH₄) And among methane sources is biogas emissions from landfills that contain between 40% and 60% methane. This document is produced in collaboration with the Industrial Products and Systems Innovation Laboratory (IPSIL) at the Ecole Nationale Polytechnique of ORAN ENPO for the first time in Algeria with the aim of estimating the energy potential of a given landfills. This document provides a database on the dangers, risks, stakes of biogas and the critical state of landfills in Algeria and is considered as a first step in the context of biogas energy recovery. For this purpose models of prediction of biogas production in the form of mathematical equations are used and are converted into a graphical interface (software) called BIOLandGAS. It is screen tool that allows us to determine an approach to estimate the amount of landfill gas emissions at a given landfills. The simulations validate the model chosen and gives a general idea on the production of biogas based on several factors (Moisture content, type of landfill, ex.).

Résumé

Resumé :

L'évidence scientifique du réchauffement planétaire est devenue incontestable depuis les dernières années à cause d'une augmentation continue des gazes à effet de serre (GES) qui représente un danger pour notre planète. L'un des plus dangereux *GES* est le Méthane (CH₄) et parmi les sources de méthane, les émissions de biogaz des centres d'enfouissements techniques (CET) qui contiennent entre 40% jusqu'à 60% de méthane. Ce document est réalisé en collaboration avec laboratoire IPSIL (Industrial Products & Systems Innovation Laboratory à l'Ecole Nationale Polytechnique d'ORAN ENPO) pour la première fois en Algérie dans le but d'estimer le potentiel énergétique d'un CET donné. Ce document fournit une base de données sur les dangers, les risques, les enjeux du biogaz et l'état critique des CET en Algérie et considéré comme une première étape dans le contexte de la valorisation énergétique de biogaz. Pour cela des modèles de prédiction de production de biogaz sous forme d'équations mathématiques sont utilisés et sont convertis en interface graphique (logiciel) numérique appelé BIOlandGAS. C'est un logiciel qui nous permet de déterminer une approche d'estimation de la quantité des émissions de gaz d'enfouissement au niveau d'un CET donné. Les simulations faites valident le modèle choisi et donnent une idée générale sur la production de biogaz sur la base de plusieurs facteurs (Taux d'humidité, type du CET...etc).

Key words :

Biogas, biogas estimation, biogas models, biomethane, biomasse, déchets, Landfills,

Introduction Générale :

Introduction Générale

L'évidence scientifique du réchauffement planétaire est devenue incontestable depuis les dernières années. Elle démontre que certains gaz à effet de serre (GES) ne cessent d'augmenter en concentration dans l'atmosphère malgré les efforts de contrôle déployés par l'humanité. C'est le cas du méthane (CH₄), qui, entre 2007 et 2011, a augmenté jusqu'à près de 1803 Part Per Billion (PPB) après être demeuré à une concentration constante entre 1999 et 2006 (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013). [1]

La gestion des déchets dans les pays en développement (PED), rencontre de très nombreuses difficultés, tant du point de vue technique, économique, que méthodologique et organisationnel.

Les causes de ces difficultés sont connues, en premier lieu l'exode rural et la métropolisation des villes avec ses conséquences dans le domaine de l'habitat, de l'éducation, de la santé et de l'environnement, et en deuxième lieu la mauvaise gouvernance. Confrontés à des problèmes de planification, de gestion et de financement, les responsables locaux n'ont pas pu maîtriser l'implantation des populations les plus démunies dans les zones les plus exposées. Les principales difficultés rencontrées sont les suivantes:

- Des infrastructures urbaines inopérantes (voirie, réseau téléphonique et électrique, adduction d'eau d'assainissement, collecte des déchets),
- Un financement très irrégulier des dépenses,
- Des problèmes de fonctionnement et de maintenance des équipements de base,
- Des personnels sous-qualifiés et le manque chronique de données locales.

La ville peut être considérée comme un écosystème qui, pour vivre, croître et se régénérer extrait du milieu naturel des ressources et les rejette dans le même milieu: ses besoins sont énormes compte tenu de sa croissance exponentielle.

Les casiers des centres de stockage doivent être considérés comme des réacteurs ouverts dont on doit maîtriser au mieux les entrées (déchets, eaux), les sorties (lixiviats, biogaz, envols), les mécanismes réactionnels (évolution du massif de déchets) et les impacts sur l'environnement: eaux (eaux de surface et souterraines), sols (migration des polluants organiques et minéraux), air (émission des gaz à effet de serre), écosystème naturel et humain. La conception et l'exploitation du centre de stockage des déchets doivent permettre une maîtrise de la production de lixiviats, de biogaz, et une limitation des nuisances: envols,

Introduction Générale

odeurs, animaux, incendies, explosions, bruit, pollution des sols, des eaux, effet de serre et risques sanitaires en tenant compte des contraintes techniques, économiques, etc.

Cette étude a pour objectif de recenser la potentialité d'un CET (Centre d'Enfouissement Technique) et montrer la part du biogaz (en %), et ainsi pouvoir contrôler la quantité du biogaz présent. Cela évitera de très grandes catastrophes écologiques et surtout des incendies incontrôlables et de grande ampleur.

Ce travail sur l'estimation du potentiel énergétique d'un CET est réalisé en collaboration avec le laboratoire IPSIL (*Industrial Products & Systems Innovation Laboratory au niveau de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Oran*) pour la première fois en Algérie dans le but de créer un outil numérique pour estimer la quantité du biogaz dans les CET en Algérie qui est la première étape dans le contexte de la valorisation énergétique du biogaz et la réduction des gaz à effet de serre.

Suite à la base des données présentées dans ce travail sur l'état critique des CET en Algérie, les risques et les enjeux de biogaz, la valorisation du biogaz actuellement est une priorité vis-à-vis du pouvoir calorifique élevé de cette bioénergie.

Ce mémoire est réparti comme suit :

1. Une recherche bibliographique sur les différentes méthodes de prédiction de la production de biogaz.
2. Une évaluation aux enjeux de biogaz et du potentiel énergétique.
3. Une généralité et définitions globales sur la valorisation énergétique du biogaz
4. Une revue des méthodes de simulation et établiront un code qui permet d'estimer le potentiel énergétique d'un CET.
5. Proposer un algorithme (logiciel) de simulation graphique pour les CET en Algérie.
6. Une exécution des différentes simulations possibles et commentaires sur les résultats obtenus.

Une conclusion qui récapitule l'ensemble des résultats et propose des perspectives.

CHAPITRE I :
Recherche bibliographie

Chapitre I : Recherche Bibliographique

Introduction :

La gestion des déchets représente l'un des défis les plus importants de nos sociétés, en particulier dans les PED (Pays En Développement).

Si le stockage des déchets est une pratique courante, plus ou moins maîtrisée dans les pays industrialisés, ce n'est pas le cas dans les PED. Il existe peu de législation traitant des problèmes de gestion et de stockage des déchets. Ceci est peut-être lié à la quasi-absence de convention internationale dans le domaine de la gestion et du stockage des déchets solides urbains. La législation internationale en la matière s'intéresse aux déchets dangereux (convention de Bâle sur les déchets dangereux, ratifiée le 5 décembre 2001) [2], et leur transport (convention de Bamako sur l'interdiction de transfert des déchets dangereux en Afrique, signée en 1990) [3] ou les POPs (polluants organiques persistants) [4]. La responsabilité revient donc à chaque pays.

Depuis une dizaine d'années, des initiatives sont multipliées dans les PED face à la dégradation de l'environnement, en particulier pour proposer des solutions de gestion des déchets.

Le secteur informel et des structures associatives ONG (organisations non gouvernementales, association de quartiers) et privées sont engagés pour apporter leur contribution à l'élimination des déchets, surtout dans les grandes villes. Cependant, le problème de la solvabilité des populations a amené ces acteurs à intervenir principalement dans les secteurs ou quartiers de ville d'accès facile et où résident des personnes ayant les moyens de s'acquitter du coût de la collecte de leurs déchets.

Les efforts entrepris pour le développement économique et social de ces pays, depuis leur indépendance, n'ont pas toujours pris en compte les préoccupations environnementales exacerbées par la pression démographique et par la croissance urbaine. Cependant, plusieurs pays accordent une grande place à la protection et au respect de l'environnement dans leur constitution.

Le progrès économique et social, en même temps que les multiples avantages associés, ont amené leur lot de problèmes, dont l'augmentation continue de la quantité des déchets urbains et industriels.

L'exploitation des ressources dans la planification privilégie souvent les impératifs de

Chapitre I : Recherche bibliographie

croissance économique au détriment de l'environnement, c'est le cas pour la plupart des pays pauvres qui doivent faire face à la situation économique, au développement moyen de la lutte contre la pauvreté, les maladies et le manque d'éducation. Atout ceci s'ajoutent la complexité des relations entre les entités publiques de niveaux politiques et administratives différents, l'absence de standard minimum national et le manque de ressources financières qui ont pour résultat de limiter les actions des autorités chargées de la gestion des déchets.

I.1. Evolution du Biogaz :

La production croissante des déchets dans les PED a provoqué la multiplication de grandes décharges sauvages un peu partout, autour des grandes villes, sans compter celles qui naissent et grandissent d'elles-mêmes, dans les terrains vagues à l'intérieur des villes. Cette augmentation est liée à la croissance démographique et au développement économique et social du pays.

La quantification des déchets solides est essentielle pour une planification du système de gestion et par conséquent des centres de stockage de déchets, maillon ultime de toute filière de traitement.

Le phénomène de digestion anaérobie s'est installé dans les installations de stockage après une première phase de dégradation aérobie. Celui-ci aboutit à la production de biogaz, essentiellement constitué de méthane et de dioxyde de carbone. Suivant les sites, la nature et la quantité de biogaz seront variables. Son captage est devenu nécessaire par l' nuisance qu'il présente pour les riverains. [5]

Des moteurs électriques alimentés en biogaz apparaissent en Europe dès 1870. Durant la deuxième guerre mondiale, des véhicules de l'armée allemande fonctionnaient aux biogaz récupérés des fumiers de fermes (moteur à gaz).

Au cours des cinquante dernières années, de remarquables progrès technologiques dans le développement de systèmes de digestion anaérobie, ont permis l'augmentation de la productivité en méthane (CH₄) à partir de rejets organiques. [6]

En Asie (Inde et Chine) des centaines de milliers de digesteurs familiaux rustiques permettent aux familles de cuisiner sur des réchauds au biogaz.

Aujourd'hui, de simples fermes laitières aux usines de traitement des eaux de grandes villes, en passant par des installations dédiées de biogaz carburant sur résidus d'abattoirs (en

Chapitre I : Recherche bibliographique

Suède, à Lille), des milliers de projets réalisés à travers le monde démontrent que la collecte des biogaz pour des fins énergétiques est viable tout en ayant un impact favorable sur l'environnement.

En Europe, des villages entiers sont alimentés en électricité et en chaleur grâce à des systèmes du biogaz centralisés. [7]

I.2. Etat des lieux :

I.2.1 Biogaz dans le monde :

La consommation mondiale de biogaz (souvent sous forme de biométhane) aurait progressé en moyenne de 3,5 % par an de 1965 à 2000, pendant que la demande globale en énergie primaire n'augmentait en moyenne "que" de 2,4 % par an. [8]

Il pourrait devenir un combustible non-fossile dominant au XXI^e siècle, comme l'a été le pétrole au siècle précédent et le charbon au XIX^e siècle.[9]

I.2.1.1. Biogaz en Europe :

Les premières installations industrielles, essentiellement pour le traitement des effluents liquides d'origine agro-alimentaire, ont été mises en place en Europe à partir du premier choc pétrolier.

En 2006, on comptait 2 500 installations sur des sites industriels. Avec un décalage d'une dizaine d'années, les installations de traitement des déchets solides urbains se sont développées à la suite. [10]

En 2008, le Parlement européen a adopté un rapport sur « l'agriculture durable et le biogaz » demandant que les politiques de soutien au biogaz soient développées au même titre que celles favorisant les autres énergies renouvelables.

En vue de limiter à 2 °C le réchauffement de la planète lié au changement climatique, le Conseil européen a confirmé de nouveau le 4 février 2011 l'objectif de l'UE de réduire ses émissions de gaz à effet de serre à raison de 80 à 95 % d'ici 2050 par rapport au niveau de 1990. Le conseil a demandé l'élaboration des stratégies de développement à faible intensité de carbone sur le long terme. [11]

Chapitre I : Recherche bibliographique

La stratégie Europe 2020 pour une croissance intelligente, durable et inclusive pose cinq grands objectifs relatifs à la position que devrait occuper l'Europe en 2020. L'un d'eux a trait au climat et à l'énergie : les États membres se sont engagés à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) de 20 %, à porter à 20 % la part des énergies renouvelables dans l'approvisionnement énergétique de l'UE et à diminuer de 20 % la consommation d'énergie d'ici 2020.

Aujourd'hui, environ 66 % de l'énergie renouvelable (sous ses différentes formes : chaleur, électricité, carburant), en Europe, vient de la bioénergie et les projections qui sont faites permettent d'établir que cette part restera au minimum à ce niveau, et pourrait très probablement augmenter considérablement.

« Un rapport publié fin 2015 par l'EBA (European Biogas Association ou Association Européenne du Biogaz) révèle que les sites de production en biogaz ont nettement progressé comptabilisant 17 240 sites (+18% par rapport à 2013).

A titre d'exemple, la France a 19 sites et produit seulement 82 GWh/an. L'Espagne et l'Italie n'autorisent ou n'encouragent pas l'injection dans le réseau.

L'EBA estime à 14.6 millions le nombre de foyers européens alimentés au biogaz. L'Allemagne est le leader européen sur le marché du biogaz ». [12]

- ***En Allemagne :***

L'Allemagne a mis en place dès le début des années 90 un plan de développement du biogaz basé sur l'utilisation du maïs comme source de carbone, éventuellement mélangé au lisier d'origine animale. Cette matière première standardisée présente l'avantage d'un fort pouvoir méthanogène en fermenteur.

En 2008, l'association allemande sur le biogaz GBA (German Biogas Association) estimait que 20 % des besoins en gaz naturel de l'Allemagne seraient couverts par le biogaz en 2020 et qu'en 2030 le biogaz remplacerait tout le gaz importé de Russie par l'Allemagne.

En 2013, l'Allemagne a consommé 75 Mtep de gaz et a produit 6,7 Mtep de biogaz. Accompagné par des conditions de rachat de l'électricité produite très incitatives, ce développement a permis à l'Allemagne de prendre rapidement la place de premier producteur européen avec 6 718 ktep produites en 2013 par près de 8 000 installations. [13]

Chapitre I : Recherche bibliographique

Le rythme d'accroissement du nombre d'unités industrielles a toutefois fléchi depuis 2011 du fait de la décision du gouvernement de diminuer de façon sensible les tarifs de rachat au 1er janvier 2012.

La nouvelle loi sur les énergies renouvelables, entrée en vigueur à l'été 2014, a, de plus, fortement limité l'emploi des cultures énergétiques pour la production du biogaz. La majorité du biogaz produit sert à fabriquer de l'électricité (29 TWh en 2013). [14]

- **Les cinq plus gros producteurs du biogaz en Europe**

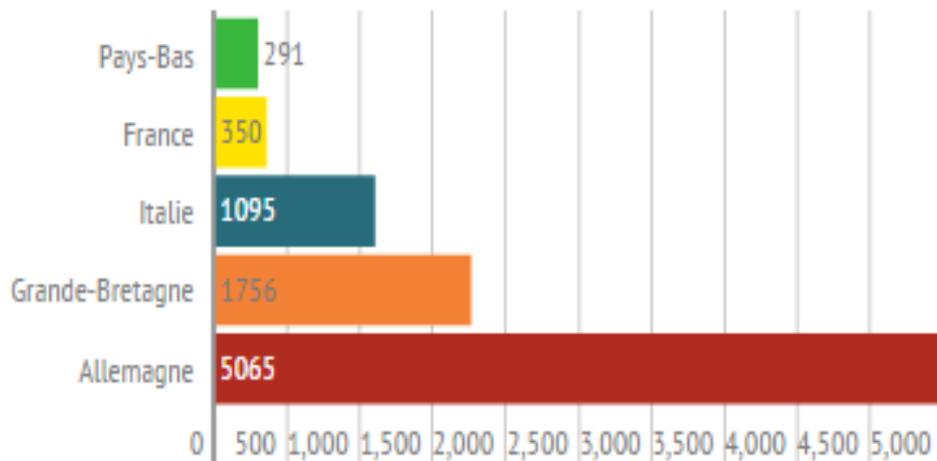


Figure 1.1 : Les cinq plus gros producteurs du biogaz en Europe [15]

« En termes de production d'énergie liée au biogaz, l'Allemagne caracole en tête. C'est le seul pays dont la majeure partie de l'énergie produite provient de plantes cultivées uniquement pour la méthanisation, notamment le maïs ». [15]

Avec une puissance installée totale dépassant les 4 000 MW, les 8 000 méthaniseurs allemands jouent un rôle essentiel dans la production d'électricité et de chaleur du pays. Les énergies renouvelables représentaient en 2014 une part de 26,2% de la production d'électricité allemande. Environ 55% de cette production renouvelable est intermittente, ce qui représente un défi majeur pour les gestionnaires de réseau et la stabilité du système électrique.

De 2012 à 2014, les producteurs avaient le choix de vendre leur électricité sur le marché ou avec le tarif d'achat en basculant au besoin d'un modèle à l'autre, et ce de manière mensuelle. Depuis 2014, la vente directe est obligatoire pour les installations d'une puissance de plus de 500 kW (100 kW à partir de 2016) et les valeurs de référence.

Chapitre I : Recherche bibliographique

1.2.2. Biogaz au Etats Unis : [16]

Le Connecticut a été le premier État à donner l'exemple, en 2011, en adoptant une loi obligeant les producteurs à envoyer leurs déchets organiques dans une unité de valorisation et non plus en décharge lorsqu'ils sont collectés à moins de 20 miles (32 kilomètres) d'une telle installation et lorsque la quantité produite dépasse deux tonnes par semaine.

Le Vermont a voté une loi similaire en 2012 : dans le Green Mountain State, le moindre déchet organique se verra refuser l'accès aux centres d'enfouissement à partir de 2020. Le Massachussetts, enfin, doit appliquer la même interdiction aux producteurs de plus d'une tonne de résidus par semaine dès le 1er juillet 2014.

Après San Francisco, Seattle et Portland, New York est la 4e métropole à interdire l'enfouissement des déchets organiques. L'interdiction touche les déchets produits par les hôpitaux, les hôtels et, plus largement, tous les producteurs émettant plus d'une tonne de résidus alimentaires par semaine. La proposition revient au précédent maire de New York, Michael Bloomberg, qui a expliqué en Novembre 2013 vouloir rediriger ces déchets (plus de 250 000 tonnes annuelles) vers le compostage ou la méthanisation.

1.2.3. Biogaz en Chine : [17]

L'exploitation du biogaz est très répandue dans le monde, même si les technologies utilisées et, surtout, les types d'exploitation sont très divers.

Ainsi la Chine est l'un des pays qui a fait appel très tôt, au cours de son histoire, à la technologie du biogaz et, dès la fin du XIXe siècle, des fermenteurs rudimentaires ont été construits dans les zones côtières de la Chine du Sud. LuoGuorui inventa et construisit une citerne à biogaz d'une contenance de huit mètres cubes qui portait son nom ; il fonda en 1920 une société d'éclairage au biogaz, la « Santou Guorui Biogas Lamp Company » et en 1932 la « Chinese Guorui Biogas Company » à Shanghai ; cette société eut de nombreuses filiales tout au long du fleuve Yangtze et dans les provinces du sud de la Chine. Ce fut la première vague de l'emploi du biogaz en Chine.

La seconde vague de l'usage du biogaz trouva son origine dans la province du Wuchang, en 1958, dans le cadre d'une campagne visant à exploiter les multiples fonctions de la production de biogaz, qui résolvait simultanément les problèmes de mise à disposition de matières organiques pour les cultures et une amélioration de l'hygiène publique.

Chapitre I : Recherche bibliographique

La troisième vague du biogaz se produisit vers la fin des années 1970 et le début des années 1980, lorsque le gouvernement chinois considéra la production de biogaz comme un emploi rationnel et efficace des ressources naturelles dans les milieux ruraux. La production de biogaz permit non seulement de fournir de l'énergie, mais également d'améliorer la protection de l'environnement et l'hygiène ; elle représenta un aspect important de la modernisation de l'agriculture à cette époque. Quelques trente millions de digesteurs standardisés ont été installés pendant cette période à travers la Chine.

Dans les années 2000, ce type de développement très local a été encouragé avec la possibilité d'utiliser les crédits carbone de l'industrie européenne pour leur financement. La forte baisse de valeur de ces crédits au cours des dernières années a peu à peu stérilisé ces développements. Entre temps, une véritable industrie du biogaz est née en Chine dans tous ses secteurs de valorisation.

À l'instar de la Chine, de nombreux pays en voie de développement ont utilisé ces mécanismes financiers pour monter des projets locaux en milieu rural, mais aussi des projets industriels souvent très importants, en particulier en Amérique du Sud. On peut citer à titre d'exemple le contrat passé par la municipalité de la ville de Mexico pour récupérer le biogaz de sa décharge d'ordures de Bordo Poniente, aujourd'hui fermée, qui avait accumulé 72 millions de tonnes de déchets au cours de ses vingt ans d'utilisation.

1.2.4. Biogaz en Afrique :

- *CET de Fès Maroc* [18]
 - ✓ Superficie et lieu : de 110 ha, la décharge contrôlée se trouve à 11 km du centre-ville dans la commune d'Ain Bida sur la route de Sidi Hrazem. (CET) Mise en service en:2004.
 - ✓ Début de production de l'électricité le 12 juin 2015, Cette centrale couvre le tiers des besoins en éclairage public Fès.
 - ✓ Déchets ménagers reçu six villes: Fès, Casablanca, Rabat, Mohammedia, Lâayoune et Dakhla (traite la moitié).
 - ✓ La réhabilitation du site a notamment nécessité la couverture des déchets, l'installation des ouvrages de collecte, le traitement des lixiviat et l'évacuation des eaux de pluies.
 - ✓ Capacité des déchets reçu depuis 2004 (L'ouverture du CET) : 2,7 millions de tonnes de déchets ce qui représente 44 mètres cube de déchets enterrés.

Chapitre I : Recherche bibliographie

- ✓ Déchets traités chaque jour Entre 750 et 1 000 tonnes par 100 camions pour une ville comptant 1,2 million habitants.
- ✓ Investissement global : 100 millions de dirhams, dont 26 millions pour les équipements bioélectriques. (1000dirhams=92euros)
- ✓ Chiffre d'affaires espéré : de 750 000 euros minimum pour 2016 et souhaite même pouvoir très vite doubler voire tripler la production d'électricité.

Il est à noter que la filière de prétraitement contient les équipements nécessaires à cette opération composée de souffleurs pour aspirer le biogaz, séchoirs, filtres, échangeurs et séparateurs.

Capacité : 1,12 mégawatt de puissance électrique sur les 3,5 mégawatts nécessaires à l'éclairage public de Fesse, cette usine est amenée à terme, à couvrir la totalité des besoins de la ville.

L'usine a une capacité nominale de 5 mégawatts installés en modules de 1 mégawatt chacun au fur et à mesure de la production du biogaz.

Système de fonctionnement :

Utilisant un mode de conversion basé sur des moteurs à gaz à combustion interne et des micro turbines, la centrale électrique comprend outre un premier module de 165 kW pour des besoins internes, un poste électrique de transformation basse et moyenne tension (BT/MT) et un ensemble d'appareils et autres instruments de contrôle, protection et surveillance.

- **Tunisie** [19]

Une unité de valorisation énergétique des déchets organiques a été inaugurée le 10 juin 2010 dans la zone du marché de gros de Bir El Kassaâ. Elle s'insère dans le cadre de la politique nationale visant la consolidation des dispositifs de gestion des déchets, la diversification des sources d'énergie et la lutte contre la pollution.

Une économie d'énergie annuelle de 108 TEP, une méthanisation estimée à 1.200 m³, l'engrais organique extrait sera destiné à l'agriculture biologique.

Le coût total du projet, d'une capacité de production estimée à 2,4 gigawatt heures (GWh) par an, s'élève à 2,132 millions de dinars. L'énergie électrique produite par l'unité couvrira 29% des besoins énergétiques de la Société tunisienne des marchés de gros

Chapitre I : Recherche bibliographie

(Sotumag), soit une économie d'énergie annuelle de 380.785 kW/h (108 tonnes équivalent pétrole -TEP-).

En effet, la Sotumag génère, chaque jour, 25 tonnes de déchets organiques sur son site. Afin de valoriser énergétiquement ces déchets, la Sotumag a créé cette unité de production de biogaz (à travers la fermentation des déchets organiques) qui va être exploitée pour la production de l'électricité et de l'énergie thermique.

Le volume du biogaz produit par jour est de l'ordre de 1.800 m³ avec une teneur en méthane de 60%, en utilisant une unité de méthanisation de volume total de 1.200 m³.

Ce projet permettra, aussi, d'extraire l'engrais organique qui sera utilisé dans l'agriculture biologique. Il assurera une économie au niveau des frais de transport des déchets vers la décharge ainsi que de la facture d'électricité. Il contribuera, également, à créer des postes d'emploi supplémentaires dans les opérations de tri, de collecte, de transport et de traitement des déchets organiques.

Le biogaz produit sera transformé en énergie électrique et calorifique, et ce, moyennant une unité de cogénération d'une puissance égale à 130 kWh électrique, avec un rendement électrique de 34% et un rendement thermique de 52%.

I.3. Etat de l'art :

Introduction :

Plusieurs types de modèles mathématiques existent pour estimer la production de biogaz dans les LES et gérer les opérations de captage. Ils se basent en général sur des cinétiques de décomposition de zéro et premier ordre. D'autres sont de nature numérique et ont beaucoup de précision, mais leur utilisation demande plusieurs intrants qui ne sont pas toujours à la disposition des gestionnaires. (Kamalan at autres, 2011) [20]

Les modèles de premier ordre comprennent souvent des structures multiphasiques qui permettent de considérer plusieurs catégories de matière enfouie donnant ainsi une meilleure précision de prédiction que les modèles d'ordre zéro. Parmi les modèles de premier ordre, les plus utilisés sont Scholl-Canyon, *Netherlands Organisation for Applied Scientific Research* (TNO), LandGEM, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC),

Chapitre I : Recherche bibliographie

European Pollutant Emission Register-France (EPER-France), GasSim et Afvalzorg. Parmi les modèles d'ordre zéro, EPER-Allemagne et *Solid Waste Association of North America* (SWANA) sont souvent utilisés par les gestionnaires des LES. (Kamalan et autres, 2011)[20]

1.3.1 Equations mathématiques des modèles d'ordre zéro et d'ordre un :

1.3.1.1. Modèles d'ordre zéro:

Les modèles d'ordre zéro et d'ordre un se servent de ces équations pour calculer la quantité de substrat qui a été décomposé au temps t en fonction de la concentration initiale et de la constante de vitesse. La quantité de CH₄ produit au temps t peut être calculée par la suite par la multiplication de la quantité de substrat décomposé par son potentiel de génération de CH₄ et par certains facteurs d'ajustement propres au LES. Ces facteurs sont exposés dans les sous-chapitres suivants pour chaque modèle étudié.

Les modèles d'ordre zéro et d'ordre un ont les formes génériques respectives suivantes (Ministry of Environment of British Columbia (MEBC), 2008) [21]:

$$Q_{CH_4} = \sum LKMe^{-Kt} \quad (1.1)$$

Où

Q_{CH_4} = génération de CH₄ (unité de volume ou de masse produite par unité de temps)

K = constante de vitesse de génération de méthane (unité de temps⁻¹)

L = facteur ou ensemble des facteurs qui représente le potentiel de génération de méthane pour un type de matière enfouie (unité de volume ou de masse de CH₄ par unité de masse de matière enfouie)

M = quantité de matière enfouie à l'année considérée (exprimée en unité de masse de matière enfouie)

t = année considérée pour le calcul (an).

1.3.1.2. Modèles d'ordre un :

- **Le modèle LandGEM :**

Héroux (2008) a produit des travaux de modélisation pour prédire les quantités de CH₄ générées au CESM. Le *Landfill Gas Emissions Model* (LandGEM) a été utilisé avec comme intrant les quantités de matière enfouie entre 1968 et 2000. Les valeurs estimées par le modèle étaient pour la période entre le début des opérations d'enfouissement en 1968 et 2020

Chapitre I : Recherche bibliographique

Le modèle LandGEM a été développé par l'USEPA dans le but d'estimer les taux d'émission des polluants gazeux générés dans les LES aux États-Unis. Les gestionnaires des LES l'utilisent entre autres pour planifier les efforts de captage de biogaz et pour évaluer s'ils sont assujettis aux différentes mesures imposées par les normes et règlements fédéraux comme le *New Source Performance Standards* et le *National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants*. (USEPA, 2005b) [22]

LandGEM estime la quantité de CH₄ généré selon une décomposition de premier ordre de la matière enfouie. Comme déjà mentionné, le modèle est bâti sur des incréments de dixième d'année à la fois. Le modèle, sous sa forme de double sommation, est représenté par l'équation :

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 KL_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}} \quad (1.2)$$

Où

Q_{CH_4} = génération annuelle de CH₄ après n années (m³/an)

K = constante de génération de méthane (an⁻¹)

L_0 = potentiel de génération de méthane (m³/Mg)

M = quantité de matière enfouie à l'année i (Mg)

t_{ij} = âge de la j^e section de matière enfouie à la i^e année (années décimales)

i = incréments de 1 an

j = incréments de 0.1 an

n = nombre d'années calculées (année de calcul - année initiale d'acceptation de matières enfouies)

Le modèle (LandGEM) est configuré dans le logiciel Excel de Microsoft sous forme de chiffrier interactif. Il exécute l'équation décrite à la section prochaine selon une configuration en phase-simple. Il considère les quantités enfouies sur plusieurs années consécutives et peut prédire la génération de CH₄ jusqu'à 140 ans. ((USEPA, 2005b)) [22]

La version courante (3.02) du logiciel, mise à jour en 2005, a été améliorée par rapport à sa version précédente (3.01) sur les points principaux suivants : l'équation de génération de CH₄ de premier ordre considère maintenant des incréments de dixième d'année, ce qui augmente le niveau de précision du calcul. La fraction volumique de CH₄ dans le biogaz peut maintenant être changée par l'utilisateur à d'autres valeurs que 50 %. (USEPA, 2005b) [20]

Chapitre I : Recherche bibliographique

- **Le modèle GIEC**

Le modèle (GIEC) est un algorithme de calcul proposé par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Il se base sur une cinétique de décomposition de premier ordre qui pose le substrat par une fraction de carbone organique dégradable (*COD* ou *DOC* en anglais) et la vitesse de dégradation de la matière enfouie par sa constante k ou par son temps de demi-vie ($t_{1/2}$).

Pour évaluer le CH₄ généré, le modèle *GIEC* utilise le carbone organique dégradable décomposé (*CO_{DD}_m* ou *DDOC_m* en anglais), qui représente la quantité de matière organique dégradable contenue dans le déchet qui est efficacement décomposée en phase anaérobie. Le suffixe m représente une quantité massique. [21]

- **Le modèle Afvalzorg**

Le modèle *Afvalzorg* a été développé par la compagnie néerlandaise qui porte le même nom et l'*Agricultural University of Wageningen*. Il se base sur le modèle de premier ordre *TNO* et les recommandations de l'*Adviescentrum Stortgas* (Centre de recommandations pour les biogaz). *Afvalzorg* se spécialise dans la gestion, l'opération et la conception des sites d'enfouissement (*Afvalzorg*, 2014). Le modèle est disponible en phase-simple et en phase-multiple à travers le site web de la compagnie.

Le modèle (*Afvalzorg*) se base sur une cinétique de décomposition de premier ordre et utilise l'algorithme de calcul du GIEC. Il est décrit mathématiquement par l'équation de (Scharff et Jacobs, 2005a). [23]

$$\alpha_t = \zeta \sum_{n=1}^3 c A C_{0,i} k_{1,i} e^{-k_{1,i} t} \quad (1.3)$$

Où :

α_t = génération annuelle de biogaz (m³ biogaz/année)

ζ = coefficient de dissimulation (fraction)

c = facteur de conversion (m³ biogaz/kg matière organique dégradée)

A = quantité de déchet enfouie (tonne déchet)

C_0 = quantité de matière organique dans le déchet enfoui (kg matière organique/tonne déchet)

$K_{1,i}$ = constante de dégradation de la fraction de déchet i (an⁻¹)

i = fraction de déchet avec constante de dégradation $k_{1,i}$ (fraction)

t = âge de la matière enfouie (années)

Chapitre I : Recherche bibliographique

Le modèle *Afvalzorg* est configuré dans le logiciel Excel de Microsoft sous forme de chiffrier interactif et sa dernière version à phase-multiple a été mise à jour en février 2013. Il considère trois fractions, organique et treize catégories de déchet incluant les matières inertes et celles considérées comme « autres ». Les fractions de la matière organique contenues dans chaque catégorie sont réparties selon une vitesse de décomposition rapide, modérée ou lente. Les fractions et les catégories de déchet sont préétablies par le logiciel.

1.3.2. Différences entre les modèles d'ordre zéro et d'ordre un :

Les modèles d'ordre zéro considèrent que la production de biogaz est directement proportionnelle à la quantité de matière enfouie et disponible pour décomposition.

Cela implique que la génération de CH_4 augmentera linéairement dès le commencement des opérations d'enfouissement, atteindra un maximum dans un temps relativement court et demeurera dans un plateau pour une période déterminée.

Une fois la matière décomposable épuisée, la diminution de la génération de CH_4 se poursuivra de façon linéaire jusqu'à zéro.

Dans le cas des modèles de premier ordre, les mêmes tendances sont observées, mais avec des évolutions graduelles, telles que par une décomposition exponentielle comme illustrée à la figure. (MEBC, 2008) [20]

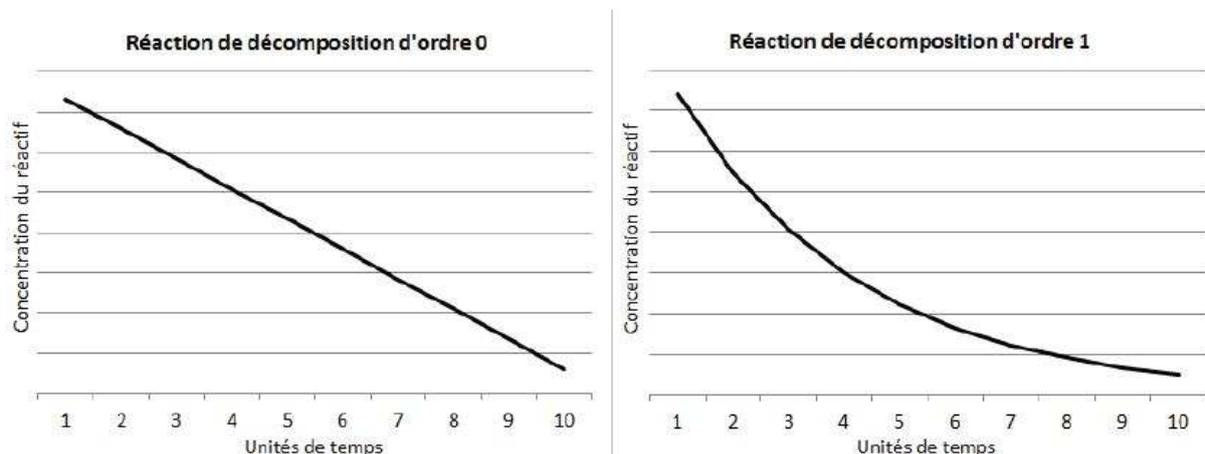


Figure 1.2 : Forme des courbes de décomposition d'ordre 0 et 1

La figure 1.2. Montre un défaut du modèle d'ordre zéro lorsqu'il est appliqué aux LES. Peu importe la quantité de substrat qui demeure dans le site, son taux de décomposition, qui équivaut au taux de production de CH_4 , sera toujours le même. Cela ne correspond pas à ce qui est observé en pratique. En effet, après la fermeture du site, une diminution graduelle,

Chapitre I : Recherche bibliographie

plutôt que constante, de la production de CH₄ est observée (Sawyer, 2007). La diminution de la production de CH₄ est alors mieux représentée par un modèle d'ordre un.

Conclusion :

Les modèles de premier ordre sont les plus utilisés dans le monde en raison du compromis qu'ils offrent entre la précision des résultats et la facilité d'utilisation. Ils sont souvent utilisés pour répondre aux demandes d'inventaires nationaux, pour des analyses de cycle de vie et pour répondre aux règlements correspondants. ((Amini) et autres, 2013). [24]

CHAPITRE II : Enjeux du Biogaz

Chapitre II : Enjeux du Biogaz

II.1 Risques du biogaz :

II.1.1 Risques du métier :[25]

Les éboueurs manutentionnent quotidiennement plusieurs tonnes de déchets. Peu de métiers exigent un aussi grand effort physique que la collecte des ordures. Et ce n'est pas qu'un travail physique, l'éboueur doit constamment être à l'affût et prendre des décisions de son environnement de travail et des ordures à collecter.

II.1.1.1 Risques infectieux :

- Tétanos : <<atteinte neuromusculaire pouvant être mortelle>>
Contamination par blessure cutanée.
- Poliomyélite : <<maladie entraînant la paralysie>>
Contamination par les eaux usées.
- Hépatite B : <<virus attaquant le foie>>
Contamination par le sang et les sécrétions sexuelles (piqûre par seringue abandonnée).

II.1.1.2 Risque allergique :

- Asthme allergique : par inhalation de gaz polluant.
- Allergique cutanée : par contact avec des produits allergisants par exemple produit chimique.

II.1.1.3 Atteinte psychologique :

Pression sociale, stress, dépression.

II.1.1.4 mesures de protection :

- Équipement de protection individuelle obligatoire :
 - Combinaison de travail à ne pas mélanger avec le linge domestique.
 - Gants de protection contre les piqûres et les coupures.
 - Chaussures de sécurité.
 - Gilet de signalisation à haute visibilité.
 - Port de masque.

Chapitre II : Enjeux Du Biogaz

- Vaccination obligatoire :
 - DT : Diphtérie, Tétanos.
 - Polio.
 - Hépatite.
- Conformité des machines et vérification des camions-bennes.
- Hygiène général et douche après la journée de travail.
- Contrôle médical régulier au sein des services de médecine du travail.

En pratique. En Algérie, il y a de grand carences qui concerne la protection et le suivie sanitaire de ces employés, ainsi qu'une imprudence dans l'exercice de leur fonction, comme l'abstention de vaccination et le non port de gant.

II.1.2 Lagéo-membrane enPolyéthylène Haute Densité(PEHD) : [26]

Le PEHD est utilisé à cet effet depuis plus de 20 ans aux Etats-Unis, en épaisseur standard de 2.54mm (1/10 de pouce). Malgré son apparence de "linoléum" et sa forte résistance à un grand nombre d'attaques chimiques, le PEHD est pourtant fragilisé par une minorité de produits présents dans les lixiviat: hydrocarbonées aromatiques (benzène) ou halogénés (tri- ou - tetrachloroéthylène, tétrachlorure de carbone), toluènes (méthyl benzène), xylènes et naphthalènes.

Le plus étonnant est encore à venir, le PEHD est lentement fragilisé par une exposition prolongée à différents types de résidus d'ordures ménagères, dont on peut citer: corps gras (margarine), vinaigres et alcools (fonds de bouteilles.), détergents (lessives, détachants), mousses à raser, soins des cheveux (crèmes et teintures), shampooings, soins du corps, vernis à ongles, cirages, chiffons et résidus de nettoyage ou de bricolage (térébenthine, acétone, essence, solvants, peintures ... etc.). Et c'est le fabricant-concepteur qui le dit.

A court ou moyen terme, ces différents types d'ordures ménagères ramollissent ou bien rendent cassant le PEHD. Sous la pression des multiples contraintes mécaniques ces deux types d'attaques chimiques affaiblissent la résistance de la bâche, causant immanquablement déchirures ou fractures, malgré son épaisseur rassurante de quelques 2mm.

Pourquoi une telle fragilité du matériau ?

Chapitre II : Enjeux Du Biogaz

Parce que les polymères (tels que le PEHD) sont des composés synthétiques naturellement instables à long terme, et surtout vulnérables à des attaques chimiques spécifiques, brisant certains points faibles des chaînes moléculaires

II.1.2.1 La difficulté de manipulation des bâches en PEHD :[27]

Défauts de fabrication, transport, stockage et nécessité de souder les morceaux ("liés") entre eux de façon imperméable et durable avec différentes colles. Le PEHD est connu pour sa sensibilité à la température, créant des tensions résiduelles sur les collages, généralement réalisés par temps chaud, qui peuvent donc se rompre par temps froid.

Ces défauts représentent autant de points de fuite pour les lixiviats que d'amorces pour des déchirures encore plus conséquentes, selon le constructeur, un taux de fuite de 10 litres/ha/jour.

Des études réalisées aux Etats-Unis révèlent que sur le terrain, et sous l'effet des autres agressions mécaniques et chimiques, les meilleures bâches type PEHD laissent fuir les lixiviats à un taux très supérieur de 200 litres/ha/jour (ce qui serait l'effet d'un trou de 2mm de diamètre sous une hauteur de liquide de 3cm).et continuant leur course paisible et silencieuse vers la nappe phréatique après s'être frayé un chemin à travers la couche d'argile sous-jacente. Un autre phénomène parasite et y aggravant vient s'ajouter: *le colmatage de la couche drainante par l'action des bactéries.*

Les lixiviats sont en effet récupérés au fond du site par un réseau de drains passant à travers cette couche formée de sable et de graviers.

En fonctionnement normal, la couche drainante ne permet aux lixiviats d'atteindre une hauteur de 5cm en fond de casier, correspondant au chiffre précédent de 10 litres/ha/jour pour les fuites (la norme maximale autorisée pour la hauteur des lixiviats étant 30cm).

Mais ces vilaines bactéries produisent sur les granulats un certain nombre de dépôts de nature colmatant. Ces dépôts sont formés à 30% de matériaux organiques ("biofilm") et pour le reste de composés minéraux (précipités de sulfures de fer, et carbonates de fer/manganèse/calcium).

Aux risques objectifs décrits ci-dessus s'ajoutent:

Chapitre II : Enjeux Du Biogaz

- Les déchirures de la bâche occasionnées mécaniquement par l'effet de cisaillement, poinçonnement ou percement par déchets tranchants,
- La possibilité d'éclatement sous la pression locale ou les gradients de force à plus grande échelle dus à la gravité (effet de pente), aux différences de densité, aux tassements naturels mais hétérogènes des masses en décomposition (il s'agit ici de tonnes) ou mécaniquement induits à partir de la surface par le passage des camions ou des bulldozers (compactage des déchets), ou simplement lors de la mise en place.

Dans les connaissances actuelles, il n'existe aucun moyen de vérifier l'état d'une bâche, aussitôt que les matériaux commencent à être déversés. A noter la possibilité de déclenchement spontané de feux en profondeur (on cite une probabilité de deux incendies par an par site), ayant pour effet de fondre et percer la bâche. Il y a les petits trous multiples créés par les rongeurs et leur réseau de galeries, quelque fois assez profondément, les bâches plastiques sont également très sensibles aux rayons ultraviolets (UV) du soleil, ce qui oblige à les recouvrir au tout début de l'exploitation puisque l'on ne peut rien savoir sur l'état de la bâche.

II.2 Caractéristiques et toxicité des biogaz :[28]

Le mot "biogaz" évoquerait plutôt une substance sympathique produite par une fermentation de compost, quoi qu'un peu odoriférante. Comme les biogaz ont inflammables (à cause de leur composition en méthane), on imagine un parallèle avec le gaz de ville et ses nombreux bienfaits. La réalité est toute autre.

Les biogaz contiennent certaines substances hautement toxiques et cancérigènes, qui le rendent très dangereux à respirer directement. L'idée est de les brûler sur place au moyen de torchères. Mais leur combustion à une température en-dessous de 1200°C génère différentes dioxines et hydrocarbures lourds, dont la réputation n'est plus à faire. Il faut donc discerner les différents risques toxicologiques

Des effets d'inversion de température au-dessus du site peuvent bloquer l'ensemble des biogaz de fuite, résultant à la formation de poches stagnantes ou très lentement dispersées par le vent, des changements de pression atmosphérique peuvent aussi mettre les biogaz en surpression. Mais plus simplement, la couverture systématique des déchets en surface favorise leur accumulation en poches souterraines. Ceux-ci ont alors naturellement tendance alors à

Chapitre II : Enjeux Du Biogaz

migrer par le sous-sol poreux des environs immédiats, pour pénétrer et s'accumuler dans les habitations (caves, garages, vides sanitaires).

II.2.1 Toxicité des biogaz :[29]

Pour référence, sont considérés comme relativement élevées des concentrations de 0.001 à 0.1 mg/m³ de ces produits, il faut aussi distinguer entre les chiffres représentant des valeurs moyennes, donc faibles et à la statistique peu fiable, de ceux représentant des valeurs maximales constatées au moment de la mesure:

- Méthane, ayant un effet 35 fois plus toxique que le gaz carbonique.
- Hydrogène sulfuré: très indisposant voire irritant (yeux, nez, poumons) à seulement très faibles concentrations (>0.1mg/m³), mais devient toxique à concentrations élevées (>0.5g/m³).
- Ammoniac (pas toujours présent selon le type de déchet, mais propriétés identiques au précédent).
- Mercaptans, à l'odeur caractéristique de choux pourris: éthyles et méthyles (toxiques).
- Composés organiques volatils (COV): chloroéthylène et benzène (cancérogènes), toluène et xylène (toxique à moyenne concentration).
- Composés chlorés: dichlorométhane et chlorure de vinyle (cancérogènes), biphényles polychlorés ou BPC (cancérogènes), trichloroéthylène (cancérogène pour les animaux, toxique pour l'homme), tétrachloroéthylène (toxique).

II.2.2 Pathologies liées à l'exposition aux biogaz : (et effets similaires ou croisés, dus à la pollution de l'eau par les lixiviats):[30]

Celles-ci affectent les yeux et voies respiratoires, le cœur, le foie, et le système nerveux central. Certaines sont également accompagnées de cancers, d'affaiblissement du système immunitaire, voire de malformations congénitales. Les composés listés précédemment participent (souvent de façon multiple) aux affections/pathologies constatées ou syndromes potentiels ci-dessous:

- Troubles ou pertes de mémoire.
- Perte d'appétit et de poids (anorexie), insomnies, anxiété.
- Atteintes diverses du système respiratoire: asthme, thrombopénie, bronchite, angine, rhinite et rhino-pharyngite à répétition, toux chroniques, respiration difficile

Chapitre II : Enjeux Du Biogaz

(dyspnées), particulièrement chez des personnes n'ayant aucune des ces pathologies avant leur exposition au CET.

- Atteinte du système nerveux central: états dépressifs, léthargie, lassitude, assoupissement, confusion, nervosité, irritabilité, anxiété, hyper-activité.
- Augmentation de la tension artérielle, rythme cardiaque irrégulier.

Les différents rapports soulignent expressément que les risques vitaux afférents à la proximité d'un CET concerneraient une zone d'exposition comprise entre 500m et 5km (voire 8 ou 10km dans certains cas) de distance par rapport au CET, ils recommandent de façon expresse tenir les CET à une distance aussi éloignée que possible des populations riveraines, et d'offrir un suivi médico-sanitaire rapproché aux personnes qui seraient malheureusement trop exposées.

II.2.3 Accident survenu au CET

L'inventaire se rapporte aux installations de stockage de déchets ménagers et assimilés qui comprennent les décharges, les décharges contrôlées, les centres d'enfouissement technique (CET), les centres de stockages de déchets (CSD).

II.3 Pollution du biogaz :[31]

II.3.1 Pollution olfactive:

Les odeurs fortes, putrides, irritantes ou irrespirables générées par les fuites de biogaz, avec des pics intolérables associés au vent (directions privilégiées, ou bien chutes prolongées), à la température, ou à certaines conditions saisonnières. Aux environs immédiats de certains CET (500m à 2.5km), les odeurs peuvent être tellement insupportables que les habitants en perdent le sommeil, se calfeutrent à l'intérieur de leurs maisons, tout en ayant renoncé une fois pour toutes à l'idée de profiter du dehors, de jardiner, ou de pouvoir jamais espérer prendre leur petit déjeuner ou manger sur leur terrasse avec des amis... A noter que la production de biogaz à partir d'une masse donnée s'étale sur un cycle de... 40-50 ans, autant dire non pas une tranche, mais une moitié de vie humaine.

II.3.2 Pollution mécanique:

Ballet aériens de sacs en plastique et nuages de poussières s'accumulant sur les cultures, les vergers, potagers, jardinets et propriétés individuels; boues liquides, lixiviat et détrit

Chapitre II : Enjeux Du Biogaz

divers s'échappant des bennes de camions et se répandant sur les routes d'accès. A plusieurs kilomètres, on sait déjà vers quelle direction regarder pour trouver son chemin vers le CET. Les habitations les plus proches sont servies par les déjections de mouettes et goélands, et quotidiennement recouvertes d'une couche de fine poussière. Le trafic intense et incessant des camions provoque annuellement une dégradation substantielle des routes, à charge des communes de les entretenir, au détriment des projets municipaux et d'intérêt social pour lesquels leur maigre budget étaient normalement destinés.

II.3.3 Pollution routière:

Trafic intense et continu de camions sur les petites départementales, mobilisant parfois la seule route d'accès aux villages et ralentissant le trafic normal des usagers et riverains sans possibilité de dépasser. Un site d'une capacité d'enfouissement de 150.000 tonnes par an représente le passage d'un camion toutes les 3 minutes (en comptant les camions quittant le site). Il y a aussi les nocturnes et les spéciales. Ces estimations prennent en compte le trafic supplémentaire du à l'enlèvement régulier des stocks de lixiviat (600 tonnes/semaine), l'apport quotidien de fuel, de gravillons drainants de fond de casier, de terre pour la couverture journalière ou hebdomadaire des fronts de décharge, également nécessaires au fonctionnement normal de l'exploitation. A cela il faut ajouter la pollution produite par les gaz d'échappement des camions (poussières d'émission diesel, monoxyde de carbone, hydrocarbures aromatiques polycycliques [HAP], plomb...).

II.3.4 Pollution sonore:

Liée au va-et-vient incessant des camions, incluant les inévitables "nocturnes", produisant sur une petite départementale autant de bruit qu'une nationale et un sifflement très perceptible parfois jusqu'à 2km. Sur le site: les bruits divers de déchargement, klaxons de recul et de manœuvres de chantier, broyeuse de déchets, presse de mise en balles, compactages par les bulldozers..., et tirs de canon réguliers pour effaroucher les oiseaux, à seulement quelques centaines de mètres de certaines maisons individuelles.

Chapitre III : Caractérisation des déchets

Chapitre III : Caractérisation des déchets

Avant de modéliser la production du biogaz dans les CET, ce chapitre représente les différentes définitions, les caractéristiques des déchets et du biogaz en Algérie.

III.1 Décharge sauvage :

C'est un dépôt clandestin de déchets réalisé par des particuliers ou des entreprises, sans autorisation communale, et sans autorisation préfectorale au titre de la législation sur les installations classées. Les déchets sont de toutes natures (banals, dangereux, toxiques) et sont déposés dans des conditions qui ne respectent pas les règles des décharges contrôlées. Les impacts sur l'environnement, non gérés, sont nombreux et peuvent concerner la pollution des sols, la pollution des eaux, etc.[32]

III.2 Description des décharges : [33]

La mise en place des décharges dans les PED doit être effectuée suivant certaines règles et dispositions qui permettent d'éviter les impacts sur l'environnement, ce qui revient à maîtriser les phénomènes de fermentation en contrôlant la nature et le flux de déchets en fouis et les flux liquides et gazeux.

Une décharge contrôlée peut être définie précisément par le fait que des précautions sont prises dans son organisation et sa mise en œuvre pour écarter toutes nuisances. Aujourd'hui le terme de décharge contrôlée couvre différentes méthodes relatives à l'évacuation et au traitement des ordures ménagères.

- La décharge contrôlée traditionnelle.
- La décharge compactée ou non.
- La décharge d'ordures préalablement broyées.

III.2.1 La décharge contrôlée traditionnelle :

Dans ce type de décharge:

- Les résidus sont répandus par couches successives d'épaisseur modérée (2m environ).

Chapitre III : Caractérisation des déchets

- Les couches sont exactement nivelées par des talus peu inclinés pour que les ordures ne soient pas remises à jour par les pluies.
- Le dépôt doit être suffisamment compact, pour éviter les vides importants favorisant les risques d'incendie et l'entrée d'air préjudiciable à la fermentation anaérobie.

Le dépôt et le talus, étant ainsi réalisés par couches régulières, celles-ci doivent être recouvertes de terre ou d'un matériau approprié qui constitue la « couverture », laquelle doit avoir 10 à 30 cm d'épaisseur suivant la cohésion des matériaux et le soin apporté à leur tassement.

III.2.2 La décharge contrôlée compactée :

On distingue deux modes de compactage :

- Le compactage qui résulte du roulage sur la décharge de véhicules lourds de collecte et de circulation des bouteurs assurant le réglage des ordures et leurs déplacements vers le front de la décharge.
- Le compactage plus accentué, recherché systématiquement, obtenu non seulement par les engins de mise en place, mais aussi par l'action des engins spéciaux dont le rôle est d'effectuer un compactage intensif et une dilacération des déchets. Ces engins interviennent au fur et à mesure des arrivages pour obtenir un tassement d'autant plus efficace que les couches successives sont plus minces : compacteurs à pieds de mouton.

Ce type de décharge présente aussi un certain nombre d'avantages :

- Un meilleur emploi du volume du site ;
- Un tassement ultérieur sensiblement diminué ;
- Un meilleur aspect général ;

Le travail en couches minces (0,50 à 0,80 m) qui permet une certaine réduction des travaux de couverture intermédiaire, sous réserve de certaines précautions notamment vis-à-vis des conditions climatiques.

III.2.3 La décharge d'ordures préalablement broyées :

Une nouvelle méthode est apparue depuis une vingtaine d'années, elle consiste à broyer les ordures avant de les mettre en décharge : il en résulte une structure différente. La matière étant divisée en petits éléments, la masse est plus homogène et ne comportant pas de vides importants. On obtient ainsi un dépôt plus dense sans recourir au compactage.

Chapitre III : Caractérisation des déchets

Au contraire, on évite dans ce cas le compactage pour permettre l'aération et favoriser la fermentation aérobie.

Ce type de procédé présente en outre d'autres avantages :

- Une exploitation plus facile, les contraintes à observer pour écarter les nuisances étant moins lourdes que pour les autres types de décharges contrôlées;
- Une stabilité du sol qui peut être obtenue plus rapidement grâce au volume des déchets;
- La mise en culture plus facile et plus rapide, en particulier, la décharge d'ordures broyées est susceptible de valoriser plus rapidement les sols pauvres, arides ou humides;
- Il semble bien aussi que la température interne, ainsi que le pouvoir absorbant et même filtrant des ordures broyées, rendent fort improbables les infiltrations et que, par conséquent, la pollution des nappes ne soit à redouter que par le ruissellement superficiel.

III.3 Centre d'Enfouissement Technique CET : [34]

Il s'agit d'une installation qui a pour vocation de traiter et de stocker les déchets dans des conditions optimales de sécurité. Dans l'Union européenne, il existe trois classes de CSD (Centre de Stockage des Déchets).

- Les centres qui reçoivent des déchets dangereux stabilisés ou devenus inertes.
- Les centres qui reçoivent les déchets municipaux et assimilés (dits de classe 2).
- Les centres qui reçoivent les OM (ordures ménagères) et les DIB (déchets industriels banals), à savoir des déchets non dangereux et inertes (dits de classe 3).

III.4 Définition du terme « déchet » :

L'article 3 de la loi du 12 décembre (2001) relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, définit un déchet comme tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation. Et plus généralement toute substance, ou produit et tout bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer et au sens de la présente loi, on entend par [35] :

Chapitre III : Caractérisation des déchets

III.4.1 Les Déchets Ménagers et Assimilés (DMA) :

Sont les déchets issus de la collecte municipale, c'est à dire ceux produits par les ménages.

(OM : Ordures Ménagères), les commerçants, les artisans, et même les entreprises et industries quand ils ne présentent pas de caractère dangereux ou polluant : papiers, cartons, bois, verre, textiles, emballages. Sont également assimilés aux déchets ménagers, les déchets banals des entreprises, les encombrants en provenance des collectes spécifiques, les déchets verts, les boues de station d'épuration et divers matériaux recyclables. [36]

III.4.2 Déchets encombrants :

Tous déchets issus des ménages qui en raison de leur caractère volumineux ne peuvent être collectés dans les mêmes conditions que les déchets ménagers et assimilés.[36]

III.4.3 Déchets spéciaux :

Tous déchets issus des activités industrielles, agricoles, de soins, de services et toutes autres activités qui en raison de leur nature et de la composition des matières qu'ils contiennent ne peuvent être collectés, transportés et traités dans les mêmes conditions que les déchets ménagers et assimilés et les déchets inertes.[36]

III.4.4 Déchets spéciaux dangereux :

Tous déchets spéciaux qui par leurs constituants ou par les caractéristiques des matières nocives qu'ils contiennent sont susceptibles de nuire à la santé publique et/ou à l'environnement.[36]

III.4.5 Déchets d'activité de soins :

Tous déchets issus des activités de diagnostic, de suivi et de traitement préventif ou curatif, dans les domaines de la médecine humaine et vétérinaire.[36]

III.4.6 Déchets inertes :

Tous déchets provenant notamment de l'exploitation des carrières, des mines, des travaux de démolition, de construction ou de rénovation, qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique lors de leur mise en décharge, et qui ne sont pas contaminés

Chapitre III : Caractérisation des déchets

par des substances dangereuses ou autres éléments générateurs de nuisances, susceptibles de nuire à la santé et/ou à l'environnement. [37]

III.5 Composition physique des déchets en Algérie :[38]

En Algérie les déchets ont une composition physique selon le tableau suivant :

Catégorie	Pourcentage (%)
Putrescibles (Organiques)	55,64
Papiers –cartons	6,22
Textiles Sanitaires	21,10
Plastiques	10,39
CNC	2,71
Verres	0,47
Métaux	1,32
INC	0,63
Déchets spéciaux	0,81

Tableau 3.1: Les composants physiques des déchets en Algérie. [38]

III.6 Le recyclage :

Le recyclage est un mode de traitement des déchets qui permet d'économiser de la matière première, de minimiser les pollutions liées aux volumes et à la toxicité des déchets, et par conséquent de préserver les ressources naturelles de la Terre. [39]

III.7 Compactages des déchets :

Le compactage permet de réduire le volume du massif de déchets et de ce fait de limiter l'évolution mécanique des déchets liée aux tassements ultérieurs, l'augmentation de la capacité de portance, l'augmentation de la résistance de cisaillement et donc l'augmentation de la perméabilité hydraulique (limitation des chemins préférentiels) et la limitation des risques de combustion interne (incendies). Il se traduit pour la plupart par l'évolution du poids volumique des déchets. Le compactage est fonction des engins utilisés, du nombre de passes et de la nature des déchets stockés. [40]

III.8 Gaz à effet de serre GES :

Un GES se compose de molécules qui ont des liens covalents polarisés et qui, par leur moment dipolaire, sont sensibles aux radiations infrarouges émises par la surface de la terre. Ces molécules laissent passer les radiations solaires qui arrivent sur la terre dans la plage de longueur d'onde de 100 à 5000 nm sans réagir avec celles-ci. Or, les radiations terrestres émises vers l'atmosphère, qui ont des longueurs d'onde entre 5000 à 25000 nm, réagissent avec les molécules des GES. En effet, ces dernières absorbent l'énergie thermique émise par la terre dans le spectre infra-rouge et, la transforment en énergie cinétique par des vibrations de cisaillement dans leurs liens covalents. Plus tard, cette énergie cinétique est retransformée en énergie thermique par des émissions spontanées. Ce phénomène de maintien de la chaleur au sein de la troposphère est connu comme l'effet de serre. De cette façon, plus le moment dipolaire de la molécule du GES est important, plus son effet de serre le sera aussi. (Olivier, 2012).[41]

III.9 La biomasse :

III.9.1 Définition de la biomasse :

Le terme biomasse désigne d'un point de vue biologique la quantité totale de toutes les espèces vivantes présentes dans un milieu naturel donné. Du point de vue énergétique, la biomasse désigne l'ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie.

C'est bien sûr dans ce dernier sens que nous utiliserons le terme 'biomasse' lors de notre rapport.

Chapitre III : Caractérisation des déchets

La biomasse peut être transformée chimiquement pour obtenir des biocombustibles. Par un processus de méthanisation des matières organiques on peut aussi fabriquer du biogaz et enfin la biomasse peut aussi être brûlée pour obtenir de la chaleur ou pour obtenir du biogaz par un processus de gazéification. [42]

III.9.2 La potentielle biomasse :

Contrairement aux autres énergies renouvelables, la biomasse jouit d'une disponibilité importante. Là où les énergies éolienne, hydraulique, solaire ou géothermique sont limitées par des contraintes liées au milieu environnant, la biomasse est une alternative plus souple. [42]

III.9.3 Les aspects positifs de la biomasse énergie :[43]

- Une énergie nouvelle renouvelable disponible
- La biomasse permet de produire la plupart des formes des énergies
- Une réduction de la production de gaz à effet de serre
- Un moyen de traitement de la pollution

III.10 Le biogaz :

III.10.1 Définition du biogaz :[44]

Le biogaz brut est obtenu à partir d'un processus de fermentation, en l'absence d'oxygène, des matières biodégradables stockées dans les installations de stockage des déchets (ISD). C'est un phénomène naturel et spontané, la décomposition des matières biodégradables débute très tôt. Dans un premier temps, les réactions sont aérobies, la température s'élève, l'oxygène disparaît. Les réactions anaérobies démarrent.

Le méthane (CH₄) et le dioxyde de carbone (CO₂). Généralement le taux de méthane varie entre 35 et 65%. D'autres composants à plus faible teneur existent dans le biogaz, ce sont le monoxyde de carbone, la vapeur d'eau, l'oxygène, l'azote, le sulfure d'hydrogène ainsi qu'une multitude de substances organiques à l'état de trace.

III.10.2 Compositions moyennes des biogaz :[44]

Le tableau suivant présente les compositions moyennes des biogaz.

CONSTITUTION	COMPOSITION
Méthane CH ₄	50 - 90%
Dioxyde de carbone CO ₂	10 - 40%
Hydrogène H ₂	1 - 3%
Azote N ₂	0,5 - 2%
Hydrogène sulfuré H ₂ S	0,1 – 0,2%
Monoxyde de carbone CO	0,0 - 0,1%

Tableau 3.2 : Les composants moyens des biogaz. [44]

III.10.3 Les économies énergétiques de biogaz :[45]

Un volume de 1m³ de biogaz brut avec une composition moyenne (comprise entre 50 à 70% de biométhane qui constitue la fraction inflammable) offre environ 5500 Kcal et représente l'équivalent énergétique de :

- 0,4 litre de gaz butane
- 0,6 litre de gasoil
- 2 Kg de charbon
- 5 Kg de bois de chauffe
- 2 Kw/h d'électricité

III.10.4 Les avantages de biogaz :[45]

- Le biogaz représente des avantages environnement, notamment, la réduction des déchets organiques, et la réduction de l'émission des gaz à effet de serre.
- Des avantages agricoles grâce à la production des engrais organiques et la protection de fertilité de sols.
- Des avantages sanitaires par la préservation de la santé publique et des avantages sociaux à travers le développement durable particulièrement des zones agricoles.
- Le biogaz le plus souvent, produit à partir de sources gratuites ou à très faible valeur ajoutée.

III.11 Le bio-méthane :[46]

III.11.1 Définition du bio-méthane :

Le biométhane est une énergie 100% renouvelable produite à partir de la dégradation de déchets organiques : déchets verts, ordures ménagères, déchets agricoles, déchets agroalimentaires ou encore déchets industriels. La décomposition de ces déchets dans une enceinte privée d'oxygène produit du biogaz qui, une fois épuré, devient du biométhane. Celui-ci peut être utilisé comme carburant, mais aussi comme gaz de ville ou comme source d'électricité verte.

III.11.2 Les avantages du biométhane :

- Réduit les émissions de gaz à effets de serre et améliore la qualité de l'air. Il pourra permettre à la France d'atteindre les objectifs des 3 x 20 sur lesquels elle s'est engagée et répondre à l'objectif d'incorporation de 10% de carburant d'origine renouvelable dans les transports à l'horizon 2020.
- Augmente la production d'énergie décentralisée renouvelable : le biométhane est la part renouvelable du gaz naturel et il est utilisable exactement pour les mêmes usages. Il peut tout aussi bien être utilisé localement que transporté.
- Crée de l'emploi local non délocalisable.
- Contribue aux engagements de la collectivité et des industriels.

Chapitre IV :
Problématique et méthode
de résolution

Chapitre IV : Problématique et méthode de résolution

Ce chapitre représente une méthode de résolution de la problématique proposé par **IPSIL**.

Partie (A) : Problématique

IV.A.1 problématique :

A l'invitation du laboratoire IPSIL (*Industrial Products & Systems Innovation Laboratory*) à l'école National Polytechnique d'Oran (ENPO), une rencontre s'en est suivie avec monsieur BENABEDALLAH Toufik le directeur du laboratoire IPSIL et le chef de service de CET (centre d'enfouissement technique) de Hassi Bounif Melle DAHMANE Sanaa. La discussion s'est portée sur la situation catastrophique des CET en Algérie.

A la suite de cela, une série de réunions s'est tenue. Des échanges d'avis divers et des visites sur le terrain (CET de Blida, CET de Hassi Bounif Oran) ont été réalisées.

Une participation au séminaire tenu à l'ENPO et organisé par le laboratoire IPSIL ayant pour titre « Valorisation Du Biogaz ».

Lors de ce séminaire, nous avons eu l'opportunité de rencontrer:

- ✓ Les représentants la société finlandaise **DORANOVA** qui est ont pour activité principale la conception, la construction et délivrent des usines (clés en main) de biogaz à partir de livraisons de sous-processus.
- ✓ Les représentants du Groupe italien **MARCOPOLO ENVIRONMENTAL GROUP** (Italie) : Les activités du sont plusieurs et peuvent être subdivisées en:

Production D'énergie Verte: à travers des ressources renouvelables: le biogaz de décharge, les biomasses zootechniques, le vent, le soleil et l'eau.

Assainissements de L'environnement: à travers le traitement des eaux et la mise en sécurité des décharges et la bio-ré-médiation.

Un débat et des échanges d'idées innovantes a conclu cette rencontre hautement instructive pour nous en tant qu'étudiants en Master.

Chapitre IV : Problématique et méthode de résolution

Compte tenu des caractéristiques physiques et chimiques extrêmement riches des ordures ménagères Algérienne, et par conséquent l'abondance du biogaz aux centres d'enfouissement techniques en Algérie, les entreprises italienne et finlandaise *MARCO-POLO* et *DORANOVA* ont proposés des offres pour valoriser le biogaz du CET de HassiBounif à Oran.

Dans ce contexte, le laboratoire IPSIL nous a proposé comme projet de fin d'étude, de réaliser un outil de calcul qui permettra de calculer pour n'importe quel CET la quantité de Biogaz que recèlerai le casier.

Ce travail a pour objectif de recenser la potentialité d'un CET et montrer la part du biogaz (en pourcentage), et ainsi pouvoir contrôler la quantité du biogaz présent. Cela évitera de très grandes catastrophe écologique et surtout des incendies incontrôlables et de grande ampleur.

Comme application réelle, nous valoriserons le biogaz présent au sein du CET de HassiBounif à Oran.

On rappelle que le CET Hassi Bounif d'Oran est le plus grand casier en Algérie.

Pour cela, une méthodologie de résolution s'est imposée et est développé selon les points suivants:

1. Une recherche bibliographique sur les différentes méthodes de prédiction de la production de biogaz.
2. Une évaluation du potentiel énergétique.
3. Une revue des méthodes de simulation et établiront un code qui permet d'estimer le potentiel énergétique d'un CET.
4. Proposer un algorithme (logiciel) de simulation graphique pour les CET en Algérie.

Partie (B) : Méthode de résolution

IV.B.1 Modèle de prédiction de production de biogaz :

Introduction :

Plusieurs modèles ont été élaborés pour simuler la production du biogaz dans les décharges. Ces modèles sont fonction de nombreux paramètres et prennent en compte les procédés biologiques, les différentes catégories composant les ordures ménagères, les transferts de matière et de chaleur, Deux types de modèles sont possibles pour la prédiction de la production du biogaz. : Un modèle stœchiométrique basé sur les différentes équations chimiques ayant lieu dans le massif et un modèle cinétique des réactions physico-chimiques et biochimiques traduit par des équations mathématiques, pour notre cas d'étude on a choisi le modèle cinétique a cause de son large utilisation et la disponibilité de ces paramètres.

IV.B.1.1 Modèles cinétiques d'ordre 1 (Hoeks, 1983) : [47]

On a posé les hypothèses suivantes pour faciliter les calculs :

- La masse des déchets enfouit varie et la concentration de la matière organique est constante pendant que le casier est opérationnel
- La diminution de la quantité de la masse des déchets organique et on fonction de la concentration des OM par une équation exponentielle

On l'équation suivante :

$$Q_{CH_4} = L_0 \sum_j \sum_i M_{ij} C_{ij} k_i (t_j)^{ds/2} e^{-K_i t_j} \quad (4.1)$$

Avec :

L_0 : Potentiel de production de méthane d'ordure en (m³/tonne).

ds : Dimension de la fraction solide.

K_i : Constance cinétique de réaction pour les déchets de catégories j (an⁻¹).

t_j : Durée du stockage (année).

M_{ij} : Masse de la catégorie de déchets i à l'année j (tonnes)

C_{ij} : La concentration de la matière organique biodégradable de classe i par unité de masse de déchets (Kg/tonne),

$$C_{ij} = C_{ij}^0 \times (1 - e^{-K_i t_{ij}}) \quad (4.2)$$

Chapitre IV : Problématique et méthode de résolution

C_{ij}° (Kg/tonne) : concentration initiale.

IV.B.1.1.1 Choix des K et L :

Les plages du potentiel de génération de CH₄ L_0 et de la constante de la vitesse de décomposition K ont été choisies pour permettre une modélisation souple, mais réaliste. Cela signifie que la courbe modélisée peut s'approcher facilement de la courbe de génération réelle en étant basée seulement sur des valeurs plausibles pour le CESM. La source qui a permis de déterminer les bornes des plages a été principalement le GIEC. Les valeurs de ces variables dépendent principalement du climat où se trouve le LES ainsi que de la nature des matières enfouies à travers les années. [49]

IV.B.1.1.2 Valeurs générales de K :

Le taux de génération de méthane, K , détermine le taux de production de méthane pour la masse de déchets dans la décharge. Plus la valeur de K est élevée, plus le taux de génération de méthane augmente rapidement. La valeur de K est principalement fonction de trois facteurs:

- ✓ Teneur en humidité de la masse de déchets.
- ✓ PH de la masse de déchets.
- ✓ Température de la masse de déchets.

Le GIEC recommande différentes plages pour K selon le climat régional et la nature de la matière enfouie, comme le montre le tableau. Les catégories du climat régional sont dans un premier temps séparées en climat Boréal-Tempéré et Tropical. Cette distinction est faite par le GIEC selon la température annuelle moyenne (TAM) de la région. [50]

Chapitre IV : Problématique et méthode de résolution

		Climat régional			
		Boréal tempéré		Tropical	
		Sec	Humide	Sec	Humide
Vitesse de dégradation	Nature de déchets	Plage de k (an ⁻¹)			
Lente	Papier et textile	0,03-0,05	0,05-0,07	0,04-0,06	0,06-0,085
	Bois et papier	0,01-0,03	0,02-0,04	0,02-0,04	0,03-0,05
Modérée	Rebuts de jardin et autre putrescible	0,04-0,06	0,06-0,1	0,05-0,08	0,15-0,2
	Déchets municipaux	0,04-0,06	0,08-0,1	0,05-0,08	0,15-0,2
	Déchets industrielle	0,04-0,06	0,08-0,1	0,05-0,08	0,15-0,2
Rapide	Nourriture et boue municipale	0,05-0,08	0,1-0,2	0,07-0,1	0,17-0,7

Tableau 4.1 : Plages de K recommandées par le GIEC selon le climat et la nature de la matière enfouie [48]

Pour une TAM < 20°C, le climat de la région est considéré comme Boréal-Tempéré, tandis qu'une TAM > 20°C désigne un climat plutôt Tropical.

La prochaine sous-section du tableau est divisée selon l'humidité de la région. Cette dernière est calculée selon la précipitation moyenne annuelle (PAM) et le potentiel d'évapotranspiration (PET) de la région.

Pour une région Tropicale, si le PAM < 1000 mm, alors les plages recommandées sont celles d'une région Humide, tandis que si le PAM > 1000 mm, celles d'une région Très Humide sont préconisées.

Pour un climat Boréal-Tempéré, l'humidité de la région est déterminée par le ratio PAM/PET. Lorsque ce paramètre est inférieur à 1, la plage recommandée est relative à un climat Sec; et quand il est supérieur à 1, la plage recommandée est celle de la catégorie Humide.

Chapitre IV : Problématique et méthode de résolution

Des valeurs de K utilisées par LandGEM sont présentées dans le tableau. Les décharges de la zone aride sont situées dans des zones qui reçoivent moins de 25 pouces de pluie par an. La valeur K par défaut est la valeur proposée par CAA pour les sites d'enfouissement classiques.

Default type	Landfill Type	K Value year ⁻¹
CAA	Conventional	0.05 (default)
CAA	Arid Area	0.02
Inventory	Conventional	0.04
Inventory	Arid Area	0.02
Inventory	Wet (Bioreactor)	0.7

Tableau 3.2 : Valeur de K recommandées par le LandGEM

IV.B.1.1.3 Valeurs générales de L_0 : [51]

Le potentiel de production de méthane L_0 , dépend uniquement du type et de la composition des déchets placés dans la décharge. Plus la teneur en cellulose des déchets est élevée, plus la valeur de L_0 est élevée.

Les valeurs de L_0 utilisées par LandGEM sont représentatives par MSW. Les valeurs L_0 utilisées dans l'équation du taux de décomposition du premier ordre, Les valeurs L_0 utilisées par LandGEM sont présentées dans le tableau (4.2). La valeur L_0 par défaut est la valeur proposée par le CAA pour les sites d'enfouissement classiques.

Default type	Landfill Type	L_0 Value m ³ /tonne
CAA	Conventional	170 (default)
CAA	Arid Area	170
Inventory	Conventional	100
Inventory	Arid Area	100
Inventory	Wet (Bioreactor)	96

Tableau 4.3 : Valeur de L_0 recommandées par le LandGEM

Partie (C): Méthode numérique de résolution

Introduction :

Les valeurs de flux de biogaz sont habituellement calculées par des expressions mathématiques qui considèrent parfois jusqu'à 100% de conversion et une réactivité chimique homogène. Ce qui n'est pas souvent le cas dans les décharges.

Plusieurs modèles ont été élaborés pour simuler la production de biogaz dans les décharges. Ces modèles sont fonction de nombreux paramètres et prennent en compte les procédés biologiques, les différentes catégories composant les ordures ménagères, les transferts de matière et de chaleur (Young, 1998; Pohland and Al-Yousfi, 1994; Swarbrick *et al.*, 1995).

Ce travail a commencé par des simulations sur 'MATLAB', pour le déroulement de l'équation et obtenir des résultats primaires, par la suite une INTERFACE a été créée en collaboration avec un informaticien spécialiste, cette partie représente les organigrammes utilisés sur MATLAB et L'INTERFACE.

IV.C.1 Sur MATLAB :

IV.C.1.1 définition du programme MATLAB :

MATLAB « matrix laboratory » est un langage de programmation de quatrième génération émulé par un environnement de développement du même nom ; il est utilisé à des fins de calcul numérique. [52]

Nous avons développé un programme de calcul sur MATLAB qui permet de calculer la quantité de biogaz et de méthane produite dans un casier selon le modèle Hoecks. (Figure 4.1)

IV.C.1.2 Organigramme de modèle du HOEKS sur MATLAB :

Le schéma (4.1) définit les différentes étapes suivit pour l'exécution du programme.

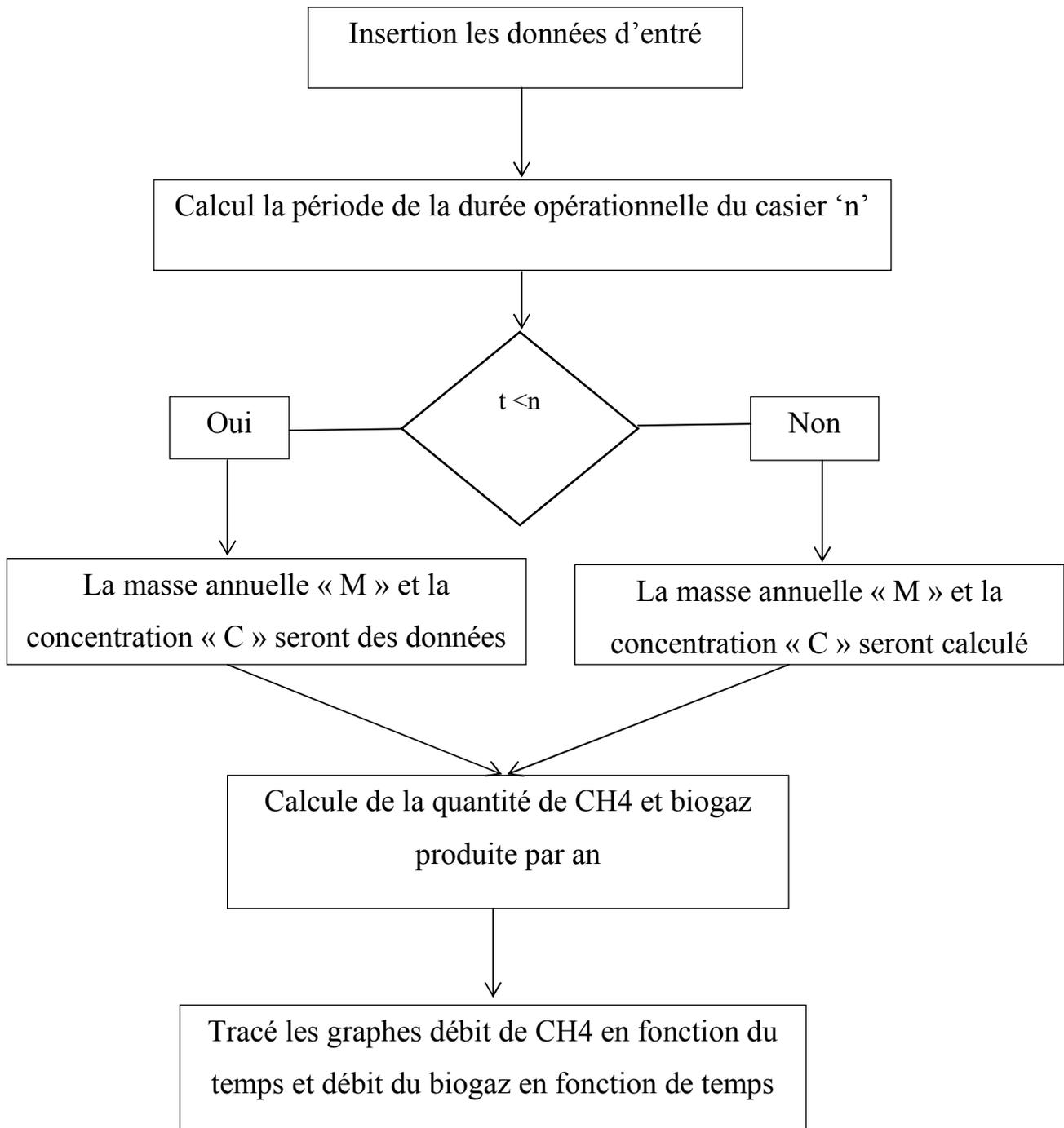


Figure 4.1 : Organigramme du calcul de modèle du Hoeks sur MATLAB

IV.C.2 Sur JAVA :

IV.C.2.1 définition du programme JAVA :

La particularité et l'objectif central de Java est que les logiciels écrits dans ce langage doivent être très facilement portables sur plusieurs systèmes d'exploitation tels que UNIX, Windows, Mac OS ou GNU/Linux, avec peu ou pas de modifications. Pour cela, divers plateformes et frameworks associés visent à guider, sinon garantir, cette portabilité des applications développées en Java. [53]

IV.C.2.2 Organigramme de modèle du HOUKS sur JAVA :

Pour la seconde partie, nous avons conçu une interface (en utilisant JAVA) pour pouvoir faire des simulations qui auront les résultats suivants :

- La quantité de biogaz en m^3 /an sous forme tabulaires et graphique
- La quantité de méthane en m^3 /an sous forme tabulaires et graphique

L'organigramme de cette interface est développée dans les figures 4.2 et 4.3.

ALGORITHM :

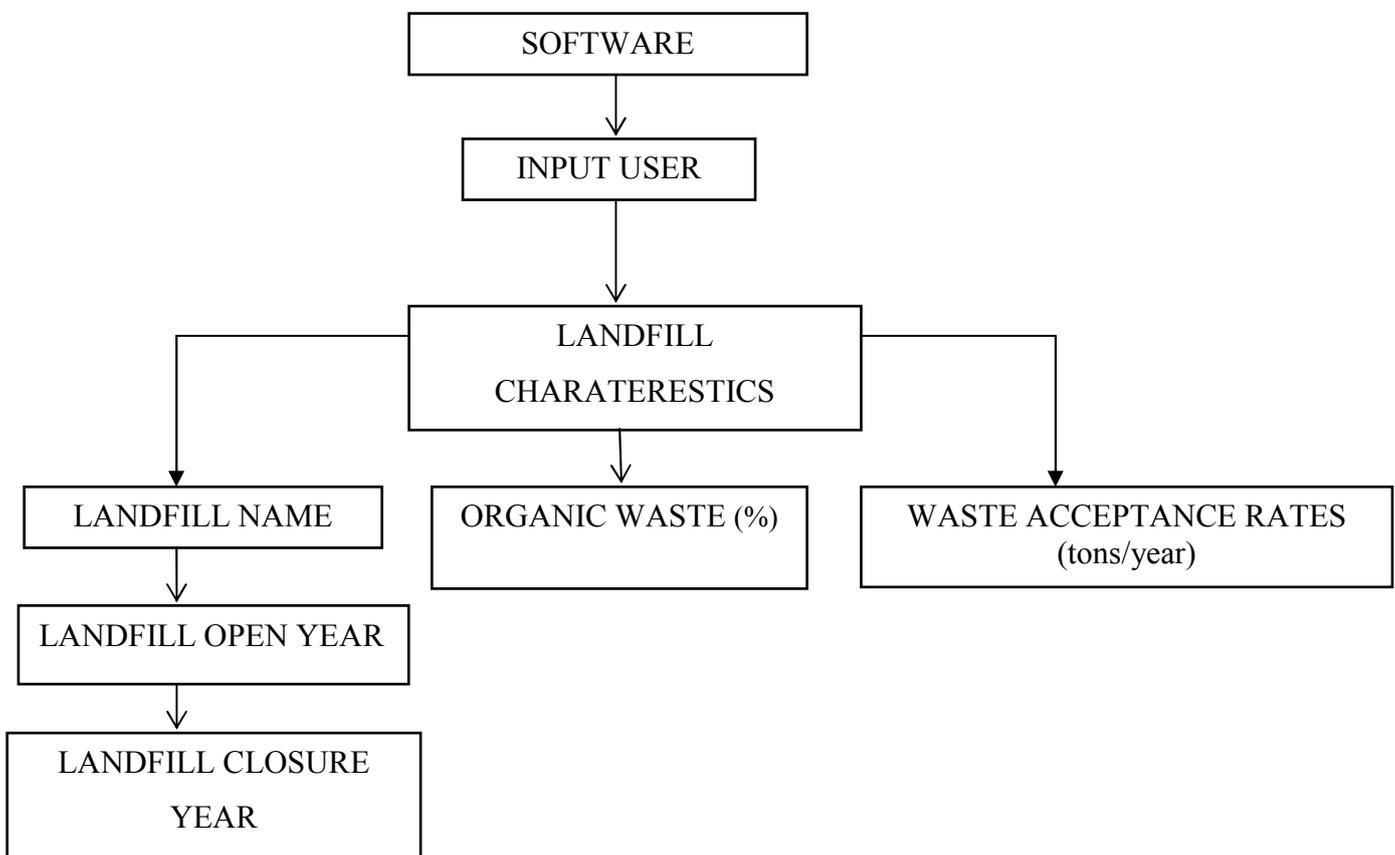


Figure 4.2 : Première étape de l'algorithme de l'interface sur JAVA

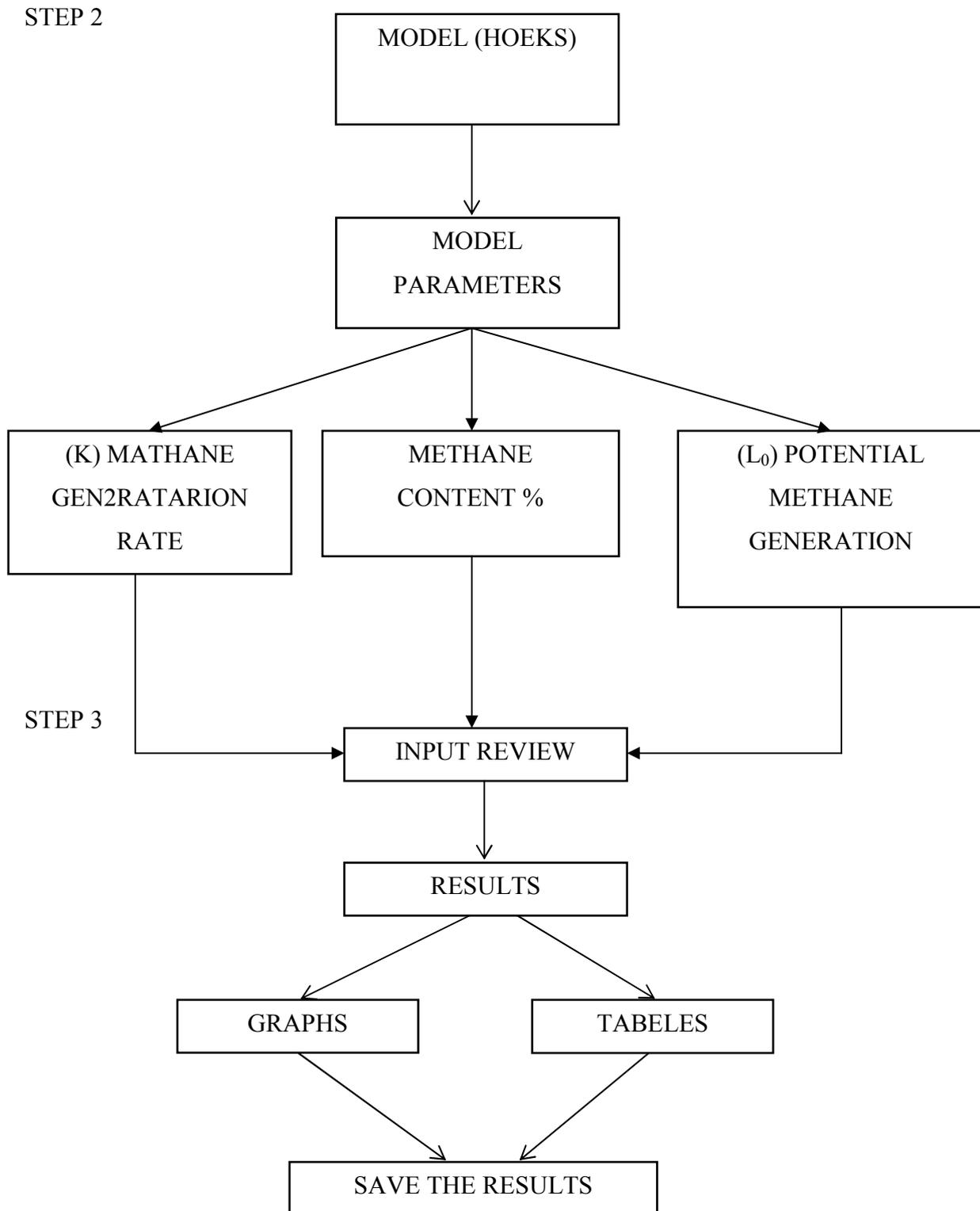


Figure 4.3 :La deuxième et la troisième étape de l'algorithme de l'interface sur JAVA

Conclusion :

L'indisponibilité des valeurs du potentiel de production de méthane L_0 et le taux de génération de méthane K pour les CET en Algérie nous conduisent à l'utilisation des valeurs proposées par GIEC et LandGEM pour les simulations.

*Chapitre V : Guide
d'utilisateur de logiciel
BIOlandGAS*

Chapitre V : Guide d'utilisateur du logiciel BIOlandGAS

Introduction :

Ce document fournit le guide d'utilisation, étape par étape, du logiciel BIOlandGAS. C'est une application avec une interface Java qui estime la quantité de Biogaz provenant de n'importe quel site d'enfouissement des déchets solides municipaux (MSW).

En utilisant ce document, vous apprendrez comment :

- Faire entrer les données spécifiques à la décharge.
- Choisir entre les paramètres spécifiques au site et au modèle par défaut.
- Estimer des taux d'émissions des gaz.
- Afficher des résultats tabulaires et graphiques.

V.1 Compréhension du BIOlandGAS :

Le logiciel (interface) BIOlandGAS est basé sur une équation de taux de décomposition de premier ordre pour quantifier les émissions provenant de la décomposition des déchets mis en décharge dans les sites d'enfouissement des déchets mondiaux. Le logiciel fournit une approche d'estimation des émissions de gaz d'enfouissement.

Les valeurs par défaut sont basées sur des données empiriques provenant des sites d'enfouissement des États-Unis. Les données de test de terrain peuvent également être utilisées à la place des valeurs par défaut du modèle lorsque celles-ci sont disponibles.

V.2 Schéma de calcul

Le tableau suivant représente le schéma de calcul de BIOlandGAS.

Chapitre V : Guide d'utilisateur du logiciel BIOlandGAS

Nom de la feuille de calcul	Fonction
INTRODUCTION	Contient un aperçu du modèle et des notes importantes concernant l'utilisateur BIOlandGAS.
USER INPUTS	Permet aux utilisateurs de fournir des caractéristiques de décharge, de déterminer les paramètres du modèle et d'entrer les taux d'acceptation des déchets.
INPUTS REVIEW	Permet aux utilisateurs d'examiner et de vérifier les entrées de modèles.
RESULTS	Indique les estimations des émissions du biogaz sous forme de tableau, en mètres cubes par an.
GRAPHS	Affiche les estimations des émissions du biogaz sous forme graphique par mètre cube par an.

Tableau 5.1 : Noms de la feuille de calcul et fonctions dans BIOlandGAS. Description du logiciel

V.3 Description de logiciel :

La figure (5.1) représente la première fenêtre de logiciel qui contient la description de logiciel sous forme d'une petite introduction et des notes importantes sur le logiciel.

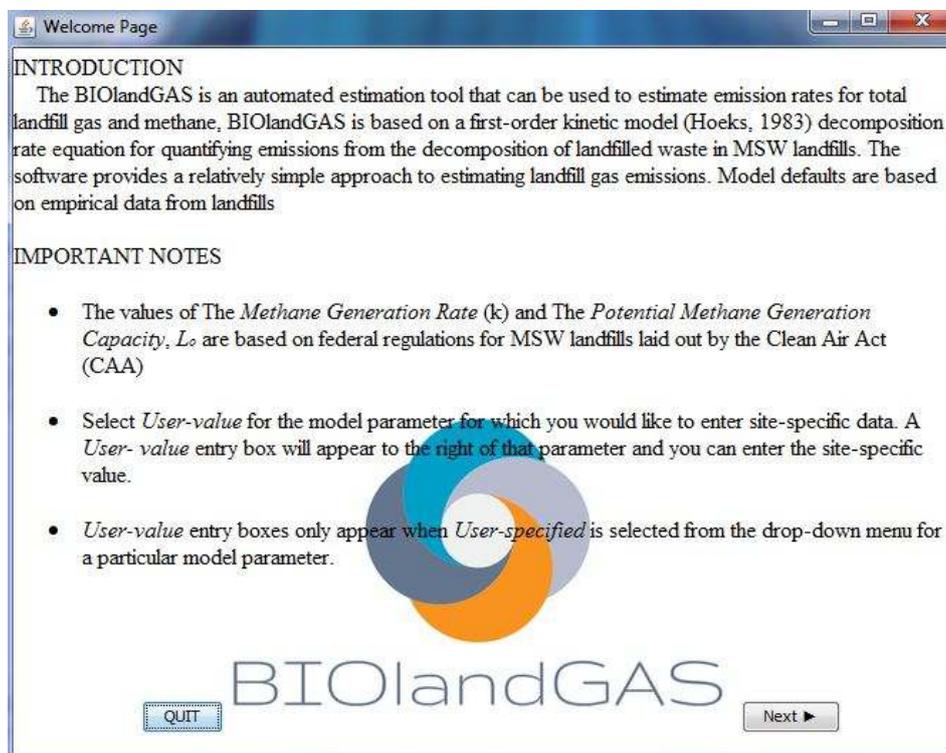


Figure 5.1: Fenêtre d'introduction de BIOlandGAS.

Chapitre V : Guide d'utilisateur du logiciel BIOlandGAS

V.3.1 Action à performer :

Cette fenêtre donne 3 choix à l'utilisateur :

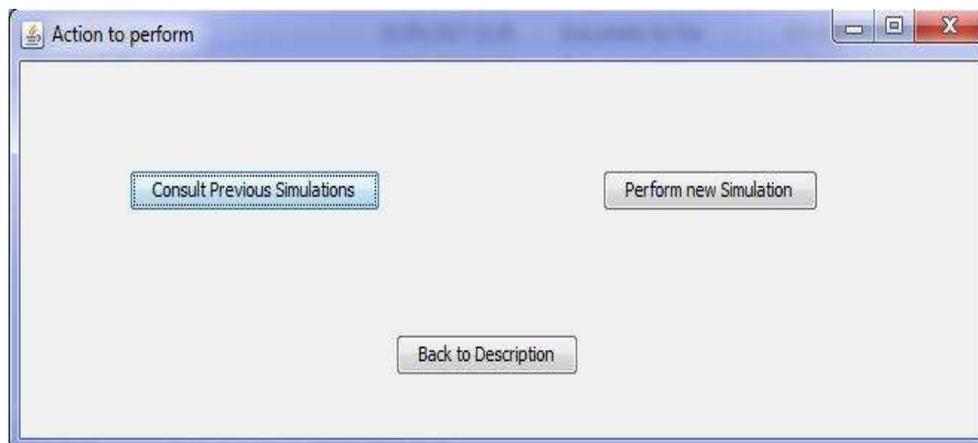


Figure 5.2 : Les actions à performer sur BIOlandGAS

- **Consult previous simulations :**

Ce bouton donne l'accès aux anciennes simulations déjà réalisées

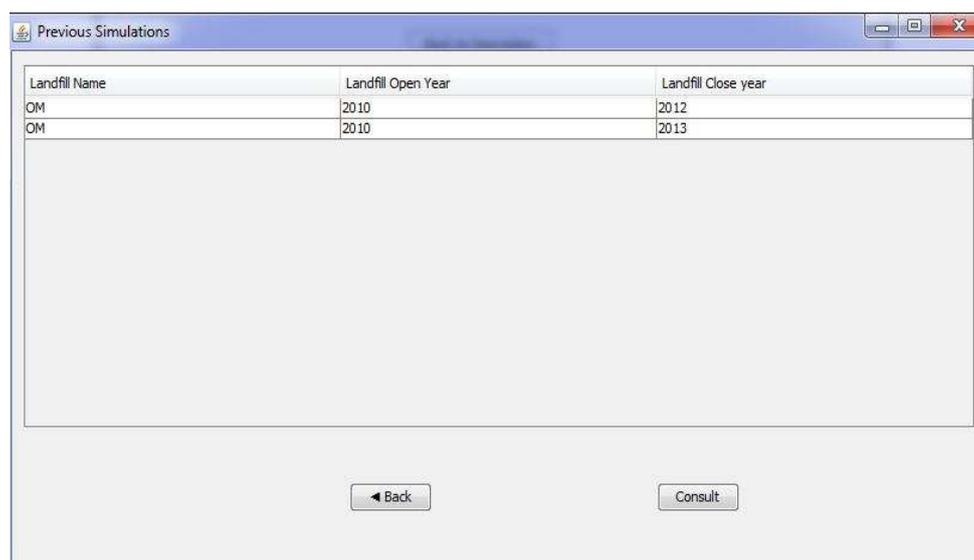


Figure 5.3 : Fenêtre des simulations précédentes sur BIOlandGAS

Chapitre V : Guide d'utilisateur du logiciel BIOLandGAS

- **Perform new simulation :**

En cliquant sur ce bouton l'utilisateur commence une nouvelle simulation

- **Back to description :**

Revenir à la page d'accueil

V.3.2 Caractéristiques d'enfouissement :

Saisissez les données sur la feuille de travail USER INPUTS qui rapporte à l'identité et à la taille de la décharge Nom ou identifiant d'enfouissement, Année d'enfouissement, Année de fermeture des décharges, Figure (5.4) montre ces entrées telles qu'elles apparaissent sur la feuille de travail USER INPUTS.

Year	tons/year
2010	
2011	
2012	
2013	
2014	
2015	

Figure 5.4 : Les caractéristiques du CET sur BIOLandGAS.

- **Landfill Name :**

Utilisez le nom de la décharge pour l'identifier et pour le sauvegarde des résultats

- **Landfill open year :**

L'année libre d'enfouissement est un apport requis et représente l'année où la décharge a commencé à accepter les déchets. L'année ouverte devrait être dans un format d'année à quatre chiffres (par exemple, 2004).

Chapitre V : Guide d'utilisateur du logiciel BIOlandGAS

- ***Landfillclosureyear :***

BIOlandGAS utilise l'année de fermeture de la décharge pour déterminer la dernière année où la décharge a accepté les déchets.

- ***Organic waste :***

Représente le pourcentage de la matière organique dans les déchets enfouis, la valeur entrée par l'utilisateur reste constante durant.

- ***WasteAcceptance Rates :***

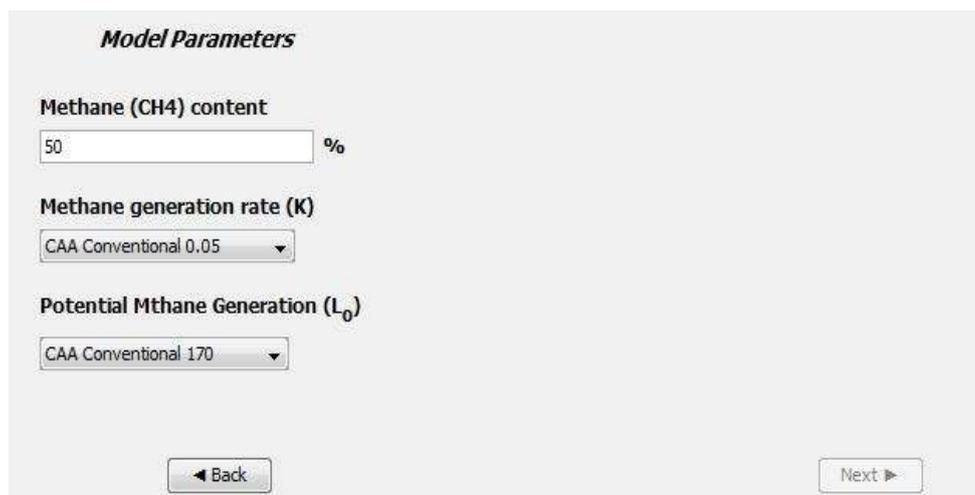
Le tableau des taux d'acceptation des déchets est affiché dans la figure(5.3) Une fois que vous avez fait rentrer l'année ouverte et la fermeture de la décharge, la colonne de l'année indique automatiquement les années pour lesquelles les données du taux d'acceptation sont nécessaires. Les taux d'acceptation des déchets doivent être inscrits dans la feuille de travail USPES INPUTS

V.3.3 Déterminer les paramètres du modèle :

BIOlandGAS s'appuie sur plusieurs paramètres du modèle pour estimer les émissions des sites d'enfouissement comme la figure (5.4) montre.

- Teneur en méthane
- Taux de production de méthane (K),
- Capacité potentielle de production de méthane (Lo),

Chapitre V : Guide d'utilisateur du logiciel BIOlandGAS



Model Parameters

Methane (CH₄) content
50 %

Methane generation rate (K)
CAA Conventional 0.05

Potential Mthane Generation (L₀)
CAA Conventional 170

◀ Back Next ▶

Figure 5.5 : Les caractéristiques du modèle sur BIOlandGAS.

- ***Methane content :***

Vous pouvez saisir la quantité de méthane en pourcentage suivant les caractéristiques de biogaz, pour le contenu de méthane

- ***Methane Generation Rate (K)***

Le taux de génération de méthane (K), détermine le taux de production de méthane pour la masse de déchets dans la décharge. Il existe quatre configurations de la valeur du K tableau (4.2).

- ***Potential Methane Generation Capacity (L₀) :***

Le potentiel de production de méthane L₀ dépend uniquement du type et de la composition des déchets placés dans la décharge. Les valeurs L₀ par défaut utilisées par BIOlandGAS sont représentées sur le tableau (4.3).

Chapitre V : Guide d'utilisateur du logiciel BIOlandGAS

Model Parameters

Methane (CH₄) content
 %

Methane generation rate (K)
User-Value Enter the value here :

Potential Mthane Generation (L₀)
User-Value Enter the value here :

Figure 5.6 : Les caractéristiques du modèle sur BIOlandGAS.

- **User-value :**

Sélectionnez *User-value* pour le paramètre du modèle pour lequel vous souhaitez saisir des données spécifiques au site. Une zone de saisie de valeur apparaîtra à droite de ce paramètre et vous pouvez entrer la valeur de K et L_0 spécifique au site. Les cases d'entrée de valeur spécifiées par l'utilisateur n'apparaissent que lorsque l'option *User-value* est sélectionnée dans le menu pour un paramètre de modèle particulier (voir figure 5.6).

V.3.4 Vérification des paramètres (INPUTS REVIEW) :

INPUTS OVERVIEW

Landfill Characteristics

Landfill name

Landfill open year

Landfill closure year

Organic waste
 %

Year	tons/year
2010	50000
2011	50000
2012	50000
2013	50000

Model Parameters

Methane (CH₄) content
 %

Methane generation rate (K)
User-Value the value

Potential Mthane Generation (L₀)
User-Value the value

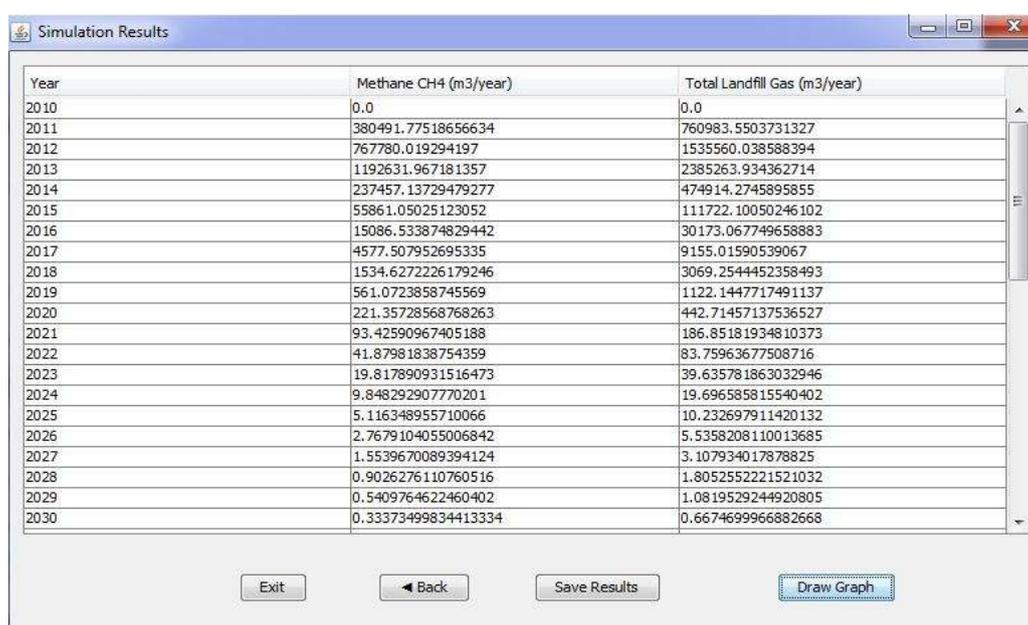
Figure 5.7 : Les caractéristiques du modèle sur BIOlandGAS.

Chapitre V : Guide d'utilisateur du logiciel BIOlandGAS

Pour examiner vos données d'entrée (car ils seront utilisés par BIOlandGAS), passez à la feuille de travail INPUT REVIEW comme la figure (5.7) indique. Toutes les données saisies dans la feuille de travail USER INPUTS ainsi que les entrées déterminées par le modèle figurent sur la feuille de travail INPUT REVIEW.

V.3.5 Visualisation des résultats :

Sélectionnez le bouton *NEXT* Pour voir les estimations d'émission en format tabulaire, accédez à la feuille de calcul SIMULATION RESULT comme la Figure (5.7) montre.



Year	Methane CH4 (m3/year)	Total Landfill Gas (m3/year)
2010	0,0	0,0
2011	380491,77518656634	760983,5503731327
2012	767780,019294197	1535560,038588394
2013	1192631,967181357	2385263,934362714
2014	237457,13729479277	474914,2745895855
2015	55861,05025123052	111722,10050246102
2016	15086,533874829442	30173,067749658883
2017	4577,507952695335	9155,01590539067
2018	1534,6272226179246	3069,2544452358493
2019	561,0723858745569	1122,1447717491137
2020	221,35728568768263	442,71457137536527
2021	93,42590967405188	186,85181934810373
2022	41,87981838754359	83,75963677508716
2023	19,817890931516473	39,635781863032946
2024	9,848292907770201	19,696585815540402
2025	5,116348955710066	10,232697911420132
2026	2,7679104055006842	5,5358208110013685
2027	1,5539670089394124	3,107934017878825
2028	0,9026276110760516	1,8052552221521032
2029	0,5409764622460402	1,0819529244920805
2030	0,33373499834413334	0,6674699966882668

Figure 5.8 : La fenêtre des résultats tabulaires de BIOlandGAS.

Le tableau affiche les résultats des émissions du biogaz et de méthane (quantité de méthane dépend de la valeur de *Méthane content* entrée par l'utilisateur) en mètre cube par an.

- *Affichage des résultats graphiques*

Pour afficher les estimations d'émission dans un format graphique, accédez à la feuille de calcul *Draw graph*, les graphes de la figure (5.9) représente les émissions totales du biogaz (en bleu) et la quantité de méthane dans le biogaz (en rouge) en mètre cube par an.

Chapitre V : Guide d'utilisateur du logiciel BIOLandGAS

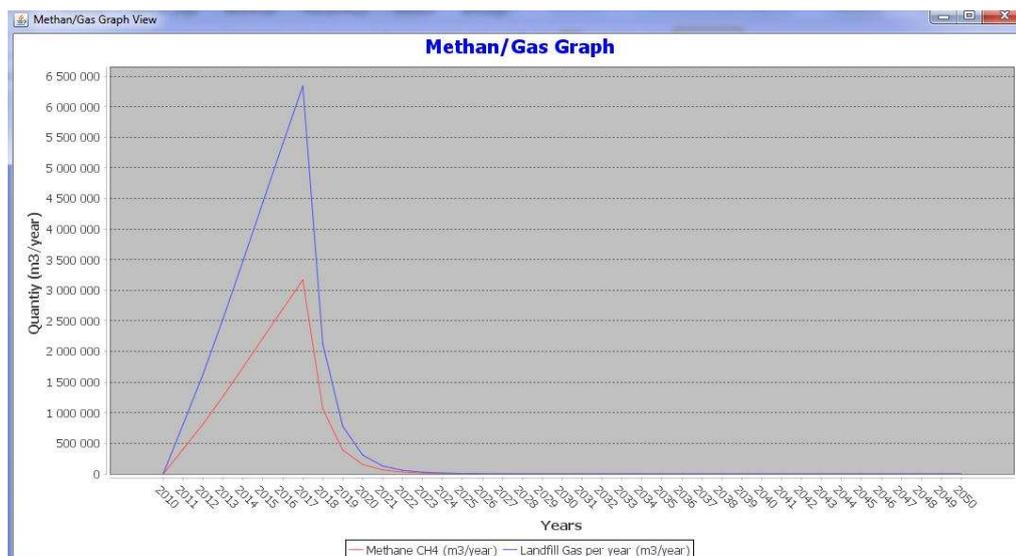


Figure 5.9 : Représentation graphique de BIOLandGAS.

- **Enregistrer les résultats :**

Le bouton *saveresults* conduit l'utilisateur à sauvegarder les résultats des simulations obtenus comme la figure (5.2) montre.

Chapitre VI :
Simulations et
Discussions des Résultats

Chapitre VI : Simulations et Discussions des Résultats

Ce chapitre est subdivisé en deux parties:

Partie A: validation du programme de calcul

Partie B: Simulation de plusieurs cas.

Partie A : Validation de logiciel BIOlandGAS :

Afin de valider le logiciel, élaboré lors de cette étude, à savoir le *BIOlandGAS* ; une comparaison avec les résultats obtenus par d'autres études et avec les mêmes données (INPUT).

Le modèle de *lanGEM* est pris comme référence. Le modèle LandGEM est configuré dans le logiciel Excel de Microsoft (version 3.02) sous forme de fichier interactif exécute l'équation (1.2), [53]

Cette validation consiste à exécuter les deux programmes avec les mêmes entrées et comparer les résultats.

Les paramètres choisis pour la comparaison sont les suivants :

- Landfill open year : 2010
- Landfill closure year : 2015
- Methane content : 50 %
- Methane generation rate : 0.05 year^{-1}
- Potential méthane génération : $170 \text{ m}^3/\text{tonne}$
- waste acceptance rate : (Figure 6.1)

Chapitre VI : Simulations et Discussions des Résultats

Waste Acceptance Rates		4: ENTER WASTE ACCEPTANCE RATE		
Year	tons/year	Input Units:	short tons/year	
2010	500000			
2011	500000			
2012	500000			
2013	500000			
2014	500000			
2015	500000			
Year	Input Units (short tons/year)	Calculated Units (Mg/year)		
2010	500 000	454 545		
2011	500 000	454 545		
2012	500 000	454 545		
2013	500 000	454 545		
2014	500 000	454 545		
2015	500 000	454 545		
2016				
2017				

Figure 6.1 : Les masses des déchets utilisée pour les comparaisons

En choisissant les paramètres identiques pour les deux interfaces, les résultats obtenus par simulation (via notre outil de calcul *BIOLandGAS*), aux résultats sous forme de tableaux et de graphes suivants :

VI.A.1. Les résultats tabulaires :

Year	Methane CH4 (m3/year)	Landfill Gas per year (m3/year)
2012	0,0	0,0
2013	4042725,111357267	8085450,222714534
2014	8157662,705000843	1.6315325410001686E7
2015	1,2671714651301919E7	2,5343429302603837E7
2016	1,7398028710307777E7	3,4796057420615554E7
2017	2,220350685229907E7	4,440701370459814E7
2018	5996556,755748408	1,1993113511496816E7
2019	1819456,1100627624	3638912,220125525
2020	609979,6888865548	1219959,3777731096
2021	223013,61160188887	446027,22320377774
2022	87984,52566624488	175969,05133248976
2023	37134,69074248907	74269,38148497813
2024	16646,28270250579	33292,56540501158
2025	7877,164412717946	15754,328825435892
2026	3914,4741833117832	7828,9483666235665
2027	2033,6332486759736	4067,2664973519477
2028	1100,1819224430099	2200,3638448860197
2029	617,6668175062266	1235,3336350124532
2030	358,77410570453753	717,5482114090751
2031	215,02593546650823	430,05187093301646
2032	132,65213040678117	265,30426081356234

Figure 6.2 : Tableau des résultats de la simulation par *BIOLandGAS*

Chapitre VI : Simulations et Discussions des Résultats

Year	Total landfill gas			Methane		
	(Mg/year)	(m ³ /year)	(short tons/year)	(Mg/year)	(m ³ /year)	(short tons/year)
2010	0	0	0	0	0	0
2011	9.436E+03	7.556E+06	1.038E+04	2.521E+03	3.778E+06	2.773E+03
2012	1.841E+04	1.474E+07	2.025E+04	4.918E+03	7.372E+06	5.410E+03
2013	2.695E+04	2.158E+07	2.965E+04	7.199E+03	1.079E+07	7.919E+03
2014	3.507E+04	2.808E+07	3.858E+04	9.368E+03	1.404E+07	1.031E+04
2015	4.280E+04	3.427E+07	4.708E+04	1.143E+04	1.714E+07	1.258E+04
2016	5.015E+04	4.016E+07	5.516E+04	1.339E+04	2.008E+07	1.473E+04
2017	4.770E+04	3.820E+07	5.247E+04	1.274E+04	1.910E+07	1.402E+04
2018	4.538E+04	3.633E+07	4.991E+04	1.212E+04	1.817E+07	1.333E+04
2019	4.316E+04	3.456E+07	4.748E+04	1.153E+04	1.728E+07	1.268E+04
2020	4.106E+04	3.288E+07	4.516E+04	1.097E+04	1.644E+07	1.206E+04
2021	3.905E+04	3.127E+07	4.296E+04	1.043E+04	1.564E+07	1.148E+04
2022	3.715E+04	2.975E+07	4.086E+04	9.923E+03	1.487E+07	1.092E+04
2023	3.534E+04	2.830E+07	3.887E+04	9.439E+03	1.415E+07	1.038E+04
2024	3.361E+04	2.692E+07	3.698E+04	8.979E+03	1.346E+07	9.877E+03
2025	3.198E+04	2.560E+07	3.517E+04	8.541E+03	1.280E+07	9.395E+03
2026	3.042E+04	2.436E+07	3.346E+04	8.124E+03	1.218E+07	8.937E+03
2027	2.893E+04	2.317E+07	3.183E+04	7.728E+03	1.158E+07	8.501E+03
2028	2.752E+04	2.204E+07	3.027E+04	7.351E+03	1.102E+07	8.086E+03
2029	2.619E+04	2.096E+07	2.880E+04	6.992E+03	1.049E+07	7.692E+03

Figure 6.3 : Tableau des résultats de la simulation par landGEM

- **Commentaire:**

On remarque que les valeurs obtenues des deux simulations sont proches par exemple pour la première année la quantité de biogaz produite suivant le landGEM est de 7,55 millions (m³/an) et de 8,08 millions (m³/an) pour BIOlandGAS, une autre comparaison effectuée sur le taux maximum annuelle de la production biogaz, sur BIOlandGAS la valeur remarqué est de 45 millions m³/an, 40 millions m³/an.

VI.A.2. Les résultats graphiques :

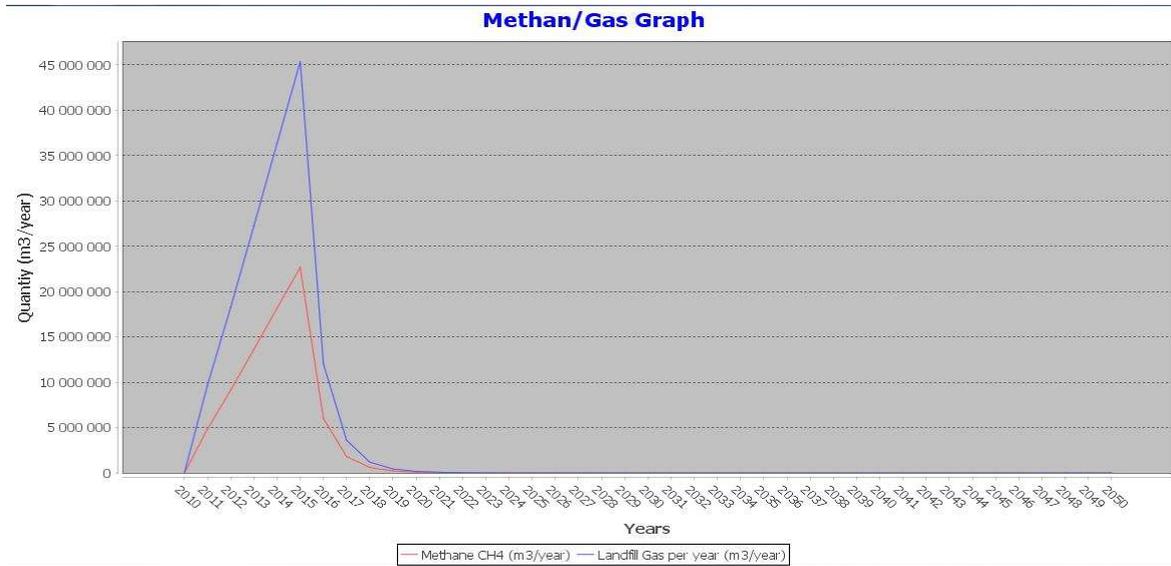


Figure 6.4 : Représentation graphique des résultats de la simulation via BIOlandGAS

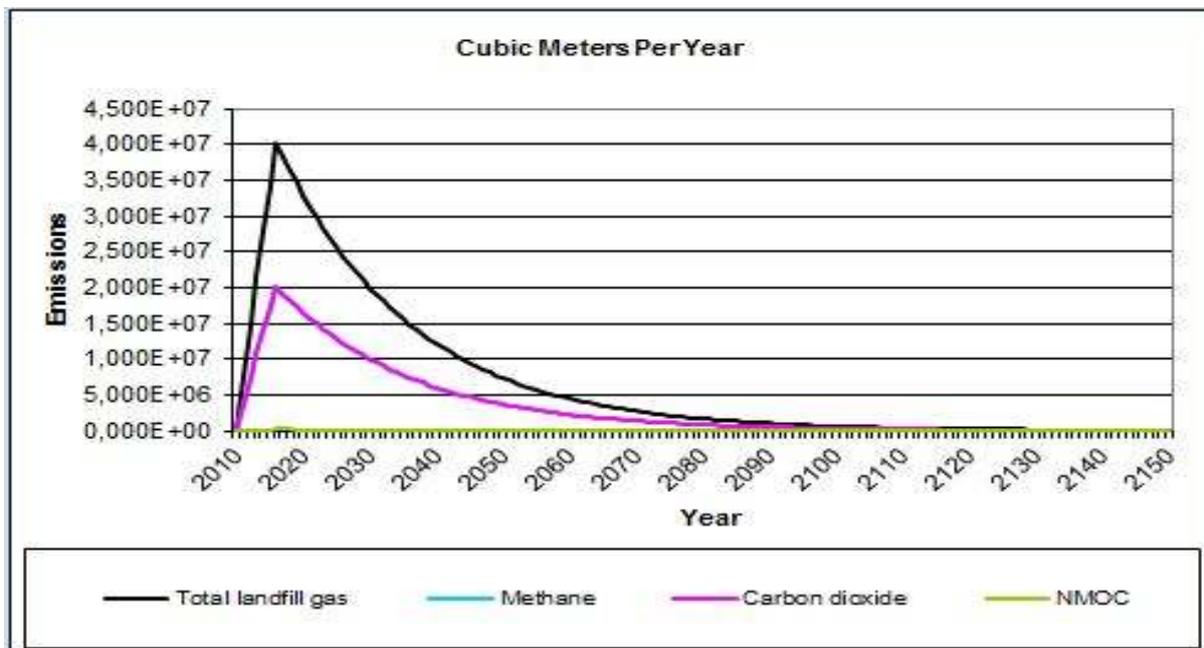


Figure 6.5 : Représentation graphique des résultats obtenus par simulation via landGEM

Chapitre VI : Simulations et Discussions des Résultats

Conclusion

Suivant les résultats tabulaires et graphiques des deux interfaces et la convergence des résultats entre les deux outils, on conclut que les simulations sur BIOlandGAS sont correctes et acceptable.

Ce logiciel est un très bon outil de prédiction de production du biogaz pour n'importe quel CET. Son importance est primordiale pour l'avenir de la gestion des déchets domestiques des CET en Algérie et ailleurs.

Partie B : Simulations sur le logiciel BIOlandGAS :

Cette partie représente les différentes simulations sur le logiciel **BIOlandGAS**. Tous les cas possibles sont exécutés et cela pour pouvoir évaluer les variations des résultats lorsque l'on fixe les paramètres du CET pris en compte.

Pour cela, on prend le CET de Hassi Bounif d'Oran comme un cas d'étude. On considère que:

- Le casier est opérationnel depuis l'année 2010 et que sa fermeture s'est faite en 2015.
- Une quantité de déchets journalière de 1200 (tonne/jour), donc, la quantité des déchets enfouis est 438000 (tonne/an)
- Pour le cas de notre pays, les casiers renferment 60% de matière organique et le biogaz présent contient 50% de méthane comme l'indiquent la figure (6.6)

Chapitre VI : Simulations et Discussions des Résultats

USER INPUTS

Landfill Characteristics

Landfill name: CET HASSI BOUNIF ORAN

Landfill open year: 2010

Landfill closure year: 2015

Organic waste: 60 %

Waste Acceptance Rates

Year	tons/year
2010	438000
2011	438000
2012	438000
2013	438000
2014	438000
2015	438000

Model Parameters

Methane (CH4) content: 50.0 %

Figure 6.6 : Les paramètres fixes durant les simulations

VI. B.1. Première simulation :

Les paramètres choisis dans la première simulation sont proposés par Clean Air Act (CAA) pour un casier classique (condition standard d'enfouissement) [51] :

- ✓ Constance cinétique de réaction (K) : 0.05 an^{-1}
- ✓ Potentiel de production de méthane d'ordure : $170 \text{ (m}^3\text{/tonne)}$

Les résultats de la simulation sont représentés dans le tableau suivant:

Chapitre VI : Simulations et Discussions des Résultats

Year	Methane CH4 (m3/year)	Landfill Gas per year (m3/year)
2010	0.0	0.0
2011	4249712.637058759	8499425.274117518
2012	8001070.5346563095	1.600214106931262E7
2013	1.1934620513729973E7	2.3869241027459946E7
2014	1.5921332046690706E7	3.1842664093381416E7
2015	1.9870551862274446E7	3.974110372454889E7
2016	5269533.627793878	1.053906725558775E7
2017	1574407.4531130106	3148814.9062260212
2018	520824.89264023537	1041649.7852804707
2019	188188.23883309288	376376.4776661858
2020	73466.88992313884	146933.77984627767
2021	30713.258948261784	61426.51789652357
2022	13648.486672070278	27296.973344140555
2023	6407.0916120499005	12814.1832240998
2024	3160.428639203955	6320.85727840791
2025	1630.6053655235446	3261.210731047089
2026	876.4716350257278	1752.9432700514556
2027	489.09670617224805	978.193412344496
2028	282.4744682439065	564.948936487813
2029	168.38400907475017	336.76801814950034
2030	103.34669429315166	206.69338858630329
2031	65.16471770175013	130.32943540350027
2032	42.129755609294875	84.25951121858976
2033	27.877119776594323	55.75423955318865
2034	18.848769813357638	37.697539626715276
2035	13.00321884820993	26.00643769641986
2036	9.140363808158938	18.280727616317876
2037	6.538563097221967	13.077126194443936
2038	4.754585758970308	9.509171517940617
2039	3.5107446238987245	7.021489247797449
2040	2.6297962407018076	5.259592481403615
2041	1.9966091545801257	3.9932183091602513
2042	1.535157281001389	3.070314562002778
2043	1.1944508669281602	2.3889017338563203
2044	0.9397877595628944	1.8795755191257888
2045	0.7472219463848535	1.494443892769707
2046	0.6000115970225186	1.2000231940450372
2047	0.4863064247075788	0.9726128494151576
2048	0.3976191826712564	0.7952383653425127
2049	0.3278034495517667	0.6556068991035334
2050	0.2723608666895366	0.5447217333790731

Figure 6.7 : Résultats tabulés de la simulation pour un casier classique

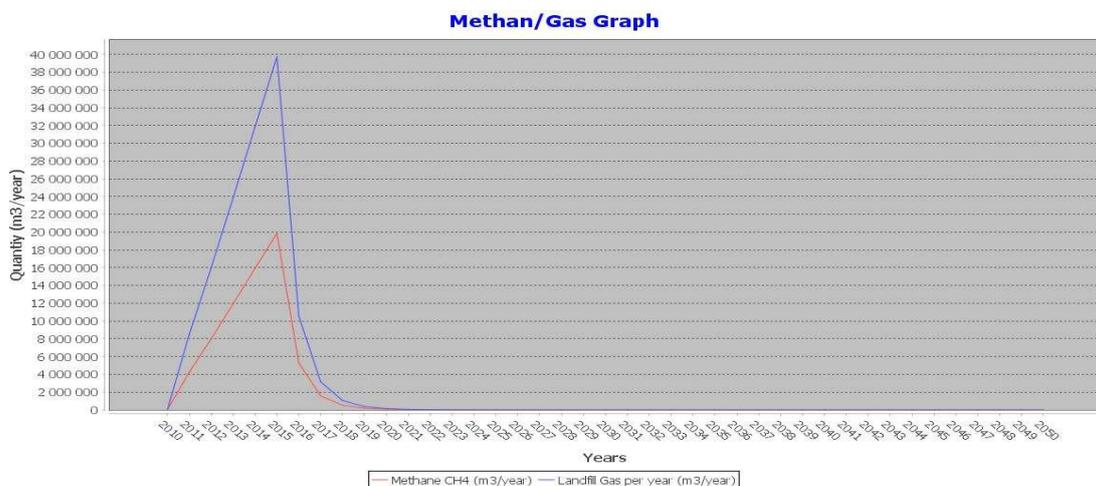


Figure 6.8 : Résultats graphiques de la simulation pour un casier classique

Chapitre VI : Simulations et Discussions des Résultats

VI.B.1.1 Discussions des résultats :

En remarque depuis la figure (6.7) et la figure (6.8) une production croissante de biogaz en fonction de la quantité des déchets enfouit pendant que le casier est opérationnel.

Après la fermeture de casier en 2015, la quantité de biogaz diminue en fonction de la diminution exponentielle de la concentration de la matière organique suivant l'équation (4.2).

VI. B.2. Deuxième simulation :

Les paramètres choisis dans la deuxième simulation sont proposés par Clean Air Act (CAA) pour un casier situé dans une zone aride avec les valeurs suivantes[54] :

- ✓ Constance cinétique de réaction (K) : 0.02 an^{-1}
- ✓ Potentiel de production de méthane d'ordure : $170 \text{ (m}^3\text{/tonne)}$

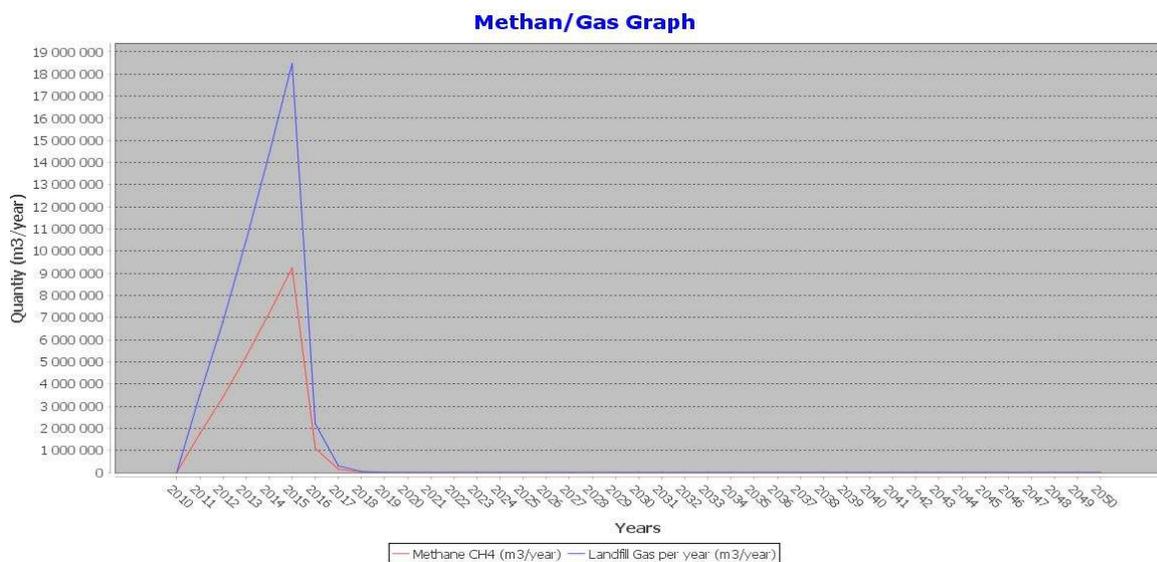


Figure 6.9 : Résultats graphiques pour le cas de la simulation en zone aride

Chapitre VI : Simulations et Discussions des Résultats

Year	Methane CH4 (m3/year)	Landfill Gas per year (m3/year)
2010	0,0	0,0
2011	1751654.1987766314	3503308.3975532628
2012	3398331.5235786526	6796663.047157305
2013	5223421.784313148	1.0446843568626296E7
2014	7180500.468982238	1.4361000937964477E7
2015	9234514.741228994	1.8469029482457988E7
2016	1100993.6144588238	2201987.2289176476
2017	149954.55588462908	299909.11176925816
2018	22925.04094740389	45850.08189480778
2019	3880.229074569518	7760.458149139036
2020	719.1153866421758	1438.2307732843517
2021	144.6090660428679	289.2181320857358
2022	31.315745878817136	62.63149175763428
2023	7.256368692093711	14.512737384187425
2024	1.7892947809487112	3.5785895618974224
2025	0.4672892048076462	0.9345784096152925
2026	0.1287139468517299	0.2574278937034598
2027	0.03725718070316759	0.07451436140633518
2028	0.011296025954565542	0.022592051909131085
2029	0.0035769241785441348	0.0071538483570882695
2030	0.0011798503638982853	0.0023597007277965706
2031	4.0443765142174104E-4	8.088753028434821E-4
2032	1.4376481265567146E-4	2.875296253113429E-4
2033	5.289092579134509E-5	1.0578185158269018E-4
2034	2.0102980083403725E-5	4.020596016680745E-5
2035	7.880920601807227E-6	1.5761841203614453E-5
2036	3.1818026950499875E-6	6.363605390099975E-6
2037	1.321118188648022E-6	2.642236377296044E-6
2038	5.634028888560316E-7	1.1268057777120632E-6
2039	2.4648026151333533E-7	4.929605230266707E-7
2040	1.1049520688146782E-7	2.2099041376293566E-7
2041	5.0704664459490746E-8	1.0140932891898149E-7
2042	2.3794133908058942E-8	4.758826781611789E-8
2043	1.1408022617356351E-8	2.2816045234712702E-8
2044	5.5833473703821804E-9	1.1166694740764361E-8
2045	2.787213923353108E-9	5.574427846706216E-9
2046	1.4180947214744637E-9	2.8361894429489273E-9
2047	7.348287007693818E-10	1.4696574015387634E-9
2048	3.8754026471015114E-10	7.750805294203023E-10
2049	2.0788214016728066E-10	4.157642803345613E-10
2050	1.1335003770700038E-10	2.2670007541400077E-10

Figure 6.10 : Résultats tabulaire de la simulation en zone aride

VI.B.2.1 Discussions des résultats :

On remarque une production croissante de biogaz en fonction de la quantité des déchets enfouis pendant que le casier est opérationnel.

Cette croissance est faible par rapport à la première simulation à cause de changement de la valeur de K d'une zone humide à une zone aride comme le montrent les figures (6.9) et (9.10) Après la fermeture de casier, la quantité de biogaz diminue en fonction de la diminution exponentielle de la concentration de la matière organique suivant l'équation (4.2).

Chapitre VI : Simulations et Discussions des Résultats

VI. B.3. Troisième simulation :

Les paramètres choisis pour la troisième simulation sont des valeurs d'inventaire conventionnel en Etats Unis [51]:

- ✓ Constance cinétique de réaction (K) : 0.04 an⁻¹
- ✓ Potentiel de production de méthane d'ordure : 100 (m³/tonne)

Year	Methane CH4 (m3/year)	Landfill Gas per year (m3/year)
2010	0.0	0.0
2011	2019963.6735301253	4039927.3470602506
2012	3841271.813543534	7682543.627087068
2013	5787333.39648786	1.1574666792975718E7
2014	7798161.611772914	1.5596323223545827E7
2015	9830275.911850244	1.9660551823700488E7
2016	2167724.7018981585	4335449.403796317
2017	540985.5135106168	1081971.0270212337
2018	150149.8502306122	300299.7004612244
2019	45717.900495256086	91435.80099051217
2020	15104.627474176974	30209.254948353948
2021	5366.620275981986	10733.240551963972
2022	2035.2432427140504	4070.4864854281013
2023	818.6876278873859	1637.3752557747719
2024	347.4288751517677	694.8577503035355
2025	154.82365251982944	309.6473050396589
2026	72.15552079881957	144.31104159763913
2027	35.043989697098304	70.08797939419661
2028	17.68065098412655	35.3613019682531
2029	9.240654963715558	18.481309927431116
2030	4.990381724687222	9.980763449374445
2031	2.7784801820773115	5.556960364154623
2032	1.5915997672969535	3.183199534593907
2033	0.9362806275333474	1.872561255066695
2034	0.5646614753838518	1.1293229507677036
2035	0.34858427538768977	0.6971685507753795
2036	0.21996233810056198	0.4399246762011239
2037	0.14169114872274166	0.2833822974454833
2038	0.09306110116156945	0.1861222023231389
2039	0.06225033432640031	0.1245006686528006
2040	0.04236582895201786	0.08473165790403572
2041	0.029307239937905877	0.058614479875811754
2042	0.020588903897037724	0.04117780779407545
2043	0.014676781886958538	0.02935356377391708
2044	0.010607964756778991	0.021215929513557982
2045	0.007768252242448145	0.01553650448489629
2046	0.005759847512061292	0.011519695024122584
2047	0.004321354918693567	0.008642709837387134
2048	0.0032786279568629835	0.006557255913725967
2049	0.0025141145055951773	0.005028229011190355
2050	0.0019474693887874673	0.0038949387775749343

Figure 6.11 : Résultats tabulaire de la simulation pour le cas conventionnel aux Etats Unis

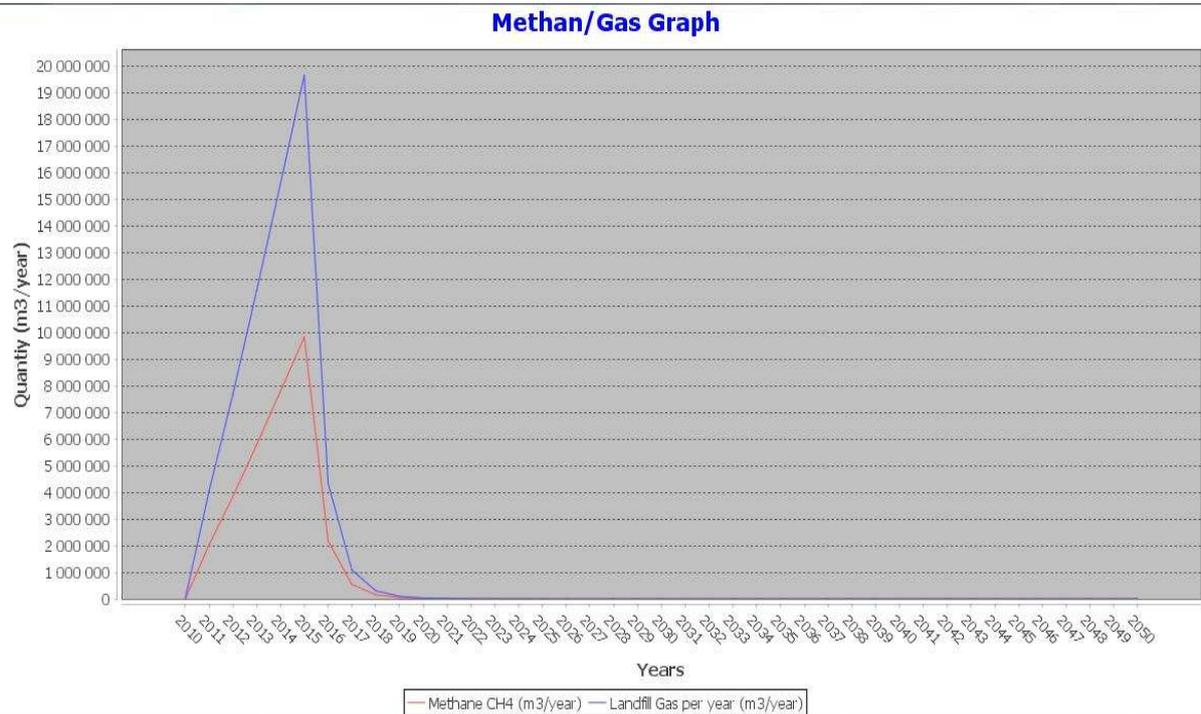


Figure 6.12 : Résultats graphique de la simulation pour le cas conventionnel aux Etats Unis

VI.B.3.1 Discussions des résultats :

En remarque une production croissante de biogaz jusqu'à 20 million m^3 et environ 10 million m^3 .

Cette quantité est petite par rapport à la première et à la deuxième simulation à cause des faibles valeurs de K et L_0 .

La figure (6.11) et la figure (6.12) montrent qu'après la fermeture de casier la quantité de biogaz diminue en fonction de la diminution exponentielle de la concentration de la matière organique grâce à une décomposition de la matière organique suivant l'équation (4.2).

VI. B.4. Quatrième simulation :

Les paramètres choisis dans la quatrième simulation sont des valeurs d'inventaire conventionnel en Etats Unis pour une zone aride [51] :

- ✓ Constance cinétique de réaction (K) : 0.02 an^{-1}
- ✓ Potentiel de production de méthane d'ordure : $100 \text{ (m}^3\text{/tonne)}$

Chapitre VI : Simulations et Discussions des Résultats

Year	Methane CH4 (m3/year)	Landfill Gas per year (m3/year)
2010	0.0	0.0
2011	1030384.8228097832	2060769.6456195666
2012	1999018.5432815605	3998037.086563121
2013	3072601.049595969	6145202.099191938
2014	4223823.805283669	8447647.610567339
2015	5432067.494840584	1.0864134989681168E7
2016	647643.3026228376	1295286.6052456752
2017	88208.56228507594	176417.12457015188
2018	13485.318204355232	26970.63640871046
2019	2282.487690923246	4564.975381846492
2020	423.0090509659857	846.0181019319713
2021	85.06415649580465	170.1283129916093
2022	18.421026987539488	36.842053975078976
2023	4.268452171819829	8.536904343639659
2024	1.052526341734536	2.105052683469072
2025	0.27487600282802716	0.5497520056560543
2026	0.07571408638337054	0.1514281727667411
2027	0.021915988648922115	0.04383197729784423
2028	0.006644721149744437	0.013289442299488873
2029	0.0021040730462024318	0.0042081460924048636
2030	6.940296258225206E-4	0.0013880592516450413
2031	2.3790450083631824E-4	4.758090016726365E-4
2032	8.456753685627733E-5	1.6913507371255464E-4
2033	3.111230928902652E-5	6.222461857805304E-5
2034	1.1825282402002193E-5	2.3650564804004387E-5
2035	4.635835648121899E-6	9.271671296243799E-6
2036	1.8716486441470515E-6	3.743297288294103E-6
2037	7.771283462635424E-7	1.5542566925270848E-6
2038	3.314134640329597E-7	6.628269280659194E-7
2039	1.4498838912549138E-7	2.8997677825098276E-7
2040	6.499718051851048E-8	1.2999436103702096E-7
2041	2.9826273211465146E-8	5.965254642293029E-8
2042	1.3996549357681731E-8	2.7993098715363462E-8
2043	6.710601539621383E-9	1.3421203079242765E-8
2044	3.284321982577753E-9	6.568643965155506E-9
2045	1.6395376019724165E-9	3.279075203944833E-9
2046	8.341733655732138E-10	1.6683467311464277E-9
2047	4.322521769231658E-10	8.645043538463316E-10
2048	2.2796486159420653E-10	4.5592972318841305E-10
2049	1.2228361186310627E-10	2.4456722372621254E-10
2050	6.667649276882377E-11	1.3335298553764754E-10

Figure 6.13 : Résultats tabulaire de la simulation pour des valeurs d'inventaire conventionnelles à l'Etats Unis pour une zone aride

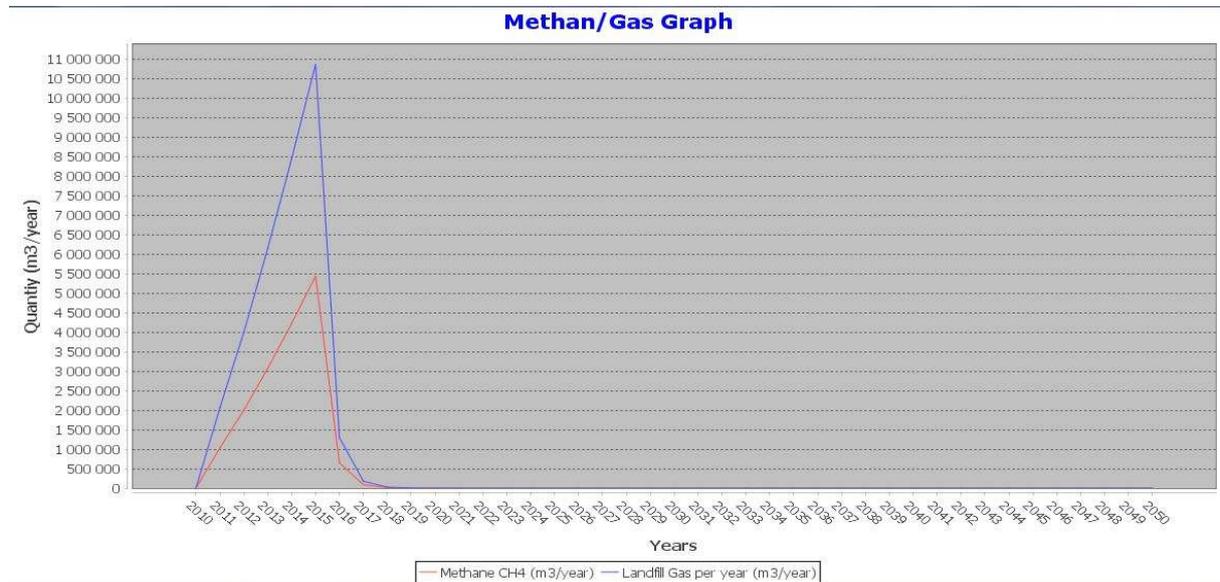


Figure 6.14 : Résultats graphique de la simulation pour des valeurs d'inventaire conventionnelles à l'Etats Unis pour une zone aride

VI.B.4.1 Discussions des résultats :

Suivant la figure (6.13) et la figure (6.14) on observe une production croissante de biogaz jusqu'à 11 million m^3 et environ 5,5 million m^3 (50% du méthane dans le biogaz), et cela grâce à des faibles valeurs de K et L_0 .

Après la fermeture de casier, la quantité de biogaz diminue rapidement en fonction de la diminution exponentielle de la concentration de la matière organique suivant l'équation (4.2).

VI.B.5. Cinquième simulation :

Les paramètres de cette simulation sont proposés par l'utilisateur en choisissant le bouton *User-Value* sur la barre des paramètres du model, les valeurs utilisées sont des valeurs supérieures aux valeurs utilisées dans les cas précédant:

- ✓ Constance cinétique de réaction (K) : 0.06 an^{-1}
- ✓ Potentiel de production de méthane d'ordure : $200 \text{ (m}^3\text{/tonne)}$

Chapitre VI : Simulations et Discussions des Résultats

Year	Methane CH4 (m3/year)	Landfill Gas per year (m3/year)
2010	0.0	0.0
2011	5939897.141421546	1.187979428284309E7
2012	1.1071960183997462E7	2.2143920367994923E7
2013	1.6350916093360005E7	3.270183218672001E7
2014	2.159583140539335E7	4.31916628107867E7
2015	2.6684404583030436E7	5.336880916606088E7
2016	8172303.496378604	1.6344606992757209E7
2017	2807374.5370168327	5614749.0740336655
2018	1063190.9498602275	2126381.899720455
2019	437938.13507835293	875876.2701567059
2020	194095.7218448148	388191.4436896296
2021	91747.90076616463	183495.80153232923
2022	45917.78467661546	91835.56935323094
2023	24182.540554293144	48365.08110858629
2024	13331.7675772643	26663.5351545286
2025	7659.229676145046	15318.459352290092
2026	4567.71985061967	9135.43970123934
2027	2818.0547691538886	5636.109538307776
2028	1793.2102348684718	3586.4204697369437
2029	1173.7900697196403	2347.5801394392806
2030	788.49660025973	1576.99320051946
2031	542.4262163397815	1084.852432679563
2032	381.40657346747207	762.8131469349441
2033	273.6520863957049	547.3041727914098
2034	200.03230016319367	400.0646003263873
2035	148.7586406974917	297.5172813949834
2036	112.40617442652034	224.81234885304067
2037	86.2021026836843	172.4042053673686
2038	67.01974148170595	134.0394829634119
2039	52.774114395797014	105.54822879159403
2040	42.05170419048869	84.10340838097738
2041	33.87918460708439	67.75836921416878
2042	27.576535977439033	55.15307195487807
2043	22.66209345874237	45.32418691748474
2044	18.79027945471918	37.58055890943836
2045	15.710135451310364	31.42027090262073
2046	13.237310462753504	26.474620925507008
2047	11.234917558164282	22.469835116328564
2048	9.60027910314427	19.20055820628854
2049	8.255618494006088	16.511236988012175
2050	7.141488399198069	14.28297679839614

Figure 6.15 : Résultats tabulaire de la cinquième simulation

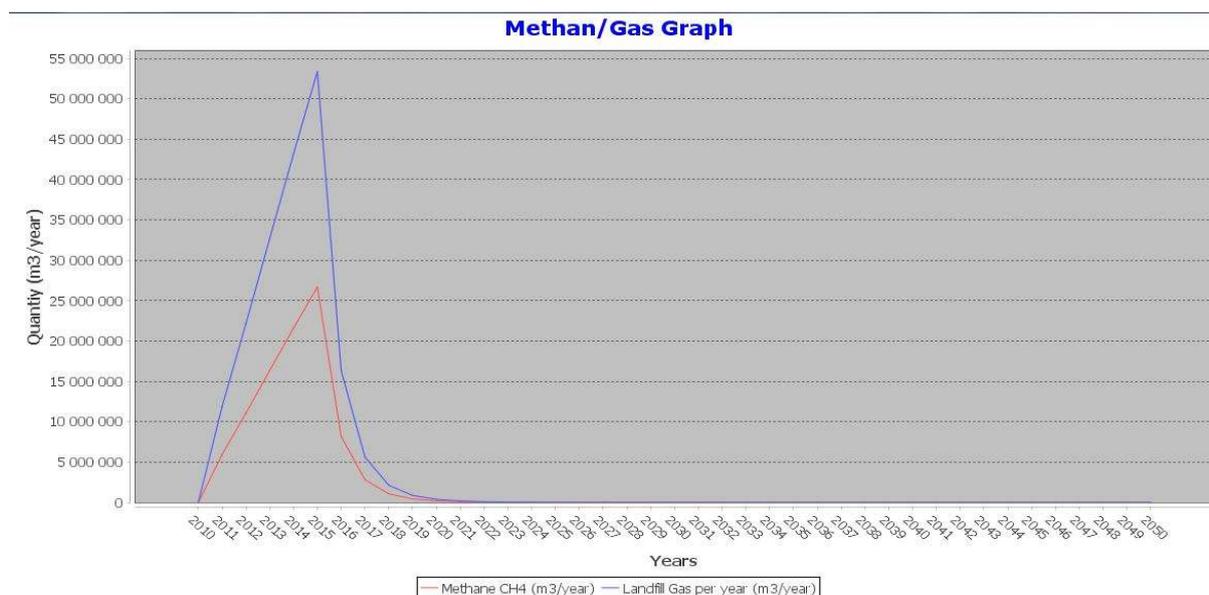


Figure 6.16 : Résultats graphique de la troisième simulation

Chapitre VI : Simulations et Discussions des Résultats

VI.B.5.1 Discussions des résultats:

On remarque une production croissante de biogaz jusqu'à 55 million m^3 et plus de 25 million m^3 de méthane.

Ces quantités sont les plus grandes par rapport les simulations précédentes suite à une augmentation des valeurs de K et L_0 .

La figure (6.15) et la figure (6.16) montrent qu'après la fermeture du casier, la quantité de biogaz diminue en fonction de la diminution exponentielle de la concentration de la matière organique suivant l'équation (4.2).

Conclusion

La série de simulation en utilisant le logiciel conçu lors de cette étude le BIOlandGAS, montre que le changement d'une zone humide à une zone aride influe sur:

- ✓ La production de biogaz des CET,
- ✓ Les valeurs de constance cinétique de réaction (K)
- ✓ Le Potentiel de production de méthane (L_0)

Tout cela joue un rôle principal sur le taux de production du méthane et du biogaz. L'utilisateur du logiciel est prié de choisir les bonnes valeurs de K et L_0 pour pouvoir obtenir des résultats proches à la génération réelle du biogaz enfouit au sein du casier du CET concerné.

Conclusion Générale

Conclusion Générale :

Ce travail sur l'estimation du potentiel énergétique d'un CET (Centre d'enfouissement Technique) est réalisé en collaboration avec laboratoire IPSIL (*Industrial Products & Systems Innovation Laboratory de l'Ecole Nationale Polytechnique d'ORAN ENPO*) pour la première fois en Algérie et cela dans le but de créer un outil numérique pour estimer la quantité de biogaz dans les CET en Algérie. Cela est la première étape dans le contexte de la valorisation énergétique du biogaz et la réduction des gaz à effet serre (GES).

Suite à la base des données présentées dans ce travail sur l'état critique des CET en Algérie, les risques et les enjeux de biogaz, la valorisation du biogaz actuellement est une priorité pour la simple raison que le pouvoir calorifique est très élevée de cette bioénergie.

Plusieurs modèles mathématiques existent d'ordre 'zéro' (0) et d'ordre 'un' (1). Le modèle choisi pour cette étude est le modèle cinétique d'ordre 'un' (1) (Hoeks, 1983). Celui-ci offre des résultats plus précis par rapport à ceux des modèles d'ordre zéro, et grâce à la disponibilité des entrants du modèle.

Après avoir modélisé mathématiquement notre phénomène physique étudié, un algorithme s'en est suivi et qui traduira toutes les étapes nécessaires de calculs pour aboutir aux résultats escomptés.

Un outil numérique est créé: c'est le logiciel BIOlandGAS. Il permet de simuler les calculs nécessaires à l'évaluation de quantité de biogaz présente dans n'importe quel CET et sous diverses conditions (climatologique, géographique, classe...etc).

Ce logiciel est conçu de façon modulaire.

Une étape de validation fut réalisée et cela en comparant nos résultats avec ceux obtenus via d'autres outils de calculs.

On constate que les résultats obtenus par simulation (BIOlandGAS) montrent l'influence de climat sur la production de biogaz. La production du biogaz dans une zone humide est supérieure à la production dans une zone sèche et cela à cause d'une décomposition rapide de la matière organique enfouie.

Conclusion Générale

Logiciel BIOlandGAS est le premier outil de prédiction de la production de biogaz en Algérie. Il est basé sur un modèle cinétique des réactions physico-chimiques et biochimiques traduit par des équations mathématiques.

En perspective, ce modèle peut être amélioré par l'injection d'autres modèles et de prendre en considération plus de paramètres comme le taux de compactage et la réinjection de lixiviat dans le casier pour avoir des résultats plus précis, aussi une amélioration de l'interface et lancer des nouvelles versions du logiciel.

Références Bibliographiques :

[1] : Intergovernmental panel on climate change (IPCC) (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York, Cambridge University Press, 1535 p.

[2] : <http://www.basel.int/Portals/4/Basel%20Convention/docs/text/BaselConventionText-f.pdf>(consulté le 27/03/2017)

[3] : Annuaire français de droit international, volume 38, 1992. pp. 871-884.

http://www.persee.fr/doc/afdi_0066-3085_1992_num_38_1_3099 (consulté le 30/03/2017)

[4] : <https://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/20021480/index.html> (consulté le 30/03/2017)

[5] :BARLAZ M.A., HAM R.K.& SCHAEFER D.M. (1990). Methane production fromMunicipal Refuse: A review of enhancement Techniques and Microbial Dynamics.

[6] : <http://www.vedura.fr/environnement/dechets/recyclage-dechets-menagers> (consulté le 02/04/2017)

[7] : <http://www.vedura.fr/legal/droit-reproduction-contenu> (à lire impérativement avant toute reproduction de contenu)

[8] : T. Ohkubo, Y. Hideshima, Y. Shudo. s.l. '' Valorisation catalytique du biogaz pour une énergie propre et renouvelable'' : International Journal of Hydrogen Energy, 2010, Vol. 35, p.13021. (2015, January)..

[9] : Nawfal M''Valorisation catalytique du biogaz pour une énergie propre et renouvelable'. Thèse, Université du Littoral Côte d'Opale, Janvier 2015

[10] : <http://www.gaz-mobilite.fr/actus/rapport-eba-biogaz-biomethane-europe-2015-1172.html> [archive] - Rapport EBA 2015 (consulté le 09/04/2017)

[11] : <http://www.vedura.fr/legal/droit-reproduction-contenu> (à lire impérativement avant toute reproduction de contenu)

Références bibliographiques

- [12] : <http://www.gaz-mobilite.fr/actus/rapport-eba-biogaz-biomethane-europe-2015-1172.html> [archive] - Rapport EBA 2015 (consulté le 13/04/2017)
- [13] : Émission « X: enius », magazine de connaissance d'Arte, mercredi 22 février 2012
- [14] : Biogaz agricoles et cogénération / CHP [archive], sur le site clarke-energy.com (consulté le 18/03/2017)
- [15] : www.euroobserv-er.org pour l'année 2013. Données en ktep (consulté le 21/03/2017)
- [16] : <http://www.le-gaz.fr/regions/23032017,le-geant-gazier-bp-se-developpe-aux-usa-sur-le-biogaz,636.html> (consulté le 19/04/2017)
- [17] : <http://www.i-sis.org.uk/BiogasChinafr.php> (consulté le 02/05/2017)
- [18] : ARTICLE PUBLIÉ LE 02/09/2015 À 06H00 par naser djemaa sur l'usinenouvelle.com
- [19] : La Presse de Tunisie, 10 juin 2010
- [20] : Kamalan, H., Sabour, M. and Shariatmadari, N. (2011). A Review on Available Landfill Gas Models. *Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 4, no 2, p. 79–92.
- [21] : Daniel A. Lagos H. "OPTIMISATION DU MODÈLE DE GÉNÉRATION DE MÉTHANE DU LIEU D'ENFOUISSEMENT DU COMPLEXE ENVIRONNEMENTAL DE SAINT-MICHEL" Essai présenté au Centre universitaire de formation en environnement et développement durable en vue de l'obtention du grade de maître en environnement (M. Env.)
- [22] : United States. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) (2005a). Guidance for evaluating landfill gas emissions from closed or abandoned facilities. U.S. Environmental Protection Agency, 85 p.
- [23] : Scharff, H. and Jacobs, J. (2005a). Applying guidance for methane emission estimation for landfills. *Waste Management*, vol. 26 (2006), p. 417–429.
- [24] : Amini, H.R., Reinhart, D.R. and Niskanen, A. (2013). Comparison of first-order-decay modeled and actual field measured municipal solid waste landfill methane data. *Waste Management*, vol. 33, no 12, p. 2720–2728.

Références bibliographiques

- [25] : <http://www2.ulg.ac.be/cwbi/projets/atlas/principes/incidence.htm> (consulté le 26/04/2017)
- [26] : <http://www.archiexpo.fr/prod/ipg/product-65340-430468.html> (consulté le 08/04/2017)
- [27] : <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://viennefrancepoubelle.free.fr/Nuisances%2520et%2520Risques%2520objectifs.htm> (consulté le 22/03/2017)
- [28] : http://www.ineris.fr/centredoc/Rapport_Biogaz_web.pdf
- [29] : http://www.xebecinc.com/fr/pdf/biogaz_oct081.pdf
- [30] : <http://viennefrancepoubelle.free.fr/Nuisances%20et%20Risques%20objectifs.htm> (consulté le 15/04/2017)
- [31] : <http://nosdechets.blogspot.com/2009/01/nuisances-et-risques-dun-centre.html> (consulté le 16/03/2017)
- [32] : http://www.dictionnaire-environnement.com/decharge_sauvage_ID1086.html (consulté le 11/03/2017)
- [33] : <http://www.institut-numerique.org/11-gestion-de-dechets-menagers-dans-les-pays-en-developpement-521483aa7ad69> (consulté le 24/03/2017)
- [34] : <http://www.amenhyd.com/index.php/revue-de-presse?start=6> (consulté le 06/05/2017)
- [35] : extwprlegs1.fao.org/docs/texts/alg43228.doc (consulté le 08/05/2017)
- [36] : Ademe (2006). Les déchets en chiffres. Direction Déchets et Sols, Département des Observatoires, des Coûts et de la Planification des Déchets.
- [37]: Mason, I. (2006). Mathematical modelling of the composting process : A review. Waste Management, 26(1) :3–21.
- [38] :Pr A. AOUABED.’’ Caractérisation des déchets ménagers et assimilés de la ville de Blida’’ UNIVERSITE DE SAAD DAHLEB DE BLIDA 1, FACULTE DE TECHNOLOGIE DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCEDES
- [39] : U.M.J. Boin et al., « Melting Standardized Aluminum Scrap: A Mass Balance Model for Europe », JOM, 2005 (lire en ligne [archive])

Références bibliographiques

[40] : <http://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/pedagogiques/870/870-compactage-des-dechets-de-structure-et-technologiques-traitement-des-effluents-liquides-actifs.pdf> (consulté le 04/04/2017)

[41] : http://www.persee.fr/doc/spgeo_0046-2497_1999_num_28_1_1216 (consulté le 10/05/2017)

[42] : BOUREGAA Houcine – USDB : Thèse La production de gaz de synthèse par gazéification de biomasse [soutenu 09/10/2014].

[43] : Radia AISSAOUI – CREDEG : Revue semestrielle éditée par le Centre de Recherche et de Développement de l'Electricité et du Gaz "CREDEG" Société du Groupe Sonelgaz [N° 7 décembre 2015].

[44] : ch. Couturier – solagro : techniques de production d'électricité à partir de biogaz et de gaz de synthèse [RECORD 07-0226/1A] février 2009.

[45] : Alain DAMIEN – DUNOD : Livre LA BIOMASSE ENERGIE [ISBN 978-2-10-050668-2] Avril 2008.

[46] : <http://www.engie.com/activites/gaz/nos-energies-gaz/biogaz/quest-ce-que-le-biomethane> (consulté le 26/04/2017)

[47] : MERAZ R.L., VIDALES A-M. & DOMINGUEZ A. (2004). A fractal like Kinetics to calculate landfill methane production. Fuel. 83 : 73-80.

[48] : Intergovernmental panel on climate change (IPCC) (2006a). 2006 GIEC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 5 Waste, p. 3.17. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html> (Page consultée le 4 février 2014).

[49] : Kamalan, H., Sabour, M. and Shariatmadari, N. (2011). A Review on Available Landfill Gas Models. Journal of Environmental Science and Technology, vol. 4, no 2, p. 79–92.

[50] : Intergovernmental panel on climate change (IPCC) (2006b). 2006 GIEC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 5 Waste, Chapter 3, IPCC Waste Model (MS Excel). In Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National

Références bibliographies

Greenhouse Gas Inventories. Site GIEC. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html> (Page consultée le 4 février 2014).

[51]: Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide '' United States Environmental Protection Agency '' EPA-600/R-05/047 May 2005

[52]: Richard Goering, "Matlab edges closer to electronic design automation world [archive]," EE Times, 10/04/2004

[53] : <http://www.epa.gov/ttn/catc/dir1/landgem-v302.xls> (consulté le 12/05/2017)

[54] : <https://www.epa.gov/lmop/landfill-gas-energy> (consulté le 13/05/2017)