REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE EL-HADJ LAKHDAR - BATNA -

MEMOIRE

Présenté à
LA FACULTE DES SCIENCES - DEPARTEMENT DE PHYSIQUE
Pour obtenir le diplôme de
MAGISTERE EN PHYSIQUE
Option : Physique Energétique

par

LOUAI Nabila

THEME

Evaluation Energétique des déchets solides en Algérie, une solution climatique et un nouveau vecteur énergétique

Soutenue devant le jury :

Dr. A. SOUDANI	Pr. Univ. Batna	Président
Dr. B. ADOUANE	M.C.B. Univ. Batna	Rapporteur
Dr. A. MOUMMI	M.C. Univ. Biskra	Examinateur
Dr. S. BOUGOUL	Pr. Univ. Batna	Examinateur

ANNEE UNIVERSITAIRE 2008 - 2009

Remerciements

Avant toute chose, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donnée courage, patience et force durant toutes ces années d'étude.

Que serait une thèse sans un directeur de thèse, je tiens donc à remercier chaleureusement mon encadreur Monsieur *Belkacem ADOUANE*. Un grand merci pour tout : ta patience, ta confiance, ta générosité et tous tes conseils qui m'ont permis de prendre les bonnes directions.

Je tiens ensuite à exprimer ma gratitude aux membres du jury :
Monsieur SOUDANI Azeddine, d'avoir accepté de présider le jury de thèse.
Monsieur BOUGOUL Saadi et *Monsieur MOUMMI Abd Elhafid*, qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce travail.

Mes remerciements vont aussi à la direction de l'environnement de la Wilaya de Batna pour son soutien et plus particulièrement à Monsieur *Djamel HACHANI* pour ses conseils et pour la confiance qu'il m'a accordée.

Les remerciements ne seraient rien sans une mention particulière à l'ensemble de mes professeurs et mes collègues à l'Université de L'hadj lakhder et je ne peux pas oublier mes amis de toujours, avec lesquels j'ai partagée des bons moments.
Je tiens aussi et surtout à remercier mon collègue *Djamel HADDAD*, pour son aide précieuse durant le dèroulement de ce travail.

Bien sûr, j'ai une pensée pour ma famille...
Pour finir tout ceci n'aurait pas été possible sans l'amour et le soutien de ma famille. Mon père, Ma mère, mes chers frères et soeurs, merci de tout coeur pour les petites ou grandes choses que vous avez faîtes pour moi.

Enfin, j'adresse une pensée amicale à toutes les personnes qui je n'ai pas citées et qui ont de près ou de loin participer à la réalisation de ce travail.

Table des matières

1 Introduction **1**

2 Sources d'énergie **5**

2.1 Introduction 5

2.2 Energies fossiles 6

2.2.1 Le charbon 6

2.2.2 Le pétrole 6

2.2.3 Le gaz naturel 7

2.2.4 L'énergie nucléaire 7

2.3 Energies renouvelables 8

2.3.1 L'énergie solaire 9

2.3.2 L'énergie éolienne 11

2.3.3 L'énergie hydroélectrique 12

2.3.4 L'énergie des vagues 14

2.3.5 L'énergie géothermique 15

2.3.6 La biomasse 17

3 Déchets solides **21**

3.1 Introduction 21

3.2 Définition du terme "déchet" 21

3.3 Déchets solides 22

3.4 Différentes catégories de déchets solides 22

3.4.1 Déchets solides municipaux 23

3.4.2 Déchets industriels 23

3.4.3 Déchets solides hospitaliers 25

3.4.4 Déchets ultimes 26

3.5 Effets liées aux déchets solides 27

4 Traitement des déchets solides **31**
4.1 Introduction . . . 31
4.2 Gestion des déchets solides . . . 31
4.3 Points à considérer pour la gestion des déchets solides . . . 32
4.3.1 Population de la collectivité . . . 32
4.3.2 Caractérisation des déchets solides . . . 32
4.3.3 Volume des déchets solides . . . 32
4.3.4 Collecte des déchets solides . . . 33
4.3.5 Tri des déchets solides . . . 33
4.4 Schéma directeur de gestion des déchets solides . . . 34
4.4.1 Traitement des déchets . . . 34
4.4.2 Valorisation des déchets . . . 35
4.4.3 Elimination des déchets . . . 35
4.5 Techniques de gestion des déchets solides . . . 36
4.5.1 Les trois "R" à suivre pour la gestion des déchets solides . . . 36
4.5.2 Le compostage . . . 39
4.5.3 La digestion anaérobique . . . 45
4.5.4 L'incinération . . . 48
4.5.5 La décharge contrôlée . . . 52
4.6 Comparison des techniques . . . 56

5 Les déchets solides en Algérie **59**
5.1 Présentation de l'Algérie . . . 59
5.1.1 Situation de l'Algérie . . . 59
5.2 Energie renouvelable en Algérie . . . 60
5.2.1 L'énergie solaire en Algérie . . . 61
5.2.2 L'énergie éolienne en Algérie . . . 62
5.2.3 L'énergie géothermique en Algérie . . . 62
5.2.4 L'énergie hydraulique en Algérie . . . 63
5.2.5 L'énergie de la biomasse en Algérie . . . 63
5.3 Déchets solides en Algérie . . . 64
5.3.1 Introduction . . . 64
5.3.2 Evaluation des déchets en Algérie . . . 64
5.3.3 Différents types de déchets solides en Algérie . . . 64
5.3.4 Problèmes de déchets solides en Algérie . . . 68
5.3.5 Gestion des déchets solides en Algérie . . . 70
5.4 Gestion de déchets solides de la ville de Batna . . . 72
5.4.1 Etude monographique de la ville de Batna . . . 72
5.4.2 Analyse quantitative et qualitative des déchets générés au niveau de la ville de Batna . . . 72
5.4.3 Situation de collecte, transport et de traitement des déchets générés par les activités humaines . . . 76

5.4.4 Etude du site pressenti a recevoir la décharge contrôlée de la ville de Batna 78

6 Application à la combustion du biogaz 83
6.1 Introduction 83
6.2 Réaction de combustion 83
6.3 Présentation du programme de calcul 88
6.4 Validation 92
6.5 Combustion du biogaz 93

7 Conclusions et perspectives 117

Bibliography 119

A Description du procédé de compostage 123

B Canstantes thermochimiques 127

C Programme de calcul 131

Table des figures

2.1 Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde en 2002 5
2.2 Production mondiale de l'électricité basée sur les énergies renouvelables . 9
2.3 Maison couverte des panneaux solaires photovoltaïques sur tout le toit . . 10
2.4 Une éolienne 11
2.5 Barrage hydroélectrique 13
2.6 Exemple d'une centrale hydraulique 13
2.7 Energie des vagues 14
2.8 Modes d'exploitation des ressources géothermiques 16
2.9 Brûler du bois pour produire de la chaleur 17

3.1 Décharge sauvage 27
3.2 Des enfants jouent sur un terrain où les déchets ne sont pas ramassés . . 28
3.3 Production de lixiviats 29
3.4 Remaniement des déchets par le vent 29
3.5 Remaniement des déchets par les animaux 29
3.6 Pollution par les fumées d'incendie et émission de mauvaises odeurs . . . 30

4.1 Les étapes de la gestion des déchets solides 36
4.2 Des matières prêtes pour le recyclage 38
4.3 Les matières organiques de compostage 40
4.4 Principe de compostage 40
4.5 La fermentation des déchets 41
4.6 Le compost 42
4.7 Compostage des déchets de jardin en récipient aéré 43
4.8 Poubelle à compost commerciale avec une porte 44
4.9 Les étapes de la dégradation des déchets 46
4.10 Le digesteur 46
4.11 Rejets de l'incinération 49
4.12 Principe d'incinération 50

4.13 Les centres de stockage 52
4.14 Décharge contrôlée 53
4.15 Exploitation d'une décharge contrôlée 53
4.16 Système d'étanchéité de surface 54
4.17 Etanchéité minérale du fond et drainage des eaux 55
4.18 Système de traitement des gaz de décharge -biogaz- 56
4.19 La gestion des déchets solides 57

5.1 L'Algérie 59
5.2 Installation de chauffage solaire collectif 1500 litres du CDER à Bouzareah, Alger 61
5.3 Système hybride pour le pompage de l'eau - Bou-Ismail - Tipaza . . . 62
5.4 Chauffage des serres par énergie géothermique - W. Touggourt . . . 63
5.5 Décharge à ciel ouvert en Algérie 68
5.6 Décharge de Ouled Fayet 70
5.7 Localisation de la wilaya de Batna 72
5.8 Centre d'enfouissement technique de Batna 79

6.1 Organigramme du programme principal 89
6.2 Organigramme de la subroutine calculant les constantes d'équilibres . 90
6.3 Organigramme de la subroutine d'enthalpie 91
6.4 Variation de H_2 en fonction de la température (TAF) 95
6.5 Variation de H_2O en fonction de la température (TAF) 95
6.6 Variation de CO_2 en fonction de la température (TAF) 96
6.7 Variation de N_2 en fonction de la température (TAF) 96
6.8 Variation de O en fonction de la température (TAF) 97
6.9 Variation de O_2 en fonction de la température (TAF) 97
6.10 Variation de O_3 en fonction de la température (TAF) 98
6.11 Variation de H en fonction de la température (TAF) 98
6.12 Variation de OH en fonction de la température (TAF) 99
6.13 Variation de CO en fonction de la température (TAF) 99
6.14 Variation de C en fonction de la température (TAF) 100
6.15 Variation de CH_4 en fonction de la température (TAF) 100
6.16 Variation de N en fonction de la température (TAF) 101
6.17 Variation de NO en fonction de la température (TAF) 101
6.18 Variation de NO_2 en fonction de la température (TAF) 102
6.19 Variation de NH_3 en fonction de la température (TAF) 102
6.20 Variation de HNO_3 en fonction de la température (TAF) 103
6.21 Variation de HCN en fonction de la température (TAF) 103
6.22 Variation de H_2 en fonction de λ 104
6.23 Variation de H_2O en fonction de λ 105
6.24 Variation de CO_2 en fonction de λ 105
6.25 Variation de N_2 en fonction de λ 106

6.26 Variation de O en fonction de λ 106
6.27 Variation de O_2 en fonction de λ 107
6.28 Variation de O_3 en fonction de λ 107
6.29 Variation de H en fonction de λ 108
6.30 Variation de OH en fonction de λ 108
6.31 Variation de CO en fonction de λ 109
6.32 Variation de C en fonction de λ 109
6.33 Variation de CH_4 en fonction de λ 110
6.34 Variation de N en fonction de λ 110
6.35 Variation de NO en fonction de λ 111
6.36 Variation de NO_2 en fonction de λ 111
6.37 Variation de NH_3 en fonction de λ 112
6.38 Variation de HNO_3 en fonction de λ 112
6.39 Variation de HCN en fonction de λ 113
6.40 Variation de l'enthalpie en fonction de la température adiabatique (TAF) 114
6.41 Variation dd l'enthalpie en fonction de λ 114

A.1 Récipient à compost 123
A.2 Matières de compostage 124
A.3 Résidus alimentaires et de jardinage 124
A.4 La phase psychrophile de la fermentation 125
A.5 La phase mésophile de la fermentation 125
A.6 La phase thermophile de la fermentation 125
A.7 La maturation du compost frais 126
A.8 Produit fini 126
A.9 Le composte prêt à être utilisé comme des engrais organiques 126

Liste des tableaux

5.1 Potentiel solaire en Algérie 61
5.2 Production des déchets ménagers 65
5.3 Quantité de déchet produite par secteur en Algérie 65
5.4 Quantités des déchets spéciaux dispersés en Algérie 67
5.5 Quantité de déchet produite par secteur en Algérie 68
5.6 Les types des déchets produits pour la ville de Batna 73
5.7 Quantité des déchets produite par la population de la ville de Batna . 74
5.8 Quantités des déchets pouvant être revalorisées de la ville de Batna . 78

6.1 Validation des résultats 93

B.1 Coefficients de la constante d'équilibre 127
B.2 Valeurs des constantes d'enthalpie 128
B.3 Suite des valeurs des constantes d'enthalpie 129

Chapitre 1

Introduction

Le concept de "développement durable" se résume en trois "E" : Environnement, Energie et Economie. Il a apparu avec les problèmes de changements climatiques et l'épuisement des ressources énergétiques. Il faut pour cela trouver un juste équilibre entre prospérité économique, besoin énergétique et protection de l'environnement pour assurer un développement durable.

L'énergie est le moteur de l'économie mondiale et elle permet à de nombreuses populations de jouir de très hauts niveaux de confort, de productivité et de mobilité. D'une manière ou d'une autre, nous avons tous besoin quotidiennement de l'énergie, que ce soit pour cuisiner, pour éclairer, pour chauffer ou climatiser.

L'énergie mondiale, provenant des ressources fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) utilisées actuellement sont épuisables et donc non renouvelables et leur utilisation sera plus coûteuse, de plus en est la première source d'émission des gaz à effet de serre, à savoir le CO_2, CH_4,... contribuants au réchauffement du globe terrestre.
Afin de résoudre ce problème d'émission, un nombre de pays sont engagés dans la production d'électricité d'origine nucléaire. Mais cette source d'énergie pose de nombreux problèmes, entre autres, les centrales nucléaires produisent chaque année des tonnes de déchets radioactifs qui resteront très fortement radioactifs pendant des dizaines de milliers d'années.
Cette situation fait apparaître combien il est urgent de trouver de nouvelles sources énergétiques alternatives, propres et inépuisables. Ces énergies ne sont autres que les énergies renouvelables. Elles consistent à utiliser directement les éléments naturels renouvelable (Soleil, vent, eau, courants marins, croissance végétale, déchets, résidus agricoles...). Ces sources d'énergies renouvelables sont un moyen pour contribuer efficacement au développement durable. A partir de ces énergies renouvelables, il est possible de produire de la chaleur ou de l'électricité avec un minimum de pollution. On cites parmi ces énergies : Energie photonique ; Energie mécanique (éoliennes, hydrauliques et marémotrices) ; Energies thermiques et l'Energies de combustion.

Les réalisations algériennes dans le domaine de l'énergie renouvelable sont très limitées en comparaison avec l'actuelle évolution du parc énergie renouvelable mondial. Trois raisons principales plaident en faveur d'un développement de ces énergies dans notre pays :

- Elles constituent une solution économiquement viable pour fournir des services énergétiques aux populations rurales isolées notamment dans les régions du grand sud ;
- Elles permettent un développement durable du fait de leur caractère inépuisable, et de leur impact limité sur l'environnement et contribuent à la préservation de nos ressources fossiles ;
- La valorisation de ces ressources énergétiques ne peut qu'avoir des retombées positives en matière d'équilibre régional et de création d'emplois.

Si l'on voit bien, la consommation d'énergie dans les pays en voie de développement est assurée par la biomasse et plus précisément par les déchets solides (les déchets domestiques, déchets de l'agriculture, des industries agro-alimentaires, déchets ménagers et eaux usées,...). La valorisation énergétique de ces déchets solides se place au 2^{e}rang pour la production de chaleur ou d'électricité à partir des énergies renouvelables [1].

La technologie la plus habituelle pour transformer les déchets en énergie est la combustion dans des unités d'incinération. La chaleur de combustion, si elle est récupérée, produit de la vapeur qui peut être valorisée sous forme de chaleur seule, d'électricité seule, ou de chaleur et d'électricité produites en co-génération.
Le traitement thermique des déchets par l'incinération est une source d'énergie qui ne peut aujourd'hui être négligée. Il représente aussi le principal moyen d'élimination des déchets urbains solides mais cette filière peut éliminer jusqu' 90% des déchets en volume. C'est pourquoi, il a toujours existé et il existera un moyen universellement connu "la mise en décharge " pour éliminer le reste de déchets. Anciennement appelé décharge puis centre d'enfouissement technique, le terme le plus usité actuellement est Centre de Stockage de Déchets (CSD).

La mise en décharge de déchets est équipée pour récupérer le biogaz. Ce biogaz, peut être utilisé comme une source d'énergie renouvelable pour le chauffage, la production électrique ou la cogénération et il peut être aussi utilisé comme un carburant pour véhicules.

L'avantage de la conversion énergétique des déchets, par rapport aux autres sources énergétiques renouvelables, d'après l'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), réside dans le fait qu'en plus de la production d'énergie, elle participe activement au traitement des déchets solides contribuant ainsi à l'assainissement de l'environnement par la réduction de la dépendance aux énergies fossiles d'une part et d'autre part elle permet de diminuer l'impact sur le réchauffement climatique par le méthane à fort effet de serre (13 à 21 fois plus élevé que celui du CO_2).

L'Algérie comme tout pays, est marquée par un accroissement des flux de déchets conjugués à une poussée démographique. Dans ce contexte, plusieurs décharges sauvages sont apparues sur le territoire algérien. Ceci génère des impacts négatifs directs sur l'environnement par la création des polluants et constitue des risques majeurs pour la santé de l'humanité.
Les gouvernements et industries Algériens sont constamment à la recherche de solutions technologiques adoptées pour traiter les déchets solides. Ces différentes solutions doivent protéger le personnel, la communauté, minimiser les impacts négatifs sur l'environnement et permettant un traitement efficace et moins coûteux des déchets.
De ce fait l'Algérie a élaboré une stratégie d'action qui s'articule autour de plusieurs axes, entre autres, la conversion énergétique de déchets.
La Division BioEnergie et Environnement est une nouvelle structure de recherche du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER). Sa création, répond aux principales missions du centre à savoir : la recherche et le développement dans le domaine des énergies renouvelables. En effet, à part les sources renouvelables déjà connues et explorées au niveau des divisions, la biomasse constitue un très important gisement pouvant être valoriser pour la production bioénergétique. Cette production favorise particulièrement l'approche environnementale de la division à travers le traitement et la valorisation énergétique des déchets solides afin de soutenir la mise en place d'un développement durable respectueux de la protection de l'environnement et en plus de conserver des sources d'énergie non renouvelables par l'utilisation des déchets pour produire de l'énergie.

Dans cette étude nous développons une méthodologie d'analyse et de quantification du gisement énergétique à base des déchets solides.

Plan du travail

Le travail exposé dans cette étude est organisé comme suit :

Le premier chapitre présente une introduction générale de ce travail.

Dans le deuxième chapitre on explique les différentes sources d'énergie. Ce chapitre est divisé en deux parties :
- La première présente les sources d'énergie fossiles et leurs impacts ;
- La deuxième partie explique les différents types des énergies renouvelables.

Le chapitre 3 est consacré à l'étude des déchets solides :
- Définitions ;
- Diffèrents types ;
- Les impacts de ces déchets sur l'environnement d'une part et sur la santé humaine d'autre part.

Au cours du chapitre 4, l'étude est consacrée à la description des techniques nécessaires au traitement des déchets solides.

Le cinquième chapitre concerne :
- Une présentation de l'Algérie ;
- Le développement des énergies renouvelables dans notre pays ;
- Une étude des déchets solides en Algérie ;
- La dernière partie s'intéresse à la gestion des déchets solides de la ville de Batna.

Le chapitre 6 est consacré à quantifier le gisement énergétique lié aux déchets solides par la combustion de biogaz.

Enfin, ce mémoire sera achevé par des conclusions et des perspectives sur les travaux de recherche.

Chapitre 2

Sources d'énergie

2.1 Introduction

L'énergie est à la base de toute activité et de toute vie sur la terre. Sa consommation au cours du siècle dernier a considérablement augmenté et les besoins mondiaux en énergie vont doubler dans quelques années [2].

Une grande partie de l'énergie consommée en 2002 dans le monde, près de 90% provient des gisements de combustibles fossiles : pétrole 34 %, gaz 21 %, charbon 24%, nucléaire 7 % et l'énergie renouvelable 14 % [3].
La figure 2.1 montre la répartition en termes d'énergie primaire dans le monde pour toutes les ressources actuelles.

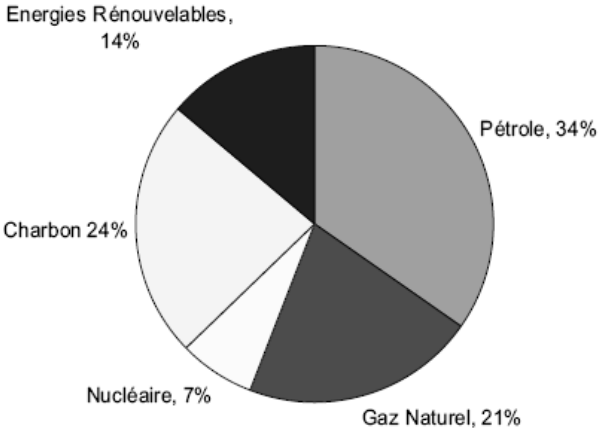

FIG. 2.1 – Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde en 2002

Les sources d'énergie sont l'ensemble de toutes les matières premières ou des phénomènes naturels utilisés pour la production de l'énergie, ces sources ne sont pas toujours disponibles et réalisables dans toutes les circonstances de temps et de lieu.

On peut catégoriser les différentes sources de la manière suivante :

2.2 Energies fossiles

Les combustibles fossiles sont des substances naturelles qui se sont formées à la suite d'un processus de fossilisation des tissus d'anciens organismes vivants végétaux ou animaux.

L'énergie fossile obtenue à partir de la combustion des matières fossiles est actuellement la source d'énergie la plus utilisée sur la terre pour tout usages ; les transports, le chauffage et la climatisation, etc. Aujourd'hui plus de 86% de l'énergie produite est obtenue à partir des ces matières comme le pétrole, le charbon ou le gaz naturel [4].

2.2.1 Le charbon

Le charbon est obtenu par la fossilisation d'arbres qui avaient été submergés dans des régions marécageuses.C'est le plus abondant des combustibles fossiles. Ses réserves sont géographiquement bien réparties dans le monde et pourraient encore durer 400 ans [2], [5].
Le charbon est le plus polluant des combustibles fossiles et qui provoque des émissions importantes de CO_2 et de SO_2.En plus de ses effets nocifs sur l'environnement, la combustion du charbon a de nombreuses retombées irréversibles sur notre santé.
La production d'électricité est devenue aujourd'hui l'utilisation principale du charbon et, au niveau mondial, devrait continuer de croître de 1 à 2% par an, suivant les pays et scénarios de croissance envisagés [5].

2.2.2 Le pétrole

Le pétrole est un mélange d'hydrocarbures formés par les dépôts des plantes microscopiques et des micro-organismes marins morts dans des bassins sédimentaires sous la mer ou à proximité.
C'est aujourd'hui la ressource la plus utilisée et la plus commode d'emploi, outre son utilisation pour la production d'énergie. Actuellement sur 26,8 milliards de barils de pétrole consommés chaque année, la moitié l'est pour le secteur des transports publics et industriels ainsi que pour le secteur de la chimie [6].
Mais, ce qui est beaucoup plus grave, depuis les années 80, les quantités annuelles découvertes sont inférieures à la consommation, qui, elle, ne cesse d'augmenter. D'aprés les géologues pétroliers, l'augmentation programmée de la production de pétrole sera inférieure de plus de la moitié à la demande mondiale projetée pour l'année 2010 par l'A.I.E. (Agence Internationale de l'Energie) et les réserves mondiales sont aujourd'hui estimées suffisantes pour une durée de 45 ans [2].

2.2.3 Le gaz naturel

Le gaz naturel, est un mélange composé essentiellement de méthane avec des traces d'autres hydrocarbures gazeux. Il est considéré comme le combustible fossile dont la combustion est la plus propre, moins polluant et génère moins de gaz à effet de serre par rapport à celle du pétrole ou du charbon. Il est utilisé pour le chauffage et la cuisson et utiliser pour la génération d'énergie électrique. Son utilisation est actuellement en forte croissance. Ces réserves mondiales devraient pouvoir nous alimenter pendant encore 65 ans [7].

Les ressources fossiles sont encore suffisantes, mais ils posent aussi de nombreux problèmes :

- Leurs stocks sont en quantités limitées et la consommation de ces énergies ne cesse de croître. Pour autant, les réserves d'énergies fossiles sont encore importantes ; 40 ans pour le pétrole, 60 ans pour le gaz et 400 ans pour le charbon [2], [5].
- Les combustibles fossiles contribuent massivement au réchauffement progressif de la terre par le phénomène de l'effet de serre à cause du CO_2.
- En outre, le composant principal du gaz naturel est le "méthane", un gaz à effet de serre très puissant, il peut piéger la chaleur sur la planète 21 fois plus efficacement que le dioxyde de carbone et qui entraîne un changement climatique .
- Les énergies fossiles sont parmi les plus polluantes, car elles polluent non seulement l'atmosphère par les dégagements des gaz du genre CO, CO_2 et SO_2 qui sont pour la plupart responsables de l'effet de serre, mais également les plans d'eau et détruisent les forêts à travers le phénomène des pluies acides. Sur une longue période, l'effet du phénomène sur les forêts et les lacs peut être significatif, car en accentuant l'acidification des sols, des lacs et des rivières et tuant les poissons.

2.2.4 L'énergie nucléaire

L'énergie nucléaire est l'énergie liant les constituants du noyau d'un atome des matières nucléaires. L'éclatement (fission nucléaire) de certains atomes lourds comme l'uranium ou le plutonium en atomes plus petits libère de la chaleur. Dans les centrales nucléaires, cette chaleur est utilisée pour produire de l'électricité par le chauffage de l'eau et la convertit en vapeur pressurisée qui entraîne une turbine, laquelle génère de l'électricité. C'est la source d'énergie la plus concentrée utilisable actuellement.

La production mondiale d'électricité nucléaire est relativement stationnaire depuis plusieures années. En 2004, 439 réacteurs destinés à la production commerciale

d'électricité étaient en service dans le monde. En France, l'énergie nucléaire produit 400 milliards de kWh d'électricité par an. L'Europe produise 46 % de l'énergie nucléaire mondiale, l'Amérique du Nord 33,6 %. L'énergie nucléaire fournit 8 % de l'énergie consommée aux Etats-Unis. En Asie, l'énergie nucléaire est utilisée principalement au Japon 14 % de l'énergie consommée [6], [4].

L'énergie nucléaire produite dans des centrales nucléaires modernes ne produit pas de gaz à effet de serre mais elle présente néanmoins des inconvénients et des risques. Parmi les risques présentés par la génération d'électricité par le nucléaire :

- Les risques de contamination radioactive liés au traitement du combustible usagé. Pour une tonne d'uranium utilisable dans le nucléaire, on obtient environ 500 tonnes de déchets faiblement radioactifs ;
- les déchets nucléaires résultant constituent un produit radioactif nocif pour l'environnement. Jusqu'à maintenant, la question de ces déchets qui restent radioactifs pendant une très longue période n'est toujours pas résolue, de même que celle de ces centrales elles-mêmes qui restent une source permanente de radioactivité lorsqu'elles sont hors d'usage ;
- Les risques liés aux accidents nucléaires sont mineurs (fuites radioactives) dans les centrales.

En conclusion étant donné que les sources d'énergie existantes comportent de tels risques de dangerosité et que leurs réserves sont limitées, ces principales constatations ont conduit à un accroissement des recherches vers d'autre énergies.

2.3 Energies renouvelables

Comment produire les quantités d'énergie nécessaires pour satisfaire la consommation mondiale sans épuiser les ressources fossiles et sans détériorer de façon irréversible l'environnement de la planète ?

Actuellement, il y a principalement deux façons possibles d'agir. La première est la maitrise de la consommation d'énergie tout en augmentant l'efficacité de sa production.

Soleil, vent, eau, croissance végétale, ..., ces ressources sont capables de générer de l'énergie grâce aux technologies développées par les hommes. Alors l'énergie renouvelable c'est toutes énergies qui proviennent d'une source naturelle renouvelable. Les énergies renouvelables sont aussi appelées énergies vertes puisque l'impact de ses sources d'énergie sur l'environnement et sur la santé humaine est négligeable. Ces énergies renouvelables portent de ce fait l'espoir de ceux qui sont attachés à la protection de l'environnement et souhaitent exploiter de façon durable les ressources de

la planète.
Les énergies renouvelables peuvent permettre de produire soit de la chaleur seule, eau chaude pour le chauffage ou la production d'eau chaude sanitaire (géothermie, bois énergie, solaire), soit de l'électricité seule (éolien, solaire photovoltaïque, hydroélectricité, ...).

Pour autant, ces énergies de l'avenir ne couvrent encore que 20% de la consommation mondiale. D'après certains spécialistes, en 2000, le potentiel annuel d'énergies renouvelable était de 3365 Mtep pour le monde entier, dont près de 1650 Mtep provenant du bois, 880 Mtep de l'énergie hydraulique, 505 Mtep des déchets industriels, 200 Mtep en énergie solaire et 60 Mtep en énergie éolienne [3].
Toutes les ressources renouvelables sont en forte croissance, la figure 2-2 donne un apperçue sur la répartition de la production d'électricité entre les différentes sources renouvelables ainsi que leurs prévisions pour les années à venir [3].

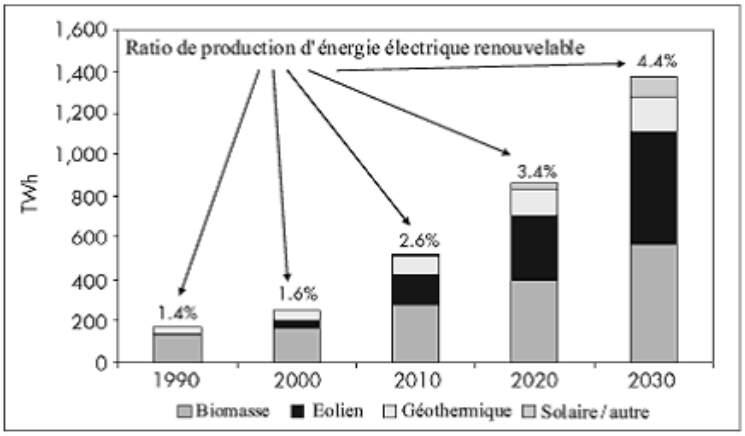

FIG. 2.2 – Production mondiale de l'électricité basée sur les énergies renouvelables

On va présenter ci-dessous les différents types d'énergies renouvelables : solaire, éolienne, hydraulique, marémotrice, géothermie et biomasse avec ses avantages et ses inconvénients et son utilisation à travers le monde.

2.3.1 L'énergie solaire

L'énergie produite par le soleil se propage dans l'espace sous la forme de photons ; elle est sans cesse renouvelée. Elle peut être utilisée soit pour produire de l'électricité, par l'intermédiaire de systèmes photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium et ont la capacité de transformer les photons en électrons, l'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. Soit pour produire de la chaleur ou de l'eau chaude par l'intermédiaire de systèmes solaires thermiques. L'énergie des photons émis par le soleil est le chauffage direct des capteurs thermiques cèdent leur énergie à des absorbeurs qui à leur tour réchauffent le fluide circulant dans

l'installation de chauffage.

FIG. 2.3 – Maison couverte des panneaux solaires photovoltaïques sur tout le toit

Cette technique permet de chauffer la maison et de produire de l'électricité pour l'habitation.

Avantages et inconvénients

Par comparaison avec les énergies classiques, l'énergie solaire possède des avantages :

- L'énergie émanant du soleil est pratiquement gratuite ;
- Le soleil fournit une alimentation quasi illimitée en énergies solaires ;
- L'utilisation de l'énergie solaire supplante l'énergie classique, cela permet de diminuer de façon significative les émissions des gaz à effet de serre.

Et on cite les inconvénients suivants :

- Coût élevé d'installation pour le chauffage ;
- Coût élevé des cellules photovoltaïques ;
- L'énergie solaire ne fonctionnant qu'en présence de soleil, le jour, voir son utilisation limitée la nuit alors que la demande y est importante ;
- L'impossibilité de transporter l'énergie ainsi captée à grande distance. Cette source est donc à utilisation locale.

Production mondiale de L'énergie photovoltaïque solaire

La technologie énergétique, affichant la croissance la plus rapide au monde, est l'énergie solaire photovoltaïque, laquelle a augmenté sa capacité actuelle de 60% par an entre 2000 et 2004 pour couvrir plus de 400 000 toits au Japon et aux Etats-Unis [6].

L'Allemagne est le leader européen en matière d'énergie photovoltaïque, en 2002, elle était dotée d'une capacité installée totale de 278 MW, dont 92% étaient raccordés au réseau. Elle est suivie de l'Italie, de l'Espagne, de la France et de l'Autriche [6].

Production mondiale de L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire est largement exploitée pour chauffer des bâtiments, de même que les panneaux solaires qui servent à fournir de l'eau chaude dans l'Europe. Une croissance de 22,8%, le marché solaire thermique de l'Union Européenne a passé la barre des 2 millions de m^2, soit une puissance d'environ 1 450 MW.
La France a en effet augmenté de plus de 100 000 m^2 son marché de capteurs solaires entre 2004 et 2005 et devrait encore doubler ce chiffre en 2006.
Quant à l'Espagne, la plupart des bâtiments neufs ou réhabilités (habitat individuel et collectif) couvrent entre 30 et 70% de leur besoin en eau chaude à partir des systèmes solaires thermiques [6], [2].

2.3.2 L'énergie éolienne

C'est une énergie cinétique du vent, utilisée après conversion en énergie mécanique ou électrique. Cette énergie résulte de la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice montée sur un arbre rotatif, lui-même relié a des systèmes mécaniques qui servent à un aérogénérateur ou une turbine éolienne qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

FIG. 2.4 – Une éolienne

Avantages et inconvénients

L'énergie éolienne possède plusieurs avantages comme :

- C'est une énergie propre, elle ne crée pas des gaz a effet de serre ;
- Elle ne nécessite pas des grands espaces ;
- Une source renouvelable, le principal atout des énergies éoliennes est d'être renouvelable et ne demande aucun carburant ;

– Pas de risque de pénurie, de rupture de stock.

Et elle possède aussi des inconvénients :

– Des effets sur le paysage ;
– Le bruit, premièrement il y a le bruit produit par le passage de l'air dans l'hélice et deuxièmement, il y a le bruit produit par la rotation des élments mécaniques ;
– La sécurité, les pales d'une hélice tournant entre 35 et 45 tours/minute, peuvent facilement être perçues comme une structure dangereuse. En fait, il y a peu de chance d'avoir des dégâts ou des morts suite à une cassure ou une fragmentation de l'hélice ;
– Danger pour les oiseaux, les sites d'éoliennes peuvent avoir deux effets sur les oiseaux sont la collision directe et la réduction de leur habitat ;
– Dépendance du vent, les installations reliées à un grand réseau électrique sont relayées pendant les périodes sans vent par les autres sources d'énergie.

Energie éolienne dans le monde

Au niveau mondial, le taux de croissance annuel moyen de la puissance éolienne est de 28,4% ; les plus grandes capacités installées se trouvent aujourd'hui en Allemagne, en Espagne, au Danemark et aux Etats-Unis [6]. L'Union Européenne a quant à elle installé 6 165,7 MW en 2005. De son côté, la France a connu une excellente année avec 373,7 MW installés en 2005, soit 10 fois plus qu'en 2001. La France accède ainsi à la 9^{e} place au niveau européen et compte 120 parcs éoliens [6].

2.3.3 L'énergie hydroélectrique

Hydroélectricité, électricité produite par l'énergie hydraulique.

Le principe de lénergie hydraulique ressemble à celui de l'éolienne. Simplement, ce n'est plus le vent mais l'énergie mécanique de l'eau qui entraîne la roue d'une turbine qui à son tour entraîne un alternateur. Ce dernier transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.
L'énergie hydraulique permet de fabriquer de l'électricité dans les centrales hydroélectriques, la puissance disponible dépend de deux facteurs : la hauteur de la chute d'eau et le débit de l'eau.

Une centrale hydraulique est composée de 3 parties :

– Le barrage qui retient l'eau ;
– La centrale qui produit l'électricité ;
– Les lignes électriques qui évacuent et transportent l'énergie électrique.

FIG. 2.5 – Barrage hydroélectrique

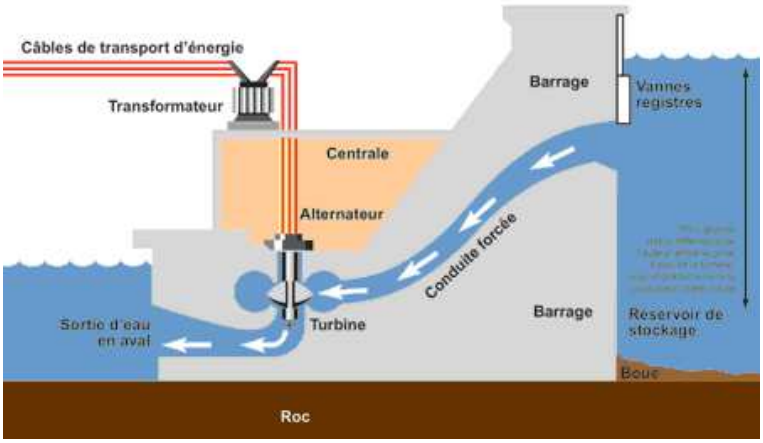

FIG. 2.6 – Exemple d'une centrale hydraulique

Dans une centrale hydroélectrique, l'eau tombe par une chute appelée une conduite forcée et passe sur les pales de la turbine. L'eau fait tourner les pales, qui sont reliées aux aimants par l'arbre du générateur. Les pales tournantes font tourner les aimants, créant l'électricité dans les bobines de fils.

Avantages et inconvénients

L'énergie hydraulique possède plusieurs avantages comme :

- L'énergie hydraulique est une source d'énergie renouvelable ;
- Les centrales hydrauliques ont des durées de vie de deux à dix fois que c'elle des charbon ;
- L'absence de problèmes liés au rejet de gaz à effet de serre.

Cependant, l'énergie hydraulique possède quelques inconvénients :

- Les projets à grande échelle peuvent menacer les débits des rivières ;

- Les usines prenant beaucoup d'espace ;
- Etant donné que l'énergie mécanique est très difficilement transportable, elle n'est utilisable directement que ponctuellement.

Production mondiale de l'énergie hydraulique

Les barrages sur les rivières ont une capacité importante pour les pays riches en cours d'eau qui bénéficient ainsi d'une source d'énergie propre. Cette source représentait en 1998 environ 20% de la production mondiale de l'énergie électrique [2].

L'énergie hydraulique est la principale source d'énergie électrique pour un grand nombre de pays tels que la Norvège 99 % de son énergie électrique, Congo 97 % et le Brésil et Etats Unis étaient les premiers producteurs d'énergie hydroélectrique dans le monde. Au Canada, 62 % de l'énergie électrique est de source hydroélectrique [8]. Parmi les plus grandes installations, on peut également citer le barrage de Grand Coulée aux Etats-Unis, qui fournit environ 7 000 MW. En Europe, en 1999, on comptait environ 10000 MW de puissance hydraulique installée [3], [8].

2.3.4 L'énergie des vagues

Le mot vague, veut dire déplacement à la surface des océans d'ondes périodiques générées par le vent.

L'énergie des vagues est encore une fois une forme particulière de l'énergie solaire. Le soleil chauffe inégalement les différentes couches atmosphériques ce qui entraîne des vents eux mêmes responsables par frottement des mouvements qui animent la surface de la mer (courants, houle, vagues). Les vagues créées par le vent à la surface des mers et des océans transportent de l'énergie. Lorsqu'elles arrivent sur un obstacle elles cèdent une partie de cette énergie qui peut être transformée en courant électrique. Cette forme d'énergie est produite en utilisant la force des marées qui actionne une turbine produisant de l'électricité.

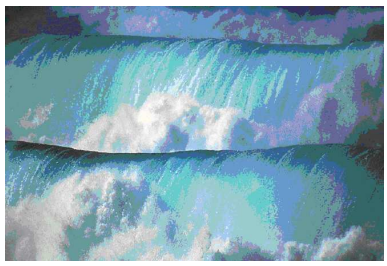

FIG. 2.7 – Energie des vagues

Avantages et inconvénients

On cite les avantages suivants :

- Une source renouvelable et gratuite ;
- L'énergie des vagues est plus utile et mieux adaptée pour l'alimentation en électricité des îles éloignées ;
- L'absence de problèmes liés au rejet de gaz à effet de serre ;
- Elles ne génèrent pratiquement pas de pollution.

Et on cite aussi les inconvénients :

- Variation de la production en fonction de l'amplitude des marées qui correspond peu à la demande d'énergie d'où nécessitée d'un réseau électrique traditionnel pour compenser ;
- Des conséquences sur l'environnement ;
- Les coûts de construction sont élevés et les risques de détérioration du matériel à cause du sel sont trop importants.

Energie de la marée dans le monde

La production de l'électricité à partir des vagues et des marées est aujourd'hui une option environ deux fois par jour lors des marées montantes et descendantes, l'eau s'écoule dans les estuaires et sur les cotés. Cette eau peut actionner des turbines, afin de produire l'électricité.
La maîtrise de l'Energie des marées a été réalisée, en particulier en France au cours des années 50 avec l'Usine marémotrice de la Rance (Saint-Malo) encore en exploitation [4].

2.3.5 L'énergie géothermique

L'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol est appelée géothermie. Le principe consiste à extraire l'énergie contenue dans le sol par l'eau qui circule à travers un échangeur de chaleur, puis elle est utilisée pour le chauffage domestique ou industriel ou bien peut également être utilisée de manière indirecte pour générer de l'électricité.

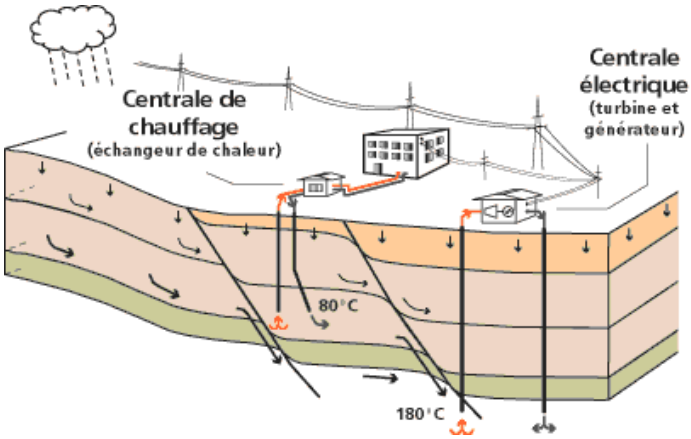

FIG. 2.8 – Modes d'exploitation des ressources géothermiques

Avantages et inconvénients

La géothermie présente les avantages suivants :

- Energie locale et essentiellement renouvelable ;
- Ne pas dépendre des conditions atmosphériques ;
- Pas de déchets et ni d'émission de gaz à effet de serre ;
- Gratuites ou peu chères, accessibles à tous et partout.

Et elle possède aussi des inconvénients :

- Risque éventuel de dégagement d'impuretés toxiques dans l'atmosphère ;
- Doit être utilisé près de son site de production ;
- Risque de glissement de terrain.

Production mondiale de la géothermique

L'énergie Géothermique couvre la moitié des besoins énergétiques de l'Islande, l'Australie et d'autres pays. En 1995 la puissance installée dans le monde était de l'ordre de 7000 MW, il s'agit de production de l'électricité. En 2004 ce chiffre est passé à près de 8500 MW [2].
Les Etats-Unis sont les premiers producteurs d'énergie géothermique, avec 2817 MW en 1995, suivis par les Philippines 1190 MW, le Mexique 753 MW, l'Italie 630 MW, le Japon 414 MW et l'Indonésie. Fin 2004, la puissance électrique installée dans les pays de l'Union Européenne était de 822,1 MW et la puissance thermique à 6 589,8 MW [6].
La plus grande centrale électrique construite au début des années 1990, et utilisant

l'énergie géothermique, se trouve aux Etats-Unis, dans le nord-est de la Californie. Cette centrale avait une capacité de production d'environ 1400 MW, assez pour satisfaire la plus grande partie de la demande en électricité [3].

2.3.6 La biomasse

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre et l'énergie de la biomasse désigne l'énergie pouvant être extraite directement, ou indirectement, de ces matériaux biologiques.
On peut distinguer trois sources de biomasse. La première ressource utilisée est le bois, dont la valorisation énergétique représente actuellement les trois-quarts de la production primaire de la forêt. Les déchets sont la deuxième source de bio-énergie, ces déchets regroupent des déchets ménagers, urbains et industriels, ainsi que les déjections animales. La troisième filière en quantité d'énergie produite concerne les carburants liquides, à partir de cultures dédiées (substrats : amidon, huile, sucre de betteraves) [9], [10].
Globalement, on peut utiliser la biomasse de trois façons différentes : en la brûlant, en la faisant pourrir ou en la transformant chimiquement pour produire la chaleur, l'électricité et les combustibles liquides pour le transport .

FIG. 2.9 – Brûler du bois pour produire de la chaleur

Avantages et inconvénients

Contrairement à d'autres ressources énergétiques, utiliser des éléments de la biomasse procure des avantages :

- Il est possible d'utiliser la biomasse indéfiniment comme source d'énergie parce que la matière végétale se renouvelle continuellement ;
- Un plus grand nombre d'emplois peut être crée parce qu'une main d'ouvre plus importante est nécessaire pour manipuler les combustibles issus de biomasse ;

- L'utilisation de la biomasse offre des avantages significatifs à d'autres industries locales, par exemple, l'élimination des arbres morts, malade ou de mauvaise qualité des forets ;
- On se débarrasse des déchets, qui représentent un risque potentiel pour l'environnement.

Et on cite aussi parmi les inconvénients :

- Beaucoup de déperdition de chaleur par combustion ;
- Méthode d'extraction d'énergie complexe et coûteuse ;
- Emission de particules très fines et des métaux lourds, etc.

La biomasse dans le monde

La production de biomasse solide (bois, déchets de bois, paille, résidus de récolte, déchets végétaux et animaux) a connu à nouveau une augmentation significative de 5,6 % entre 2004 et 2005 pour atteindre 58,7 Mtep produits dans le monde, en Europe 51 % de la part de l'énergie renouvelable qui appartient à ce mode de production d'énergie [10].

Au Brésil, la canne à sucre est transformée en bioéthanol (carburant pour les véhicules). Le maïs est également utilisé à cet effet aux Etats-Unis. En Chine, du biogaz surtout du méthane est obtenu à partir de la fermentation du fumier. En France, dans certaines fermes, les rafles (parties centrales) du maïs est brûlé pour assurer le séchage des grains, ce qui permet une économie de fioul [10].

Dans notre travail nous étudierons l'une des énergies renouvelables et spécialement l'énergie de la biomasse solide (biomasse - déchets).

Energie tirée par les déchets solides

Toute activité humaine produit des déchets, qui sont en rapide croissance avec l'expansion démographique mondiale et la modification des modes de vie. Les déchets solides (DS) sont jetés dans une décharge qui est le moyen le plus simple d'élimination des déchets. La première chose qu'on remarque en passant devant cette décharge est sans doute l'odeur et les contaminants qui constituent des risques majeurs pour la santé de l'humanité et l'environnement. Pourtant, un trésor se cache sous ces tas de fumier et d'ordures pourrissantes "une source d'énergie renouvelable".

Au delà, ou le monde manquera de sources d'énergie fossile ou son utilisation sera plus coûteuse. Nous pensons donc à valoriser les déchets solides, c'est une solution. Gérer ses déchets est une garantie et une assurance sur l'avenir.
Alors le déchet doit être regardé non seulement comme nuisance, mais aussi comme une ressource et la filière des déchets doit être considérée comme une activité économique. Les déchets solides restent une des principales sources d'énergie renouvelables dans beaucoup de pays développés. En France, la très grande majorité des cogénération fonctionne au gaz naturel, mais quelques unités utilisent un approvisionnement à partir de ressources renouvelables (incinération de déchets ménagers ou industriels, biogaz de décharges, biogaz de méthanisation) [11].

La décomposition, sous l'effet des bactéries, certains déchets solides tels que, les déchets organiques de cultures, agricoles, des eaux usées, des déchets animaux et des ordures ménagères, produisent des engrais et un gaz, celui-ci, qu'il soit "fatal" lorsqu'il est produit par une décharge ou "choisi" lorsqu'il est produit par un méthaniseur. Le captage de ce gaz permet d'obtenir une source d'énergie renouvelable, cette forme d'énergie s'appelle le biogaz.
Toutefois, quand on capte et purifie le biogaz d'une bonne manière, il substitut au gaz naturel, soit dans des chaudières servant à produire de l'eau chaude et de la vapeur ou il peut ensuite être directement vendu au réseau de distribution du gaz naturel pour, par exemple, alimenter des véhicules fonctionnant au GNV (Gaz Naturel Véhicule).

Le traitement thermique par la combustion permet de transformer aussi les déchets solides en énergie. La combustion des déchets fournit de la vapeur. Celle-ci pourra actionner une turbine pour la production du maximum possible d'électricité ou bien, par un échangeur, donner sa chaleur à un réseau de chaleur ou à un industriel. Elle pourra également être employée en cogénération, c'est à dire produire de l'électricité et de la chaleur [12].

Bien que l'utilisation de déchets solides comme une source d'énergie présente plusieurs intérêts :

– Production de chaleur pour le chauffage urbain, industries, ect. ;

- Limitation de l'accumulation des déchets et les problèmes d'odeur et de détruire les contaminants ;
- L'utilisation de l'énergie provenant des biogaz permet de conserver des sources d'énergie non renouvelable du combustible fossile ;
- L'utilisation de déchets solides comme source d'énergie diminue l'impact sur le réchauffement climatique en transformant le méthane à fort effet de serre en CO_2 à effet de serre moindre et sur une centaine d'années, la quantité de CO_2 produite ne dépasse pas celle qui est absorbée dans le même temps par les plantes et les océans ;
- On peut envisager que les déchets d'élevage et certains résidus agricoles frais puissent contribuer au processus de l'électrification rurale décentralisée et par conséquent à l'amélioration des conditions de vie dans ces localités.

Toutefois, il convient de mentionner que l'utilisation des déchets solides comme énergie renouvelable présente aussi des risques et des inconvénients. Suivant des procédés divers (production de gaz par méthanisation, incinération, etc.) en demeurant conscient qu'ils peuvent générer des G.E.S. et qu'il faut traiter les risques de pollution atmosphérique, en particulier pour l'incinération (dioxines).

Chapitre 3

Déchets solides

3.1 Introduction

Les activités humaines génèrent des déchets solides, liquides et gazeux qui perturbent les milieux naturels, eaux, atmosphère et sols. Ces déchets prennent une grande importance au cours de ces dernières années, spécialement pour les déchets solides qui restent les principales sources d'énergies renouvelables et plusieurs projets porteront sur la récupération de l'énergie provenant des ces déchets dans beaucoup de pays développés.

Les difficultés commencent avec les définitions des déchets, à quel moment un objet devient-il un déchet et à quel moment cesse-t-il de l'être ?

3.2 Définition du terme "déchet"

On définit le déchet comme un produit ou n'importe quel résidu issu du métabolisme ou d'une activité humaine : domestiques, industrielles et agricoles, quand il ne peut plus être utilisé à d'autres fins par celui qui l'a fabriqué. L'ensemble de ces résidus se présentent sous forme solide, voire liquide quand ils sont contenus dans des récipients réputés étanches.
Au sens du Code de l'Environnement -Article 1 de la loi française du 15 juillet 1997-, un déchet est défini comme " Tout résidu d'un processus de production, de transformation, ou d'utilisation, toute substance, matériau produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon et qui sont de nature à produire des effets nocifs sur le sol, la flore et la faune, à dégrader les sites ou les paysages, à polluer l'air ou les eaux, à engendrer des bruits ou des odeurs, et d'une façon générale, à porter atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement" [13], [14].

3.3 Déchets solides

Les déchets solides sont surtout des déchets domestiques. En plus des déchets domestiques, on trouve aussi les déchets provenant d'activités industrielles, déchets de commerces, de l'artisanat, déchets de bureaux, des marchés, des casernes, des hospitaux, des écoles, des hôtels, les résidus de jardinage ou agricoles, de l'établissement, détritus, ordures ménagères, des carcasses de véhicules automobiles, des déchets biomédicaux, des fumiers, des boues et des matières dangereuses, gravats, plâtras et autres rebuts solides. Alors les déchets solides peuvent être classifiés dans différents types selon leurs source.

3.4 Différentes catégories de déchets solides

L'humanité est placée dans une situation historiquement nouvelle. L'expansion démographique mondiale et la modification des modes de vie ont provoqué une augmentation considérable de résidus de toutes sortes si bien que les rapports de l'homme à la nature soient modifiés. Les déchets solides sont générés de façon continue en quantité croissante avec le développement des modes de vie des sociétés. Ils sont hétérogènes et leur composition quantitative varie beaucoup en fonction de l'espace (d'une société à l'autre, d'un pays à l'autre, d'une ville à l'autre, etc.) et du temps (jours de la semaine, jours atypiques, fêtes et autres), saisons (humide et sèche, etc.). En effet, les facteurs géographiques, climatiques, économiques, culturels et démographiques sont déterminants dans la quantité et la composition des déchets générés.

Alors la classification des déchets n'est pas chose facile et universelle. Ils peuvent être classés de différentes manières selon les objectifs recherchés et selon l'intrêt des informations qui peuvent en être tirées. Leur classification s'avère souvent très pratique et parfois indispensable pour faciliter l'abord d'une question complexe relative à la gestion des déchets et notamment quand il s'agit d'optimiser le choix de leur mode de gestion que ça soit à la source ou sur le circuit de leur production. Par exemple, les auteurs d'une étude sur le compostage et l'utilisation du compost ont classé les déchets solides en matière organique, matière inorganique, matière recyclable et autres [13], [15].

Les Techniques de l'ingénieur fait une classification très détaillée des déchets comme suit :

- Des déchets d'origine biologique ;
- Des déchets d'origine chimique ;
- Des déchets technologiques tels que chutes, copeaux, solvants usés, emballage, etc. ;
- Des déchets écologiques ;
- Des déchets accidentelles.

Une autre classification semble être aussi simple que la précédente. Elle est utilisée dans plusieurs études sur la gestion des déchets solides. Elle différencie les déchets solides selon leur nature et leurs lieu de production : les déchets produits par les ménages ou ordures ménagères, déchets d'hôpital et les déchets spéciaux (industriels, commerciaux) ou en fonction de leur nature (dangereux, non dangereux, inertes, etc.).

3.4.1 Déchets solides municipaux

Les déchets solides municipaux ou domestiques appelés aussi des déchets solides communautaires sont l'ensemble des déchets produits par les activités urbaines et rurales ; ils n'incluent pas les déchets industriels, ni les déchets médicaux ni les déchets dangereux. Ils comprennent :

- Les déchets ménagers habituels comme les déchets de restauration qui correspondent aux déchets habituels d'une cuisine, d'un libre- service de restauration rapide ou de magasin, les déchets d'emballage (cartons, cageots, boîte de conserve,...), déchets d'épluchures et de préparations alimentaires, repas non servis et denrées non consommées, vaisselle cassée, objets à usage unique (serviettes, plats,...) ;
- Les déchets verts de l'agriculture et de l'élevage (paille, feuilles mortes, crottins, fumiers, ...) ;
- Les déchets de l'assainissement collectif notamment les boues engendrées par les stations d'épuration des eaux usées domestiques, des foires et des manifestations publics, déchets provenant du nettoyage des voiries, les barils de pétrole vides ;
- Des déchets volumineux et produits de façon moins quotidienne, ces déchets peuvent être domestiques, industriels ou commerciaux comme les déchets encombrants inertes urbains (literies, commodes et penderies, tables,), les gros appareils électroménagers comme les vielles cuisinières, les vieux réfrigérateurs,),les déchets de l'automobile comme les carcasses et les pneus,..., divers équipements, etc.

3.4.2 Déchets industriels

Les déchets d'origine industrielle sont quantifiés par secteur industriel comme suit : sidérurgie, industrie agroalimentaire, extraction et façonnage de produits de carrière, industrie du ciment, industrie du verre, industrie du céramique ; industrie du textile, tapis et habillement ; métallurgie et travail de l'acier ; industrie chimique de base, industrie pharmaceutique, industrie du caoutchouc et autre secteurs.
Alors ils sont de nature très variée et peuvent être subdivisés en trois classes, cette classification a été effectuée en fonction de l'impact des déchets sur l'environnement.

Les déchets inertes

Les déchets inertes sont des solides minéraux qui ne subissent aucune transformation physique, chimique ou biologique importante lors de leur mise en décharge et qui ne sont pas contaminés par des substances dangereuses ou autres éléments générateurs de nuisances, susceptibles de nuire à la santé et à l'environnement.
Alors les déchets inertes sont des résidus de constructions et destructions qu'ils proviennent des chantiers du bâtiment et des travaux publics, mais aussi des mines et des carrières comme : pavés, sables, gravats, tuiles, béton, ciment, carrelage, etc.

Les déchets non dangereux ou industriels déchets banals (DIB)

Les déchets non dangereux (DND*) étaient anciennement appelés déchets industriels banals, ils sont des déchets qui regroupent les déchets non inertes et non dangereux et qui ne présentent aucune des caractéristiques relatives à la dangerosité (toxique, explosif, corrosif,). Les déchets non dangereux sont aussi appelés déchets assimilés aux déchets ménagers qui sont les déchets produits par les ménages, les commerçants, les artisans, et même les entreprises, industries et activités de service quand ils ne présentent pas de caractère dangereux ou polluant. Il s'agit notamment des déchets d'emballages non souillés (papiers, cartons, matières plastiques, bois, textiles, ...), des produits et équipements arrivés en fin de vie (matériel électrique et électronique, équipements automobiles, ...), des loupés et chutes de fabrication (plastiques, matières organiques, ...), des déchets de restauration, des déchets de bureaux, des résidus de nettoyage, d'entretien, Les déchets issus de métaux ferreux et non ferreux (ferraille), les déchets issus du verre, Les déchets associant plusieurs matériaux de natures différentes.
Ces ordures sont produites principalement des complexes résidentiels et commerciaux et elles sont souvent déposées dans des endroits différents conus spécialement. Cependant, avec l'urbanisation et le changement du style de vie et les habitudes de nourriture, la quantité de ces déchets solides avait augmenté rapidement et sans changer de composition.

Les déchets industriels dangereux ou spéciaux (DIS)

Les déchets sont considérés comme dangereux s'ils présentent une ou plusieurs des propriétés dangereuse comme, risques d'incendie ou d'explosion, comburant, inflammable, irritant, nocif, toxique, corrosif, infectieux, toxique pour la reproduction, toxicité chimique ou biologique, radioactivité, etc.
Les déchets dangereux (DD*) étaient anciennement appelés déchets spéciaux industriels parce que 90% de ces déchets sont produits par les pays industrialisés. Il s'agit pour la plupart de déchets générés par les industriels pour la fabrication de produits ou de composés chimiques. Alors ils sont des déchets qui sont spécifiques de l'activité qui les génère, ils contiennent des éléments nocifs ou dangereux pour différentes raisons et ils sont constitués de l'ensemble des déchets chimiques présentant un fort pouvoir

de pollution toxique et grande partie de substances polluantes potentiellement très toxiques, cette toxicité impose un mode de stockage en décharges spécialisées. Ils ne doivent surtout pas être jetés avec les ordures ménagères classiques, ni versés dans les égouts, ces produits nécessitent un traitement particulier.
Les déchets toxiques sont des déchets dangereux produits par les ménages, les commerçants (garages, coiffeurs, laboratoires photo, imprimeries, laboratoires de recherche). Il peut s'agir de déchets solides banals souillés (chiffons, cartons,...), résidus de peinture. Les déchets issus de carburants mélanges, les déchets issus des solvants usés, les déchets issus des aérosols et matériels souillés, les déchets issus de filtres à huile, les déchets issus de solides imprégnés, les déchets issus d'emballages de lubrifiants souillent, les batteries, les piles qui sont également des déchets très toxiques.

3.4.3 Déchets solides hospitaliers

Les déchets d'hôpitaux ou déchets biomédicaux sont tous les autres déchets produits au niveau des unités des services de soins et du plateau technique, et le terme déchet du secteur sanitaire désigne l'ensemble des déchets produits par les établissements de soins de santé. Les producteurs regroupent non seulement les hôpitaux, mais aussi les cliniques, les cabinets médicaux et dentaires, les établissements pour handicapés et pour les personnes âgées, etc.
Le déchet d'hôpital est produit pendant le diagnostic, le traitement, ou l'immunisation des êtres humains ou des animaux ou dans des activités de recherches dans ces domaines ou dans la production ou l'essai des biologiques. Elle peut inclure des pertes comme les dièses, la perte salie, les matériaux jetables, les produits chimiques, objets tranchants, seringues jetables, de tiges, de bandages, d'excréta humains, éléments radioactifs, les petits membres amputés, petits déchets anatomiques, issus des blocs opératoires, les tissus et cultures issus des laboratoires de bactériologie, virologie et parasitologie comme pipettes, boîtes de pétri, flacons de culture, lames et matériels à usage unique en verre ou en plastique, cadavres d'animaux, aiguilles et seringues montées, etc...

Ces déchets sont fortement infectieux et peuvent être une menace sérieuse à la santé humaine si non contrôlé et distingue la façon, en raison de leurs nuisances visuelles, de leur impact psychologique et de leur risque potentiel.

Les déchets d'activité de soins peuvent être classés, selon la gestion de traitement qu'ils requièrent, comme suit :

Déchets assimilés à des déchets ménagers

Ce type de déchets provient généralement des chambres des malades hospitalisés, des services de consultations externes, de l'administration de l'hôpital, des services de nettoyage, des cuisines, des magasins et des ateliers. Ils requièrent une attention spéciale à l'intérieur de l'hôpital seulement et en revanche à l'extérieur des

établissements de soins médicaux, ils peuvent être manipulés de la même façon que les déchets urbains ordinaires. Les matières qui s'y prêtent doivent être recyclées ou réutilisées pour des raisons de protection de l'environnement

Déchets infectieux

Ce groupe comprend tout déchet provenant des services d'isolation où sont installés les patients à maladies infectieuses-contagieuses (Choléra, Typhus, diphtérie, Tuberculose). Ces déchets englobent aussi des articles jetables tels que les aiguilles et les objets coupants souillés de sang ou de sécrétions humaines, qui sont issus des différents services médicaux. Elle inclue également les déchets des laboratoires d'analyses microbiologiques ainsi que les déchets d'animaux utilisés en laboratoires pour les expériences sur les maladies infectieuses.

Déchets anatomiques

Ce groupe comprend les parties de corps humains issues des salles d'opération, des salles d'accouchement, des morgues, des autopsies. Ce type de déchets requiert un traitement spécial, non pas dans un but de prévenir des infections mais pour des raisons d'éthique ou pour l'exploitation de leur potentiel pharmaceutique.

Les données disponibles concernant la production spécifique des déchets du secteur sanitaire des hôpitaux et les établissements de soins varient de manière importante en fonction du type d'établissement. Il serait donc souhaitable de définir la production spécifique en fonction des paramètres suivants :

- Nombre de lits disponibles et taux d'occupation par les patients ;
- Nombre d'employés à l'hôpital et d'étudiants dans les hôpitaux universitaires produit une quantité importante de déchets restaurant du personnel indépendamment des activités de soins et d'entretien ;
- Les quantités importantes de déchets générés par d'autres producteurs (laboratoires de recherche, salle de soins ambulatoires et cabinet de consultation) ;
- Les déchets provenant des services d'entretien, des travaux de transformation et les appareils jetés parce qu'ils sont obsolètes ou hors d'usage.

3.4.4 Déchets ultimes

Le déchet ultime est un déchet résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux. Les installations d'élimination des déchets par stockage ne sont plus autorisées à accueillir que des déchets ultimes.

Le caractère ultime d'un déchet n'est pas fonction des caractéristiques physico-chimiques du déchet mais s'apprécie en fonction du système global de collecte et de traitement. Cette notion est locale et doit normalement être précisée dans le cadre des plans départementaux d'élimination des déchets ménagers et assimilés.

3.5 Effets liées aux déchets solides

Ces types et quantités de déchets sont en rapide croissances diluées dans l'environnement. Jusqu'à une date récente, l'unique traitement des ces déchets consistait à les mettre en décharge pêle-mêle, d'où un énorme gaspillage et une pollution toute aussi considérable. Il résulte de cette situation la présence de dépôts sauvages un peu partout dans les villes ou des décharges sans aucun contrôle hors des villes.

FIG. 3.1 – Décharge sauvage

Ceci génère des impacts négatifs directs sur l'environnement par la création des pollutions et constitue des risques majeurs pour la santé de l'humanité.
Chaque année, des millions de personnes, et en particulier des enfants meurent de maladies causées par l'élimination inefficace et la mauvaise gestion des déchets solides. Ces effets peuvent être résumés comme suit :

Effets liées à la santé de l'humanité

- Atteintes à la qualité de vie et à la santé humaine par l'accroissement de plusieurs formes de cancer (vessie, poumon, estomac, sang) et atteintes au foie, aux reins et au système nerveux central chez les personnes vivantes près des décharges ;
- Dans bien des cas, les enfants qui jouent au milieu des ordures sont porteurs du virus qui peuvent être les vecteurs directs de maladies respiratoires ;

FIG. 3.2 – Des enfants jouent sur un terrain où les déchets ne sont pas ramassés

- Augmentation des risques de malformation de naissance, malformation du cerveau, de la moelle épinière ;
- Les dépotoirs peuvent aussi dégrader la qualité de vie d'une collectivité. Ils produisent souvent une odeur forte et désagréable et enlaidissent le paysage ;
- Accidents et blessures causées par des objets tranchants.
- Les ordures non recouvertes attirent également les animaux qui leur servent de nourriture et attirent les insectes, la vermine, les oiseaux, les moustiques et d'autres animaux ;
- Prolifération d'insectes, de rongeurs et d'animaux errants. Ces animaux peuvent devenir porteurs de maladies et des épidémies pour la collectivité comme, les maladies transmises par les chiens sont la rage, le typhus, le kyste hydatique, etc. ; les maladies transmises par les rats sont la typhoïde, la peste, etc. ; les maladies transmises par les mouches et les cafards sont le choléra, des dermatoses, etc. et autre phénomène nouveau et dont on ne connaît pas.

Effets liées à l'environnement

En plus des risques pour la santé, les déchets peuvent avoir un impact négatif pour l'environnement, comme :

- Risques de pollution de l'eau par la production de lixiviats (jus de décharge) qui peuvent s'infiltrer et polluer les nappes phréatiques et les rivières au cours du traitement des déchets ou lorsque les déchets sont éliminés dans une fosse qui est trop proche des sources d'eau ;

- Dégradation de l'esthétique de nos villes et immobilisation des terres productives en raison de la présence de produits non biodégradables comme, sachets en plastique, déchets de démolition, etc. qui sont souvent transportés par le vent jusqu'en rues et cours de la collectivité ;

- Risques de pollution des sols du littoral et du milieu marin par l'éparpillement

FIG. 3.3 – Production de lixiviats

FIG. 3.4 – Remaniement des déchets par le vent

des déchets sauvages par le vent, les oiseaux et l'attraction des vermines lorsque les déchets sont éliminés dans une fosse qui n'est pas isolée ;

FIG. 3.5 – Remaniement des déchets par les animaux

- Le risque de déchets d'hôpitaux comme les blessures par piqûres d'aiguilles augmente considérablement quand ces déchets sont jetés à l'air libre ou dans les décharges publiques ;
- Pollution de l'air due à l'émission de gaz hautement toxiques et des gaz à effets de serre et voire risques d'explosion et dégagement des mauvaises odeurs nauséabondes.

FIG. 3.6 – Pollution par les fumées d'incendie et émission de mauvaises odeurs

Pour éviter la pollution de l'eau, de l'air et de sol par les déchets municipaux, industriels et agricoles, il faut suivre les interdictions suivantes :

- D'abandonner des déchets ;
- De brûler des déchets à l'air libre ;
- De mélanger certains déchets ; les huiles usagées, les fluides frigorigènes, les piles, les pneumatiques, les déchets d'emballages doivent être séparés des autres catégories de déchets,
- D'enfouir les déchets non ultimes ;
- De déverser, laisser écouler, rejeter, déposer des matières susceptibles de provoquer ou d'accroître la dégradation des eaux et la pollution des sols ;
- De déverser, laisser écouler, rejeter dans l es égouts un déchet qui peut perturber le fonctionnement du réseau d'assainissement ou de la station d'épuration ou présenter un risque pour le personnel d'assainissement ;
- D'éliminer les déchets dans une fosse qui est trop proche des sources d'eau ;
- D'éliminer les déchets d'hôpitaux dans les décharges publiques.

Les gouvernements et industries sont constamment à la recherche de solutions technologiques adoptées pour traiter les déchets, ces différentes solutions doivent protéger le personnel et la communauté et minimiser les impacts négatifs sur l'environnement et permettant un traitement efficace et moins coûteux des déchets.

La classification des déchets en groupes qui présentée ci-dessus permet une meilleure planification de la gestion des déchets notamment pour un éventuel programme de valorisation par recyclage, par réutilisation ou par compostage (de matières organiques). Toutes ces techniques de traitement de déchets solides sont présentées dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Traitement des déchets solides

4.1 Introduction

Au cours des ces dernières années, le problème particulier de traitement des déchets solides a pris une grande ampleur. Les déchets solides ne doivent pas être traités sur place ; ils sont traités soit par mise en décharge, soit par incinération, soit par compostage ou soit par un autre procédé autorisé par la législation sur les installations classées pour la protection de l'environnement.

4.2 Gestion des déchets solides

La gestion des déchets solides est un processus qui intègre à la fois la production des déchets et leur traitement. L'établissement d'un plan est un facteur important dans la gestion des déchets pour minimiser la quantité de déchets solides produits. Ce plan de gestion de ces déchets contient par la succession les phases suivantes, la production de déchets ; le tri et la collecte ; le recyclage ; le traitement thermique de la fraction non valorisable et l'élimination finale dans une décharge [14], [16].
Une bonne gestion des déchets solides devra être guidée par les principes suivants : produire moins, produire plus propre, valoriser plus, éliminer moins, et pour bien gérer les déchets, il est également indispensable de connaître les types de déchets générés et en quelles quantités, de connaître les techniques de traitement et d'élimination adaptées à chaque type de déchets et les opportunités et les contraintes locales en matière de gestion des déchets.

L'objectif ultime de la gestion des déchets étant de réduire le volume des matériaux destinés à la décharge finale pour minimiser les risques de pollution qu'ils peuvent causer pour la santé (émission du biogaz, lixiviat, pathogènes, ...) et l'environnement (le changement global du climat causé par les émissions des gaz à effet de serre).

4.3 Points à considérer pour la gestion des déchets solides

La gestion des déchets solide ne peut être efficace que par le suivi de l'évolution de la génération de déchets en fonction du développement et de changement des habitudes et des sociétés, et la connaissance précise de l'évolution des flux de ces déchets et surtout de leur composition. Alors la population de la collectivité, les caractéristiques des déchets solides, leur volume, leur collecte et transport sont des facteurs dont il faut tenir compte pour déterminer la meilleure méthode à utiliser pour la gestion des déchets solides.

4.3.1 Population de la collectivité

Les demandes actuelles et futures de services d'élimination des déchets dépendent essentiellement de la taille de la population. Pendant que les villes se développent dans la taille avec une élévation de la population, la quantité de déchet produite augmente.

4.3.2 Caractérisation des déchets solides

L'étude de la caractérisation et la composition des déchets solides sont essentielles pour une bonne gestion de ces déchets [17]. La disponibilité de ces informations permet essentiellement :

- D'évaluer la masse de déchets solides générés, de définir leur propriétés physiques, chimiques et thermiques, d'identifier leur source de génération et de définir les stratégies futures en matière de gestion ;
- D'évaluer le potentiel de valorisation (compostage, recyclage, etc.) ou d'optimiser le mode de traitement en connaissant précisément la composition des déchets ;
- De prédire les émissions de ces déchets dans l'environnement et éventuellement de travailler sur l'atténuation de leur impact.

4.3.3 Volume des déchets solides

Le volume de déchets solides dépend de la génération de déchets et du taux de compaction. Il est nécessaire de connaître le taux et la quantité de déchets générés afin de déterminer la capacité que devrait avoir une méthode d'élimination de déchets solides. Idéalement, ces paramètres doivent être basés sur les données historiques de la production de déchets solides dans une collectivité afin de mettre au point la meilleure option. Si ce type de données n'est pas disponible, on peut estimer le volume de déchets à partir du taux moyen de déchets produits par jour. La production

quotidienne et annuelle de déchets peut être facilement estimée d'après la production de déchet par personne par jour.

4.3.4 Collecte des déchets solides

Les méthodes de collection changent considérablement entre différents pays et régions. Un ramassage régulier et fréquent des déchets permet d'avoir une collectivité plus propre. Un niveau minimum de services avec collecte hebdomadaire est généralement suffisant pour maintenir des conditions sanitaires et esthétiques acceptables. Dans certaines collectivités, la collecte peut se faire deux fois par semaine ou à toutes les deux semaines, le jour de ramassage doit toujours être le même et connu de tous les membres de la collectivité.
Quand il n'y pas de collecte communautaire des déchets, certains résidants peuvent les éliminer en les brûlant dans un vieux baril de pétrole, sur leur propre terrain. C'est une pratique dangereuse pour l'environnement parce que la combustion des plastiques et autres matières rejette beaucoup de polluants atmosphériques.

Les déchets doivent être placés dehors dans des poubelles ou des sacs à ordures bien fermés, à l'abri des animaux détritivores. Afin de les protéger contre les animaux et les intempéries, les déchets doivent être placés dans une boîte fermée. Le type de véhicule de collecte dépend de la taille de collectivité ainsi que du type de routes.
Les véhicules de collecte peuvent aller d'une remorque tirée par un véhicule tout terrain à une benne tasseuse de taille normale pour les collectivités de plus grande taille. Les camions légers sont souvent utilisés pour ramasser les déchets solides dans les petites collectivités. Le site doit être facile d'accès pour les véhicules qui viennent enlever les déchets.

4.3.5 Tri des déchets solides

Un système intégré pour la gestion des déchets solides commence habituellement par le tri. Ce tri des déchets solides consiste à séparer les déchets en plusieurs catégories et permet de réduire la quantité de déchets car une partie de ces déchets est recyclée et une partie est compostée.
La performance de n'importe quel système de tri et de traitement, de même que l'impact sur une décharge sera améliorée par la mise en place du tri à la source ou par des centre de tri [18].

Le tri à la source

Le tri à la source implique le tri des déchets sur le lieu et exige un effort et du temps et permet d'obtenir les produits réutilisables les plus propres. Le tri à la source nécessite d'introduire deux fractions : organiques et non organiques. La fraction inorganique comprend les matières qui peuvent être récupérés et recyclés (le carton, le plastique, les métaux et les verres) ainsi que les matières inertes. La fraction organique

comprend les résidus d'alimentation, les débris de végétaux, de fruits, de plantes, etc. peuvent être compostés.

Les centres de tri

Dans ces centres, les déchets sont séparés en différents flux utiles pour être ensuite traités et éliminés d'une manière écologiquement et économiquement acceptable.
Un centre de tri peut s'accompagner d'une déchetterie où les particuliers peuvent venir pour déposer leurs déchets spécifiques. Selon l'origine et la nature des déchets triés, on distingue trois types de centre de tri :

- Les centres de tri des matériaux recyclables issus des ordures ménagères ;
- Les centres de tri des déchets banals des entreprises ;
- Les centres de tri des encombrants.

Chaque centre de responsabilité devrait s'assurer que :

- Les déchets de cuisine et les déchets de jardin sont séparés des autres ordures et les acheminer vers une installation de compostage ;
- Les déchets recyclables sont séparés des autres ordures et les acheminer vers une installation de recyclage ;
- Les déchets dangereux pour l'environnement comme les piles et les produits pharmaceutiques sont séparés des autres ordures, ramasser et entreposer puis les acheminer vers une installation appropriée conformément aux règlements de sécurité en vigueur ;
- Ramasser le reste des déchets et les acheminer vers une installation appropriée d'élimination, normalement un site d'enfouissement ou un incinérateur municipal approuvé.

4.4 Schéma directeur de gestion des déchets solides

Le schéma directeur de gestion des déchets solides doit contribuer à l'amélioration du cadre de vie par une bonne gestion des déchets. Il comporte trois volets [13], [14] :

4.4.1 Traitement des déchets

Le traitement c'est l'ensemble des opérations qui visent à réduire, dans de conditions contrôlées, le potentiel polluant initial du flux des déchets à mettre en décharge. Plusieurs technologies existent pour le traitement des déchets solides, la sélection de la meilleure technologie est un processus assez complexe.
La sélection de l'option adéquate pour la gestion des déchets solides a été faite en

étudiant les différentes modalités de gestion, la collecte, le tri de déchets et l'installation de stations de transfert et en comparant les différentes technologies comme le compostage, l'incinération des déchets et la digestion anaérobique pour compléter ces modalités de gestion.

4.4.2 Valorisation des déchets

Valoriser : c'est donner de la valeur à quelque chose .
La valorisation reste un concept ambigu qui se définit surtout par opposition à l'élimination. Un déchet est "valorisé" lorsqu'il trouve un usage comme matière ou source d'énergie.
Il y aurait donc deux types de valorisation :

La valorisation matière

La valorisation matière est la transformation d'une matière considérée comme un déchet en une autre catégorie de matière. On distingue différentes formes de valorisation des matières, elles sont développées aujourd'hui avec le développement des modes de consommation des sociétés et la croissance des quantités de déchets générés par les populations. Ces formes sont le réemploi comme la réutilisation des bouteilles en verre, des emballages, etc. ; le recyclage qui permet d'obtenir de nouveaux produits en intégrant ces matières dans un nouveau cycle de production. La valorisation matière se pratique aussi pour les déchets organiques, pour le compostage.

La valorisation énergétique

Elle consiste à utiliser le potentiel énergétique du déchet solides ou les calories contenues dans ces déchets, en les brûlant et en récupérant l'énergie ainsi produite pour, par exemple, chauffer des immeubles ou produire de l'électricité.

La valorisation des déchets s'insère désormais dans une économie mondialisée, économique et financière par la création d'emplois et de ressources, production de matières premières secondaires pour l'artisanat, l'agriculture et l'industrie.

4.4.3 Elimination des déchets

L'expression "élimination" se rapporte à la destination finale des déchets traités, dans une décharge contrôlée ou au moyen de toute autre méthode de stockage définitif acceptable au plan environnemental et appropriée à la situation locale.

4.5 Techniques de gestion des déchets solides

Dans cette section, les étapes de gestion des déchets sont présentées dans le schéma ci-dessous[16], [17] :

FIG. 4.1 – Les étapes de la gestion des déchets solides

4.5.1 Les trois "R" à suivre pour la gestion des déchets solides

Imaginez un monde sans déchets. Les matières dont nous n'avons pas besoin sont considérées comme des ressources utiles qui sont immédiatement achetées en vue de nouvelles utilisations. Les contenants pour boisson ou aliment en acier, en verre ou en plastique sont lavés et remplis de nouveau localement, pour retourner ensuite directement sur les rayons des magasins. Les étoffes sont réutilisées ou recyclées. Les réfrigérateurs, cuisinières et autres produits blancs en bon état sont démontés, leurs pièces mécaniques sont reconstruites et leurs carcasses remodelées en de nouveaux produits ainsi, les vêtements, le mobilier ou les jouets en état de marche peuvent être réutilisés. Les débris alimentaires, les feuilles et tous les déchets organiques de fabrication sont compostés puis vendus comme conditionneurs de sol, riches en substances nutritives. Les pneus et autres produits de caoutchouc sont reconstitués en nouveaux produits de caoutchouc. Les produits qui ont subi une usure mais restent utilisables après de menues réparations peuvent être transmis à d'autres usagers moins regardants sur leur état général.

Dans ce monde, les décharges n'existent pas. Il n'y a pas non plus d'incinérateurs de déchets urbains solides, pas de dépotoir brûlant à ciel ouvert. A la place, on trouve des parcs de récupération des ressources, des parcs d'affaires qui, dans chaque communauté, emploient des gens de l'endroit à transformer les produits nécessaires à notre vie de tous les jours.

Alors on peut réduire considérablement les coûts environnementaux et économiques de l'élimination des déchets en appliquant les **3 R** : - *Réduire, Réutiliser et Recycler*-.

Ce principe permet de réduire la production des déchets solides et la réduction du volume de déchets signifie automatiquement la réduction du nombre de camions poubelle sur nos routes et la réduction de déchets incinérés ou mis en décharge.

Réduire

La réduction à la source est le principe de base d'une bonne gestion des déchets. La réduction de la quantité de déchets consiste à éviter de produire des déchets et à réduire leur volume. Lorsque l'on génère moins de déchets à la source, il y a moins de dommages, de pollution et de perturbations sur l'environnement, car la demande pour d'autres sites d'élimination et pour des décharges plus grandes diminue.
La réduction des déchets implique des stratégies particulières, des modifications gestionnaires et des changements de comportement, comme : limiter les quantités d'objets destinés à un usage unique, on réduit ainsi la quantité de matière et de produits impossibles à réutiliser ou à recycler et éviter d'utiliser des produits jetables comme mouchoirs en papier, rasoirs,...

Réemploi ou Réutiliser

Procédé consistant à utiliser une nouvelle fois le matériel jeté sans transformation, en conservant plus ou moins sa forme originale.

Réemploi : c'est un nouvel emploi d'un déchet pour un usage analogue à celui de sa première utilisation. C'est, en quelque sorte, prolonger la durée de vie du produit avant qu'il ne devienne un déchet. Par exemple, réemploi des bouteilles de verre par lavage et remplissage.

Réutiliser : consiste à conserver la plus grande partie du produit en fin de vie et à le remettre en état d'être utilisé. Alors c'est un nouvel emploi d'un déchet pour un usage différent de celui de son premier emploi. Par exemple, utiliser des pneus de voiture pour protéger la coque des barques.

Recyclage

Le terme recycler est le troisième élément, après réduire et réutiliser, dans la stratégie dite des trois R. Le recyclage vient compléter les efforts de réduction à la source et de réemploi. Il vise à ramener les matériaux qui composent un produit en fin de vie généralement des déchets industriels ou ménagers récupérés et réutilisés à une étape de transformation secondaire pour en faire un produit contenant une certaine quantité de matières recyclées. Ceux-ci sont collectés et triés en différentes catégories pour que les matières premières qui les composent soient recyclées, ce tri a pour objectif principal d'éviter un souillage des déchets recyclables par des déchets non recyclables. Ceci signifie prendre un matériel jeté et le modifier pour en faire un produit dont la forme peut être différente du produit original. Par exemple :

- La refonte des bouteilles en verre pour en faire des neuves ;
- Les produits textiles, le papier et le carton (journaux, magazines, etc.), après le tri peut être recyclé pour en produire d'autres ;
- Les pneus hors d'usage sont utilisés pour produire des bacs fleurs, des tréteaux, des tuiles de revêtement de sol, etc. ;
- Le papier aluminium récupéré est utilisé pour produire des canettes, du papier d'emballage, des constituants d'automobile ;
- L'acier récupéré est utilisé pour produire des pièces de moteur, des outils, des boîtes de conserve, etc. ;
- Les plastiques récupérés sont utilisés pour produire des sacs, des récipients et des couvercles pour produits non alimentaires, des meubles de jardin, des jouets, du mobilier urbain, des tuyaux, des pices d'automobile pare-chocs, batteries, etc.

FIG. 4.2 – Des matières prêtes pour le recyclage

Les bénéfices économiques et environnementaux du recyclage sont considérables. Ce dernier permet de protéger les ressources, de réduire les déchets, de créer des emplois, de protéger la nature et d'économiser les matières premières, mais il existe aussi certains inconvénients comme :

- Le recyclage suppose de trier les déchets en fonction du mode de recyclage, ceci exige une main d'oeuvre abondante, même lorsqu'un tri sélectif est effectué en amont par la population, en effet il arrive qu'un second tri soit nécessaire dans un centre d'affinage pour éliminer les erreurs de tri et les impuretés qui pourraient compromettre le recyclage comme le cas du plastique et du verre ;
- Conséquences sur les produits issus du recyclage. Pour certains types de produits, la qualité de la matière première est altérée par l'opération de récupération de celle-ci dans les produits recyclés. Par exemple, le recyclage de certaines matières plastiques contaminées par des polluants ne permet plus de les utiliser pour en faire des emballages alimentaires.

Récupération d'énergie

On peut ajouter un autre **'R'** avec les **'3 R'** précédentes pour la récupération [16]. Cette opération se situe en amont de la valorisation. Lorsqu'il n'est pas possible de recycler un produit en fin de vie, une autre technique peut être utilisée pour certaines catégories de déchets. on peut le faire brûler pour récupérer une énergie. On parle alors de *"valorisation énergétique"* par opposition à la *"valorisation matière"* que constitue le recyclage.

4.5.2 Le compostage

La comparaison entre les différentes techniques de gestion de déchets solides a montré que le procédé biologique de fermentation naturelle est considéré comme étant l'option la plus désirable pour la gestion des déchets organiques solides.
On distingue deux types de fermentation produits par des types différents de bactéries, soit la fermentation aérobie (en présence d'oxygène) qu'il s'agit du compostage et la fermentation anaérobie (en absence d'oxygène) on parle alors de méthanisation. Ces méthodes permettent également de réduire le volume des déchets à enfouir.

Ce paragraphe présente un descriptif technique de compostage. Le compostage est un moyen naturel de recycler et un procédé biologique contrôlé de conversion. Il décompose et transforme les matières organiques impossibles à recycler en humus.
Les résidus alimentaires, les feuilles, les résidus de jardinage, le papier, le bois, le fumier et les résidus agricoles, les boues d'épuration des eaux résiduaires et les litières biodégradables des animaux herbivores sont d'excellentes matières organiques qui se prêtent bien au compostage -Figure. 4.3-. Ces déchets, recueillis séparément des autres déchets, se prêtent naturellement au compostage sans adjonction de matières extérieures et produisent un compost d'excellente qualité [19].

Le compostage se fait par le biais de micro-organismes tels que les bactéries et les champignons qui décomposent les matières organiques -Figure. 4.4-. Il faut également bien gérer la température de la matière compostée, de l'eau et de l'oxygène afin que le processus soit efficace [20].

FIG. 4.3 – Les matières organiques de compostage

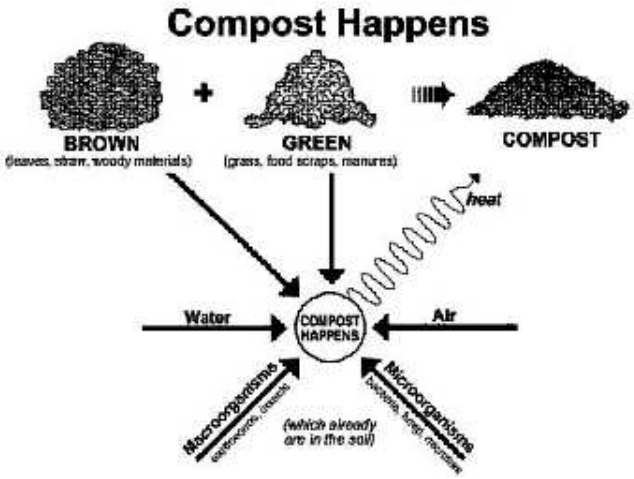

FIG. 4.4 – Principe de compostage

Description du procédé de compostage

Le procédé classique de compostage comprend les phases suivantes [14], [20] :

A. Le tri des déchets

Le tri a pour objectif la séparation de la fraction organique compostable. Cette opération peut être effectuée soit à la source soit au sein de l'installation de compostage.

B. La fermentation

Ce procédé est une fermentation aérobie intense, amenant les matières organiques à l'état de compost frais qui se fait à travers la biodégradation de la fraction organique sous l'effet de l'action des microorganismes à haute température.

La fermentation s'opère en 4 phases successives, à savoir :

- La phase de latence (ou phase psychrophile) qui correspond au temps nécessaire pour la colonisation du milieu par les micro-organismes (un jour environ). Pendant cette phase, la température s'élve légèrement pour atteindre environ 20°C ;
- La phase mésophile est due à la multiplication des microbes mésophiles qui déclenchent le processus de fermentation. Ces micro-organismes dégagent de grandes quantités de chaleur. Aux alentours de 40-45°C, les microbes mésophiles meurent ;
- La phase thermophile correspond à la période d'activité d'une autre vague microbienne. A une température de 60-70°C, les microbes thermophiles meurent à leur tour ainsi que les germes pathogènes ;
- La fermentation se solde par une réduction significative de la fraction organique (45 à 50%).

FIG. 4.5 – La fermentation des déchets

C. La maturation

La maturation, dure de 2 à 6 mois, va transformer le compost frais en un compost mûr, riche en humus. Cette phase se caractérise par une faible activité microbienne à cause de la chute du taux d'humidité et d'oxygène et la chute de la température qui se stabilise autour de 35-45°C. Après la maturation et lorsque le compost est stabilisé et ne dégage plus de chaleur, il est généralement prêt à être utilisé comme engrais organique.

D. Le produit fini

Lorsque le processus du compostage est terminé, quel que soit le système utilisé, on obtient le produit fini *"compost"* riche en substances nutritives et en matières organiques, le compost fini peut aider à améliorer la texture et la fertilité du sol, il peut être utilisé par les ménages en tant que fertilisant dans leurs jardins ou dans les terrains agricoles. De même, ce produit peut être utilisé dans les opérations de réhabilitation des carrières ou sur les plantations qui séparent les voies routières, dans la terre de rempotage pour l'industrie horticole et agricole, ...

Les caractéristiques chimiques et physiques du compost varient selon la nature des matières entrantes. Le compost est suffisamment mûr, il est caractérisé par une couleur marron (marron foncé), par une proportion très faible en carbone et il ne dégage pas d'odeurs désagréables.

FIG. 4.6 – Le compost

Dans le compostage le principe est basé sur la biodégradation aérobie. Pendant cette phase, l'activité des bactéries aérobies est importante et elle est favorisée par l'oxygène présent dans le milieu. L'absence d'aération (oxygène) entraîne la mort des microorganismes aérobie et l'apparition d'autres espèces bactériennes anaérobies et le compostage libère dans l'atmosphère de gaz carbonique ou du méthane. Pour éviter cette putréfaction et pour un bon fonctionnement de compostage, il est nécessaire de restaurer un ensemble de paramètres physico-chimiques et biologiques susceptibles d'agir sur la qualité du compost, comme : l'aération, l'humidité, le taux de Carbone/Azote, la température, présence d'une population microbienne de bactéries et champignons, ...

Les différentes méthodes de compostage

A. Compostage sur place

Le compostage sur place est une méthode naturelle de recyclage important, à la maison et au travail, là où l'on utilise les matières organiques. Pour faire ce compostage, on doit choisir un coin frais et ombragé du jardin et creuser un puits de compost, qui idéalement devrait être de 3 pieds de profond, cette profondeur est commode pour le compostage aérobie. De préférence le puits devrait être garni du granit ou de la brique pour empêcher la pollution de nitrite de l'eau de sous-sol, qui est connue pour être fortement toxique. Chaque fois que la matière organique est ajoutée au puits elle devrait être couverte de couche des feuilles sèches ou d'une couche mince du sol d'environ 10 cm d'épaisseur qui permet à l'air d'entrer dans le puits empêchant de ce fait la mauvaise odeur. A la fin de 45 jours, la matière organique pure et riche est prête à être employée.

Cette méthode de compostage est la pratique la plus anciennement employée, elle élimine les coûts du transport des matières organiques mais conduit rapidement à des conditions anaérobies.

B. Compostage domestique

Le compostage domestique consiste en l'installation d'un composteur domestique chez les particuliers. L'utilisation d'un composteur de fabrication artisanale ou un composteur commercial est un moyen facile de nous enseigner à gérer les résidus organiques que nous créons et de s'assurer que le processus se déroule normalement pour obtenir un excellent engrais que on peut utiliser pour le jardinage et l'aménagement paysager.

FIG. 4.7 – Compostage des déchets de jardin en récipient aéré

FIG. 4.8 – Poubelle à compost commerciale avec une porte

L'annexe A présente un descriptif technique d'une expérience de compostage que je l'ai faite dans notre jardin.

Avantages et inconvénients de compostage

Le compostage est défini comme la transformation des matières organiques par leur décomposition en compost (excellent engrais) qui peut améliorer la texture et la fertilité du sol. Ce produit fini stimule l'activité microbienne, apporte aux plantes les éléments nécessaires à leur croissance et facilite la circulation de l'eau et de l'air dans le sol. L'engrais organique peut être employé au lieu des engrais chimiques, il facilite le sol pour cultiver.
Outre l'intérêt agronomique de compostage, cette technique est un moyen efficace pour la gestion des déchets puisqu'elle réduit de moitié la quantité des déchets ménagers destinés actuellement à l'enfouissement, environ 40 à 70% du flux total de déchets solides peuvent être compostés. Alors il permet la réduction de la quantité et de la nocivité des déchets à éliminer, et par la suite le prolongement de la durée de vie des sites des décharges publiques.
Alors avec le compost, nourris la terre, ne nourris pas la décharge.

Il existe aussi certains inconvénients :
L'intérêt du compost est parfois critiqué par certains spécialistes qui contestent sa faible valeur nutritive minérale (teneur en azote, acide phosphorique et potasse) par rapport aux engrais chimiques. De même, les effets du compost, agissant sur la structure des sols, et par sa fertilité, sont perceptibles sur le moyen et le long terme seulement, contrairement aux engrais chimiques qui agissent sur le court terme (l'année de la récolte).
Sur le plan commercial, le compost est ainsi souvent pénalisé par rapport aux engrais, et à une valeur marchande plus faible. Par ailleurs, le compost urbain souffre du discrédit causé par la commercialisation de produits de mauvaises qualités (défaillance du système de contrôle du processus de compostage, absence d'un système efficace

de tri des déchets, présence de débris de matières non organiques, etc.).
Une autre critique réside dans le risque de contamination par des substances toxiques (métaux lourds) en cas de mauvais contrôle des conditions et des paramètres de compostage. Le risque augmente alors considérablement en cas d'utilisation du compost pour l'amendement d'un sol à pH acide (risque de solubilisation et par la suite de migration des métaux lourds vers la partie aérienne des plantes).

4.5.3 La digestion anaérobique

La digestion anaérobie des déchets est un processus biologique vieux comme le monde. Elle est similaire à celui du compostage. Elle consiste à fermenter les fractions organiques des déchets ménagers et industriels de classe 2 (boues d'épuration, lisiers et fumiers, effluents industriels, déchets municipaux organiques, les déchets de l'agro-alimentaire, de cuisine, et d'une façon générale tout produit digestible) dans des conditions anaérobiques (absence d'air) en un biogaz par l'action de bactéries [21], [22]. Ce gaz est également un gaz riche en méthane qui peut être valorisé comme source d'énergie directe. Cette énergie dégagée est plus faible que dans le cas d'une dégradation aérobie (en présence d'oxygène).
En France, la méthanisation a été développée et un programme de diffusion a permis la réalisation d'une centaine d'installations à la ferme à l'échelle de l'exploitation agricole. Aujourd'hui, la méthanisation se développe dans d'autres pays d'Europe comme : Autriche, Danemark, Suisse, mais surtout Allemagne [23].

Principe

Le procédé de la fermentation anaérobique comprend plusieurs étapes, avec des bactéries adaptées à chaque étape [24], [25] :

- **L'acidogénèse**, qui hydrolyse les molécules complexes (cellulose, lipides, protéines, ...) en molécules plus simples (acides gras, acides aminés, ...) ;
- **L'acitogénèse**, qui transforme ces acides en acide acétique, en gaz carbonique et en hydrogène ;
- **La méthanogénèse**, qui transforme l'acide acétique en méthane et gaz carbonique, et transforme le gaz carbonique et l'hydrogène en méthane.

La figure suivante représente les étapes de la méthanisation [24].

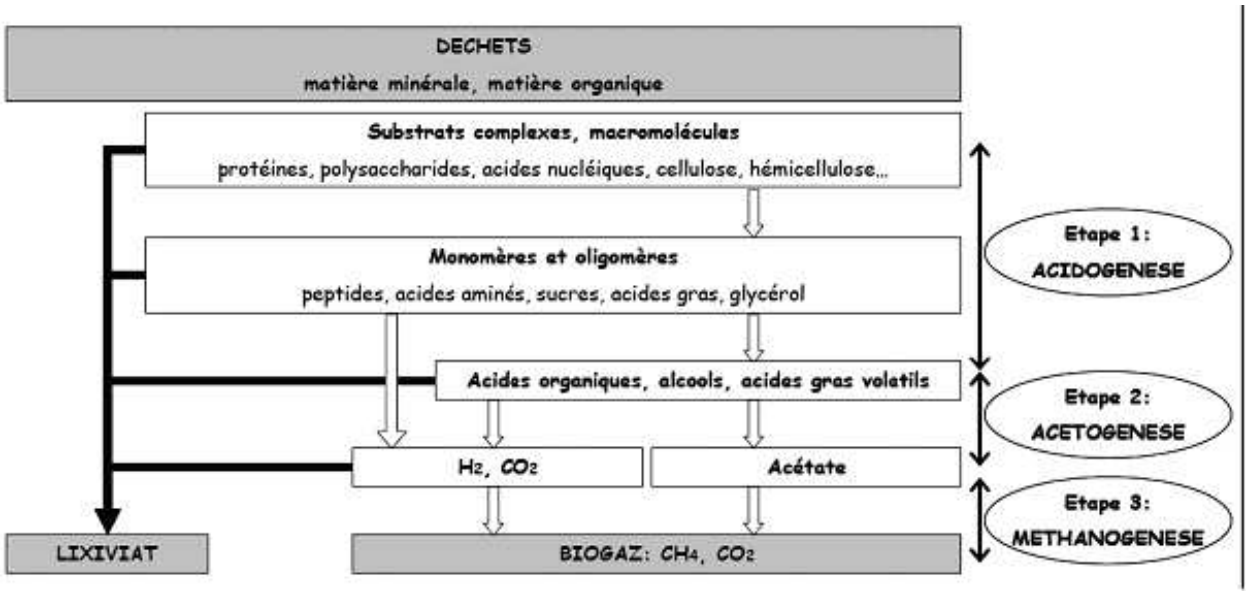

FIG. 4.9 – Les étapes de la dégradation des déchets

La production industrielle de biogaz consiste à stocker la matière organique de déches dans un digesteur ou méthaniseur -Figure 4.10-, qu'il est le coeur du procédé, ou plus exactement son estomac. Il est constitué d'un réservoir étanche, en béton ou en acier, où les matières à digérer séjournent plusieurs semaines.

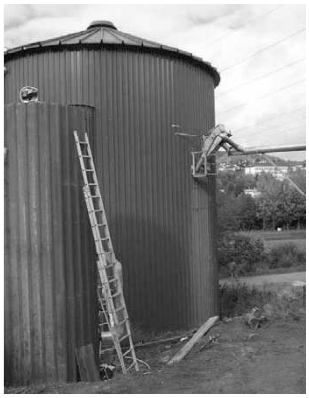

FIG. 4.10 – Le digesteur

La méthanisation se déroule classiquement à 37°C (mésophile), et plus largement entre 20 et 6O°C [26].

Aux températures élevées, la décomposition et la production de biogaz sont plus rapides, la digestion thermophile permet une destruction plus complète des organismes pathogènes que les processus de digestion à basse ou moyenne température.
La production de biogaz n'est pas régulière, au début du cycle, la fermentation du substrat commençant, la production de biogaz est lente. Elle s'accélère, et atteint un

taux maximal au milieu du processus de dégradation et chute en fin de cycle lorsque seuls les éléments difficilement digestibles restent dans le digesteur. A la fin de la digestion, le digestat est évacué et le processus peut recommencer.

Caractérisation du biogaz

L'étude montre que les biogaz sont de composition variée selon l'origine et la composition des déchets et les variations climatiques. Dans la plupart des cas, le biogaz est un mélange de gaz carbonique (40% de CO_2) et de méthane (60% de CH_4), et il contient, de l'hydrogène sulfuré et de l'eau. Selon leurs provenances, ils peuvent aussi contenir des quantités variables d'azote, d'oxygène, d'aromatiques, de composés organo-halogénés (chlore et fluor) et des métaux lourds sous forme de traces [26], [23].
La quantité et la composition du biogaz produit en fermenteur dépendent de la teneur en matières digestibles, de l'homogénéité, de la granulométrie du substrat, du débit d'alimentation du digesteur, de la qualité de l'agitation, du temps de séjour dans le réacteur, de la température de fermentation et le pH, etc.

Les biogaz peuvent être valorisés, dans plusieurs domaines d'activité. Les différentes voies envisageables sont la production de chaleur, la production d'électricité, la cogénération, un carburant d'automobile et l'injection dans le réseau de gaz naturel, parce que le méthane obtenu dans le biogaz par la fermentation des matières organiques a la même composition que le gaz dit " naturel " ; une fois purifié de la bonne manière, le méthane peut être directement vendu au réseau de distribution du gaz naturel et un m^3 de biogaz équivaut à un demi m^3 de gaz naturel [27], [23].

Avantages et inconvénients

L'utilisation de manière optimale d'une installation de biométhanisation permet non seulement de prévenir la pollution par la réduction des déchets, mais aussi de produire de biogaz "source d'énergie renouvelable" et du compost. Les avantages sont multiples et peuvent être classés comme suit :

- Un processus naturel nécessitant moins d'espace que le compostage aérobie ou l'enfouissement et réduisant considérablement le volume et le poids des déchets à enfouir ;
- Sur le plan énergétique, production nette d'énergie, génération d'un combustible renouvelable de haute qualité valorisable dans plusieurs applications finales ;
- Sur le plan environnemental, réduction significative de la pollution atmosphérique liée au émissions de CO_2 et de CH_4, élimination des odeurs, production d'un compost propre et d'un fertilisant liquide riche en matières nutritives utilisables en agriculture ;
- Sur le plan économique, le biogaz permettrait une économie de l'énergie d'origine fossile. Son utilisation diminuerait d'autant les risques liés à l'effet de serre

et peut servir à la production d'électricité, la production de chaleur éventuellement utilisable pour le chauffage de locaux ou autre chose.

La biométhanisation peut transformer un problème de déchets en une source de richesses mais il possède aussi quelques inconvénients :

- Le biogaz est explosif, corrosif et toxique, ces risques d'intoxication se rapportent surtout à la présence d'hydrogène sulfuré qui peut exister en quantité importante ;
- La méconnaissance de cette technique, dans tous les secteurs, représente un important handicap de la méthanisation. Une sensibilisation des publics concernés permettrait d'attirer l'attention sur cette nouvelle énergie fortement prometteuse tant à un niveau économique que écologique ;
- Il existe aussi un inconvénient de l'argent, nous avons les moyens pour le faire, mais il existe un fossé entre la théorie et la pratique, une des principales raisons pour cela est l'argent. A court terme, la digestion anaérobie coûte plus cher que les solutions plus traditionnelles tels l'enfouissement, l'incinération ou le compostage.

4.5.4 L'incinération

L'incinération est un mode de traitement thermique de déchets solides qui n'a qu'un seul but, éliminer les déchets ou réduire leur volume avant de les envoyer en décharge. L'incinération doit rester un traitement de dernier recours, avant d'incinérer ou d'enfouir un déchet, il faut d'abord examiner toutes les possibilités de réemploi, de recyclage ou de valorisation et vérifie bien qu'il n'y a pas d'autres solutions pour utiliser ces déchets.
On peut remarquer que l'incinération des déchets solides est très différente qu'un simple brûlage dans un vieux baril de pétrole ou dans une fosse. L'incinération est une technique de combustion des déchets solides et elle constitue un moyen efficace d'élimination ou de réduire de 75 % le poids et de 90 % le volume des déchets organiques, des hydrocarbures, les déchets hospitaliers... [28].

La diversité des déchets et leur non homogénéité peuvent rendre difficile le choix du dispositif d'incinération et de contrôle de la température de combustion.
Cependant, puisque ce ne sont pas tous les déchets solides sont combustibles, il faut prendre des dispositions pour l'élimination des déchets non combustibles (métaux blancs, électroménagers, etc.). Ainsi, les ordures entrant dans une centrale cheminent sur une filière de tri, seulement après, aboutissent au four.

Après combustion et récupération, la vapeur disponible peut être valorisée sous forme de chaleur seule, d'électricité seule, ou de chaleur et d'électricité produites en co-génération. En pratique, pour une ville de 400000 habitants, qui produit 150000 tonnes de déchets ménagers et assimilés, dont 100000 tonnes sont incinérées, on as-

sure [12], [29] :

- soit le chauffage et l'eau chaude de 15000 logements (50000 habitants) ;
- soit l'électricité spécifique de 7000 logements (20000 habitants) ;
- soit le chauffage et l'eau chaude de 14000 logements et l'électricité spécifique de 2 à 4000 logements.

Aujourd'hui, à partir du moment où on choisit l'incinération comme mode de traitement, le déchet n'est plus un rebus, il est un combustible ; il est même un combustible garanti pour longtemps. Sa combustion produit une énergie assimilable aux énergies renouvelables. Elle contribue à une économie d'énergie et en plus permet de diminuer les émissions des rejets gazeux, liquides et solides issus des systèmes de productions d'énergies fossiles.

La combustion de déchets n'est pas un processus propre, elle conduit à l'émission des cendres toxiques et d'un grand nombre de résidus gazeux peuvent polluer l'air s'ils sont rejetés non traités dans l'atmosphère. Un traitement des fumées résultant des gaz de combustion est donc nécessaire, elles sont épurées et contrôlées avant rejet à l'atmosphère et les résidus solides d'épuration sont envoyés en décharge de classe1.
Lors de la combustion des déchets solides, l'incinérateur produit aussi des gaz chauds (fumées), des cendres volantes et conduit à la formation de scories, appelés mâchefers d'incinération des ordures ménagées (MIOM)[30]. Ces mâchefers subissent un tri pour retirer les différents métaux qui ont l'avantage de pouvoir être recyclés ou valorisés en utilisation spécifique comme remblais pour les routes, et le reste de mâchefers doivent être éliminées dans une décharge de classe II, la même que celle des déchets ménagers classiques.

Alors d'après Lavoisier "Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme" ; l'incinération n'échappe pas à la règle ; les déchets sont transformés en cendres et en fumées comme montré dans le schéma ci-dessous :

FIG. 4.11 – Rejets de l'incinération

Avant de pouvoir construire un incinérateur, il faut procéder à l'évaluation environnementale du site proposé et des plans de l'incinérateur afin de s'assurer que ce dernier ne nuira pas à la santé de la collectivité ni à l'environnement.

L'exploitation d'incinération nécessite l'obtention d'un permis par les autorités compétentes qui est réexaminé tous les cinq ans [29].

Principe général de fonctionnement

Du point de vue technique, la conception des usines d'incinération est relativement variée et leur choix reposera essentiellement sur les caractéristiques des déchets qui y sont incinérés. Une usine de valorisation énergétique consiste à brûler les déchets dans un incinérateur conu à cet effet avec un four spécialement adapté à une température élevée. En particulier, le type de four utilisé et sa taille, sont dimensionnés en fonction de la proportion des produits solides, de leur pouvoir calorifique et de la capacité souhaitée. Différents types de fours ont été utilisés, fours rotatifs, four à grille, fours oscillants et fours à lit fluidisé. Toutes ces techniques visaient, avec un certain succès d'ailleurs, à obtenir des mâchefers à faible taux d'imbrûlés.
On générale, une usine de valorisation énergétique est composée par [31], [28] :

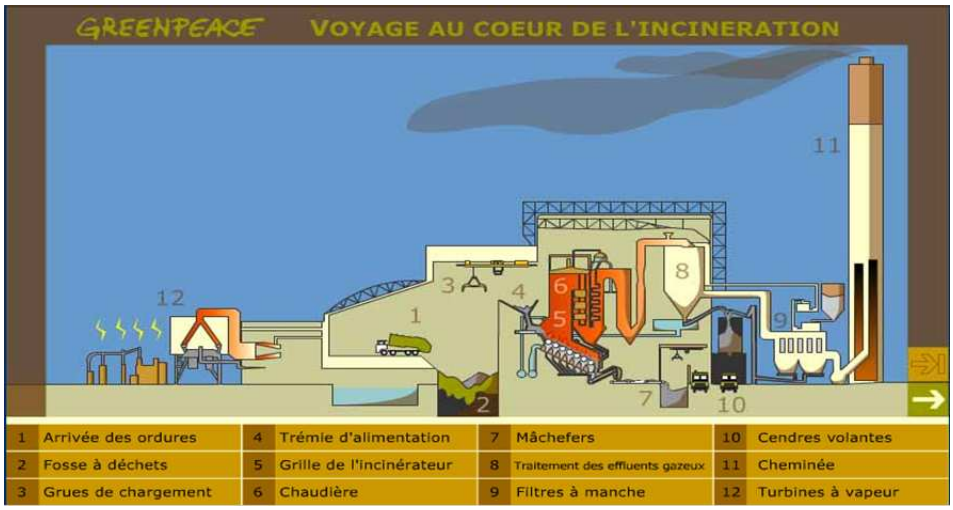

FIG. 4.12 – Principe d'incinération

- Une fosse de réception des déchets solides ;
- Un système d'alimentation du four et de mélange des déchets constitués d'un grappin prenant les déchets en fosse et les plaçant dans une trémie située au-dessus du four ;
- Un four qui peut utiliser plusieurs techniques ;
- Un brûleur, qui permet la valorisation énergétique ;
- Une chaudière ;
- D'un traitement pour le stockage des résidus solides et un dispositif d'épuration des fumées ;

– D'équipements de production de chaleur (échangeur) ou d'électricité (turboalternateur).

Avantages et inconvénients de l'incinération

Avantages

L'incinération est le processus d'oxydation de la partie combustible du déchet solide. Cette option de gestion des déchets résout pleinement le problème de traitement des déchets et comporte plusieurs avantages comme :

– Permettre une forte réduction du volume des déchets solides qui doivent être mis en décharge ;
– Prévenir ou réduire les effets des déchets dangereux sur l'environnement et les risques qui en résultent pour la santé publique et éviter la contamination microbienne ;
– Elle constitue ainsi un mode de valorisation énergétique non négligeable et contribue ainsi à minimiser les consommations de ressources énergétiques ;
– La chaleur produite par l'incinérateur peut être utilisée pour chauffer les industriels voisins ou pour le chauffage urbain ou même produire de l'électricité pour alimenter les systèmes électriques de l'installation et dans certains cas, peut alimenter des maisons ou des bâtiments.

Inconvénients

L'incinération des déchets solides a été considérée pendant longtemps comme une solution miracle. Aujourd'hui, on sait que cette option de gestion comporte plusieurs inconvénients.

Si l'incinération fait disparaître les déchets, la matière n'est pas pour autant détruite elle a juste changé de forme, ce qui peut être parfois beaucoup plus toxique que les matériaux initiaux.

En effet, les déchets contiennent divers matériaux naturels ou synthétiques organiques (papier, plastiques, textiles, déchets de cuisine, déchets de jardin et autres) et inorganiques (verre, métaux et divers autres composants). Chacun de ces différents composants contient une quantité de métaux lourds qui est toxique à certaines concentrations tels que le plomb, le cadmium, le chrome, etc.

En dehors des métaux lourds, le processus d'incinération est accompagné des rejets d'une grande variété de polluants dans les cendres volantes et les mâchefers et dans les rejets gazeux (dioxines, furanes, oxyde d'azote et de soufre, etc.) qui représentent un risque réel pour la santé publique et l'environnement.

Il est désormais démontré que le dioxine est responsable de cancers, on trouve les cancers aussi bien chez les enfants que chez les adultes, des maladies du coeur, des

perturbations du système immunitaire, des allergies amplifiées et des impacts nocifs sur le système respiratoire. Après absorption par le système respiratoire, le manganèse est transporté par le sang directement au cerveau, sans passer par le foie qui permettrait une première épuration ; ce passage direct dans le cerveau est une des raisons de la différence de toxicité entre le manganèse ingéré et inhalé.
La combustion des déchets rejette aussi du dioxyde de carbone. Ce gaz à effet de serre contribue au réchauffement de la terre.
Alors l'incinération est elle-même source de pollution et elle n'est pas recommandé comme une option viable de gestion des déchets solides.

4.5.5 La décharge contrôlée

La mise en décharge devient l'étape ultime et inévitable dans la chaîne de traitement et de gestion intégrée des déchets solides.
Pendant très longtemps, les déchets des citadins sont jetés dans la rue ou dans les rivières. Cela pose des problèmes de salubrité. L'hygiène impose de jeter les déchets dans un récipient, qui a pris le nom de "poubelle", et on crée des décharges à ordures, la décharge sauvage a été la première destination des déchets humains, c'est le moyen le plus simple et le plus économique d'élimination des déchets. Ces décharges n'étaient pas suivies ni contrôlées et ne disposaient pas d'infrastructures garantissant la maîtrise des émissions liquides (lixiviats) et gazeuses (biogaz).
Actuellement les décharges sauvages sont transformées en décharges sanitaires qui sont Centres de Stockage des Déchets (CSD) ou centre d'enfouissement technique (CET). Les décharges contrôlées ou CET sont des installations qui servent à l'élimination des déchets solides à long terme. Elles sont conues et exploitées pour protéger l'environnement contre la contamination. Ces déchets doivent être stockés séparément en fonction de leur état physique, de leur conditionnement et de leur nature chimique, il existe trois classes de décharges :

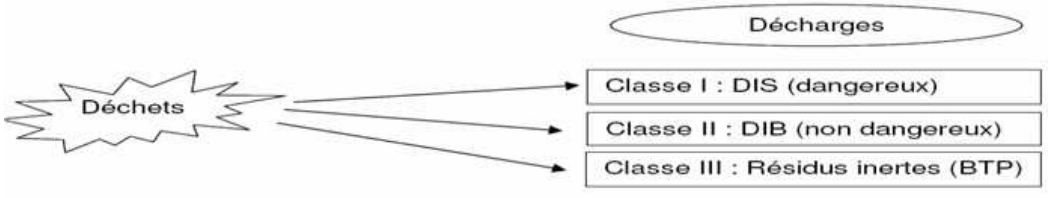

FIG. 4.13 – Les centres de stockage

L'aspect et le fonctionnement du CET

Il s'agit d'alvéole ou un casier, comme on voudra l'appeler, de la grandeur d'un terrain de football environ, creusé sur plusieurs mètres de profondeur dans lesquelles

ont été enfouis des déchets solides.

FIG. 4.14 – Décharge contrôlée

L'enfouissement s'agit de disposer les déchets par des couches successives après les avoir compactées pour éviter les vides importants favorisant les risques d'incendie et la prolifération des rats, mais sans excès afin de ne pas s'opposer au passage de l'air nécessaire à la fermentation aérobie. Ces couches seront inclinées pour faciliter le ruissellement des eaux à la surface de la décharge et éviter la percolation des eaux au sein des déchets. Enfin ces couches de déchets doivent être régulièrement recouverts par une couche de sol [32]. Cela réduit les odeurs, le transport des déchets sauvages légers par le vent (films plastiques, papier, etc.), l'attrait pour les animaux (oiseaux, rats, mouches, ...) ; et les sites doivent être clôturés et l'accès limité par une barrière comme il montre dans la figure -4.15- [24], [32].

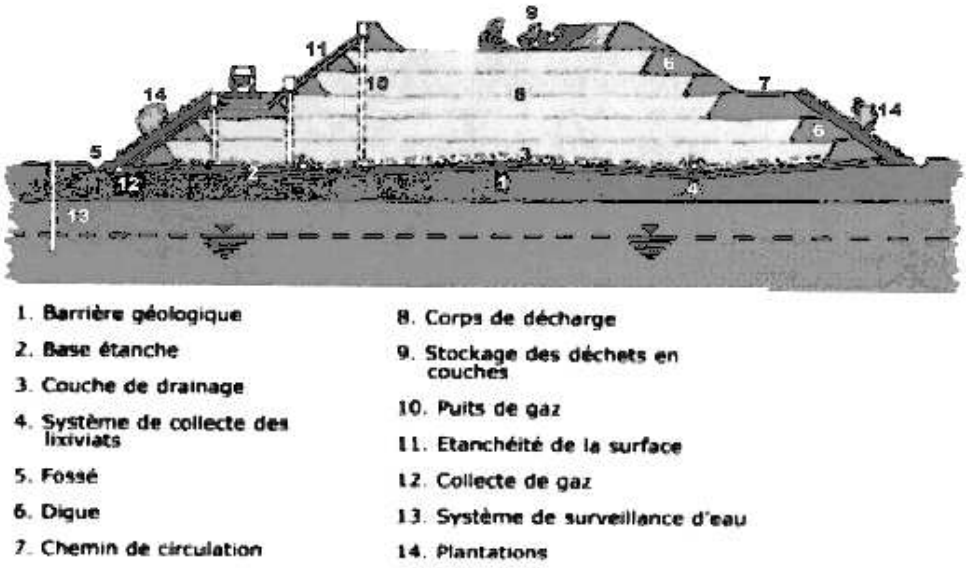

FIG. 4.15 – Exploitation d'une décharge contrôlée

Le fond de la décharge est recouvert d'un matériau imperméable, drainage afin d'empêcher le lixiviat de s'infiltrer dans le sol et de contaminer les eaux souterraines. Cette couche est souvent faite d'argile compactée ou par un matériau synthétique - PEHD (polyéthylène haute densité)- qui empêche l'eau de passer [32].

Lorsqu'une décharge est pleine et qu'elle est mise hors service, on la recouvre d'une couche d'argile compactée ou d'une membrane synthétique afin de minimiser l'infiltration de l'eau de pluie ou de neige dans les déchets recouverts et de produire de lixiviat, et à contenir les fuites de biogaz ; mais surtout d'isoler le massif de déchets de l'environnement extérieur. Cette couverture a une pente d'au moins 5%, favorisant l'évacuation de toutes les eaux vers le fossé latérale de collecte [32].
Une couche de sol fertile est placée sur tout le site et la zone est souvent enherbée afin de créer un paysage agréable à l'oeil.

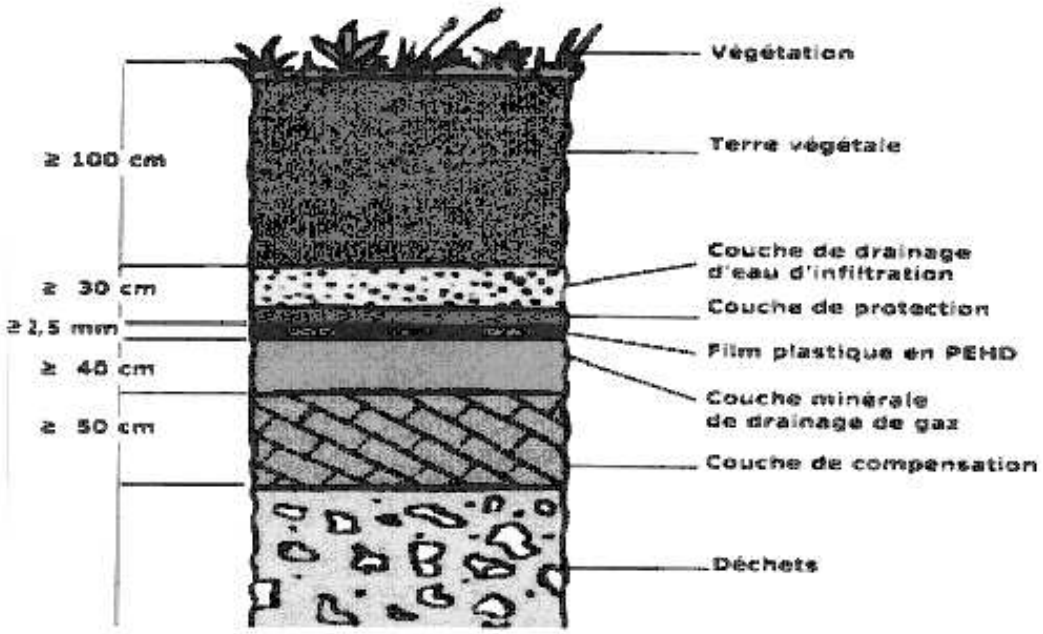

FIG. 4.16 – Système d'étanchéité de surface

De nombreux sites de décharges ont été convertis en parcs, en pistes de luge, en terrains de golf ou autres sites utiles.

Lixiviat et biogaz

Lixiviat

Le lixiviat est le jus de décharge et il est un liquide toxique lié notamment à la dégradation de la matière organique qui se forme lorsque l'eau s'infiltre dans les déchets d'une décharge.
Le danger que le lixiviat entre dans les eaux souterraines ou dans les eaux de surface est particulièrement grave. En effet, l'eau contaminée posera un danger pour la santé des animaux et des végétaux qui dépendent de cette ressource, il peut même toucher l'eau potable.
Pour minimiser les risques pour l'environnement et la santé causés par le lixiviat, il consiste à minimiser la quantité de lixiviat produite. Etant donné que le lixiviat se forme lorsque l'eau vient en contact avec les déchets contenus dans la décharge, il est important alors de limiter la quantité d'eau (pluie ou de neige) qui y entre.
Il faut aussi tenir les eaux souterraines à l'écart de la décharge en s'assurant que la base des déchets se trouve bien au-dessus du niveau maximum annuel de la nappe phréatique et on tapissera le fond de la décharge d'une couche d'argile de faible perméabilité ou par une membrane synthétique.

Dans certaines grandes décharges, le lixiviat est produit en quantités suffisantes, ce qui nécessite un système de collecte du lixiviat (des tuyaux, en PEHD ou en céramique). Il s'agit d'une série de tuyaux situés en ligne droite au fond du casier et installés entre les déchets et la couche d'argile ou la membrane synthétique. Le lixiviat qui est capté et acheminé vers un bassin ou un puits de stockage à travers des collecteurs et traité dans une station de traitement avant de le rejeter dans l'environnement.

La figure suivante donne une représentation schématique d'un système d'étancheification minérale pour la base et pour la surface de la décharge.

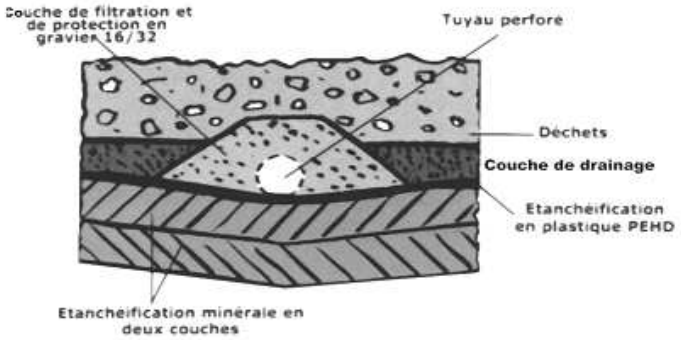

FIG. 4.17 – Etanchéité minérale du fond et drainage des eaux

Biogaz

Le biogaz est un mélange de gaz générés à la suite de la décomposition organique des déchets enfouis, ces gaz d'enfouissement provenant des décharges municipales contiennent environ 50 % de méthane (CH_4) et 50 % de dioxyde de carbone (CO_2), ainsi que quelques composés à l'état de trace [33], [23]. Le potentiel du méthane, en ce qui a trait au réchauffement de la planète est 21 fois plus grand que celui du CO_2. Le biogaz est récupéré à l'aide de tuyaux collecteurs (des drains) placés à l'intérieur des décharges. Le gaz d'enfouissement est alors brûlé en torchère ou valorisé en tant que combustible énergétique pour être utilisé comme chaleur ou en électricité. La récupération totale du biogaz sur une décharge est assez difficile et nécessite des installations performantes.
La combustion permet, en plus de produire de l'énergie renouvelable, de convertir le méthane en CO_2, un gaz moins dommageable et permet en outre d'éliminer les problèmes d'odeur et de détruire les contaminants.

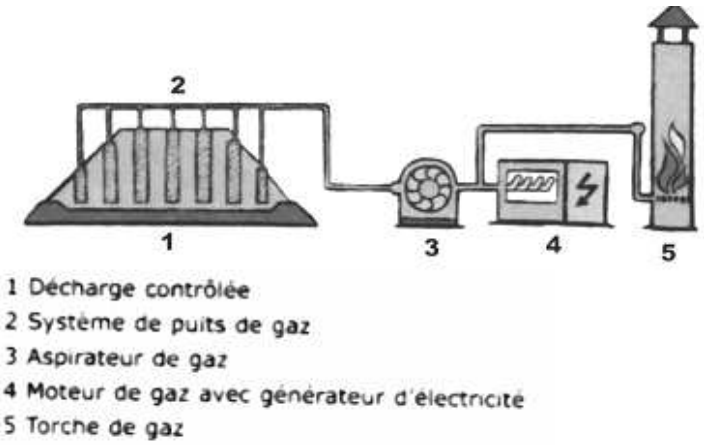

FIG. 4.18 – Système de traitement des gaz de décharge -biogaz-

4.6 Comparison des techniques

Chaque maillon de la chaîne de traitement doit viser la réduction maximale des flux de déchets au maillon suivant. Mais il est clair qu'aucune de techniques de traitements ne peut résoudre elle seule le problème de déchets solide. Au stade final les quantités à enfouir dans la décharge seront minimales.
Alors aucune méthode n'est mieux qu'une autre pour la gestion des déchets. Il faut plutôt que chaque collectivité choisisse l'option qui pourra le mieux répondre à ses besoins.

Le recyclage, le compostage et la digestion anaérobique peuvent diminuer sensiblement la quantité des déchets solides. Mais il reste, selon les cas, entre 50 et 80% de la masse à traiter par enfouissement ou par voie thermique. Mais l'élimination par enfouissement sanitaire ou par incinération doit être la solution de dernier recours au regard de la disposition des déchets solides.
Avant d'enfouir ou d'incinérer un déchet, il faut d'abord examiner toutes les possibilités de réemploi, de recyclage ou de valorisation. Lorsqu'il n'existe aucune autre solution viable, on peut alors envisager l'élimination sécuritaire des déchets solides.
Les différentes techniques précédentes présentent des avantages et des inconvénients les unes par rapport aux autres.

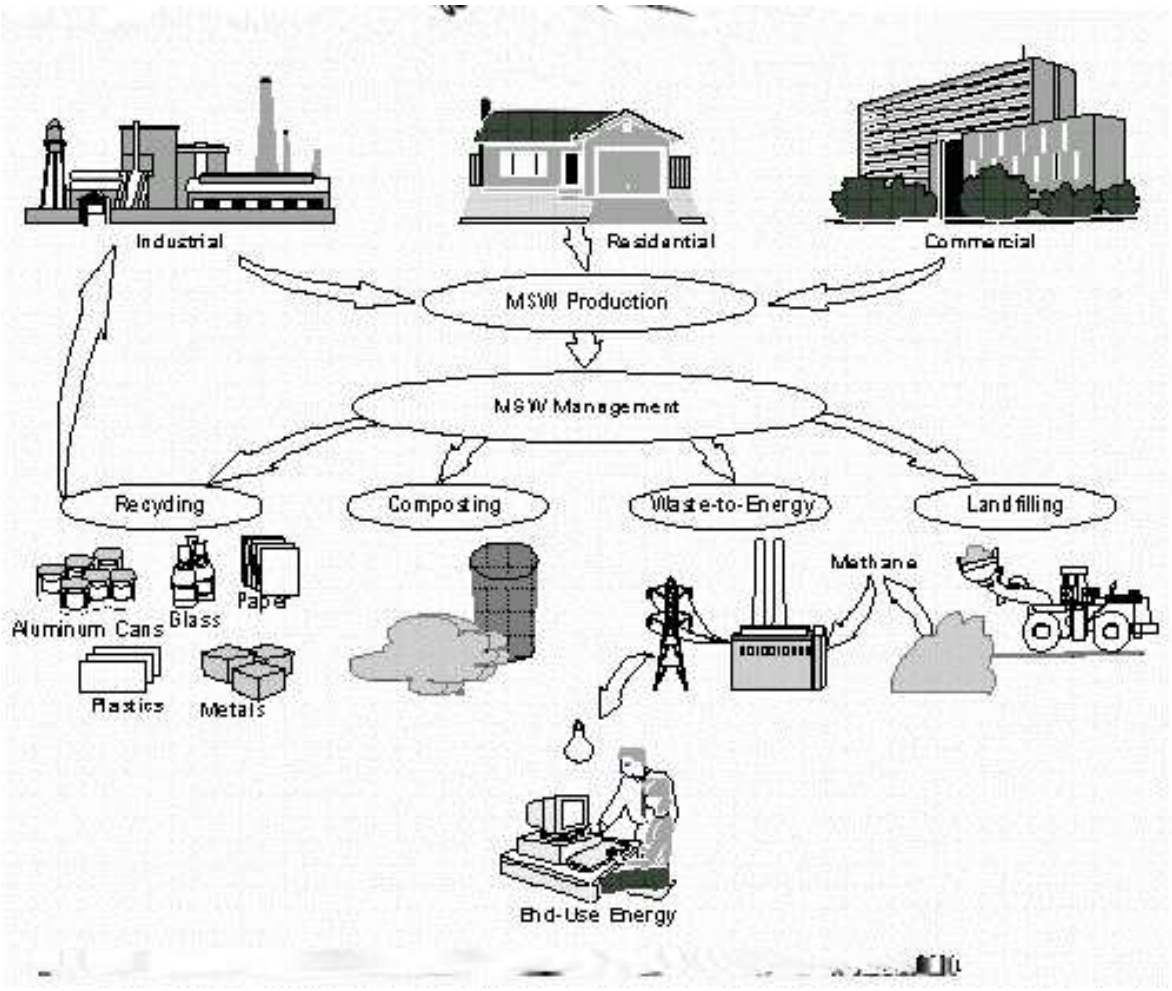

FIG. 4.19 – La gestion des déchets solides

Chapitre 5

Les déchets solides en Algérie

5.1 Présentation de l'Algérie

5.1.1 Situation de l'Algérie

L'Algérie est un pays d'Afrique du Nord appartenant au Maghreb. Sa capitale Alger est située à l'extrême nord-centre, sur la côte méditerranéenne.
L'Algérie constitue un pentagone de 2 381 740 km^2, dont 85% de désert dans sa partie sud, il offre une façade maritime de 1 200 km bordant la mer Méditerranée, situé à l'extrémité Nord du continent Africain et au sud-ouest du bassin méditerranen. Il partage des frontières terrestres avec la Tunisie au nord-est, la Libye à l'est, le Niger au sud-est, le Sahara Occidental, le Mali, la Mauritanie au sud-ouest, et enfin le Maroc à l'ouest.

FIG. 5.1 – L'Algérie

Les wilayas, classées par leur indicatif, sont présentées dans le tableau 5.1.

5.2 Energie renouvelable en Algérie

- L'Algérie a-t-elle les moyens de ses ambitions en matière de développement des énergies renouvelables, solaire, éoliennes et autres ?

- Notre pays participe-t-il à la compétition mondiale dans ce domaine ?

A ces deux questions, le gouvernement algérien a decrété un important décret sur la diversification des énergies, cette loi qui encourage la production et l'utilisation des énergies renouvelables en Algérie par de nombreus mesures dans une vision globale du développement durable surtout avec les scénarios énergétiques dans le futur avec l'épuisement du pétrole dans le monde au cour ce siècle.

Les avantages de l'énergie renouvelable en Algérie

L'utilisation des énergies renouvelables en Algérie constitue plusieurs avantages :

- Les énergies renouvelables sont non polluante et son utilisées pour compléter les combustibles fossiles et l'énergie nucléaire non renouvelables du fait de leur caractère inépuisable ;
- Le développement d'utilisation d'énergie renouvelable en Algérie et au Sud en particulier sera une stratégie d'intégration de toute la région dans une économie qui crie la richesse et le développement du cadre de vie des habitants ;
- L'utilisation des énergies renouvelables peut aussi être un facteur de création d'emplois, vue les potentiels énormes et des retombées positives en matière d'équilibre régional ;
- Il est souligné que le dispositif offre l'ancrage juridique et l'opportunité à nos chercheurs, ingénieurs et techniciens de s'investir dans la recherche et le développement des énergies nouvelles et valoriser ainsi le potentiel scientifique et technologique du pays.

Obstacle et empêchement de généralisation d'énergie renouvelable en Algérie

L'énergie renouvelable en Algérie rencontre des obstacles qui empêchent l'utilisation, comme :

- Le coût qui est toujours élevé des équipements ;
- Absence des usines de fabrications des panneaux solaires ;
- Absence d'information sur les avantages des énergies renouvelables (publicité, documents audio visuels, journaux spécialisés) ;
- Manque d'investissements privés dans le domaine.

TAB. 5.1 – Potentiel solaire en Algérie

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/m^2/an)	1700	1900	2650

5.2.1 L'énergie solaire en Algérie

L'Algérie dispose des gisements solaires les plus élevés au monde, la durée d'insolation sur la quasi totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures aux hauts plateaux et Sahara [34], [35].
Le tableau 5.1 indique le taux d'ensoleillement pour les régions de l'Algérie.

Ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable dans ces régions, s'il est exploité de manière économique.

Le volet de l'énergie solaire le plus utilisé dans notre pays est le solaire photovoltaïque, le volet solaire thermique reste toujours au stade d'expériences.
La division de l'Energie Solaire Photovoltaïque, issue du Département Energie Solaire du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER), sis Bouzaréah - Alger a pour principale mission, la maîtrise des dispositifs et des systèmes photovoltaïques nécessaires, pour assurer la conversion de l'énergie solaire radiative en énergie électrique directement utilisable pour pompage de l'eau, production de froid, éclairage domestique et public, alimentation énergétique pour les télécommunications, électrification rurale, etc.

FIG. 5.2 – Installation de chauffage solaire collectif 1500 litres du CDER à Bouzareah, Alger

Au sud algérien les premières expériences pour la transformation directe des radiations solaires en électricité par le biais de modules photovoltaïques ont été effectuées au début des années quatre-vingt, où la première station d'énergie solaire a été installée à Melouka par une société du royaume de Belgique [36].
Dernièrement, en trouve que la Station d'Expérimentation des Equipements Solaires

en Milieu Saharien (SEESMS) se situe à Adrar, qui est la région la mieux ensoleillée d'Algérie, où on trouve plusieurs installations [36] :

- 02 centrales photovoltaïques ;
- 20 Chauffes-eau solaires ;
- 03 relais de télécommunication (PTT) ;
- 28 stations de pompage.

5.2.2 L'énergie éolienne en Algérie

L'Algérie a un régime de vent modéré de 2 à 6 m/s [35] qui peut être exploité pour la production de l'énergie électrique sur des sites isolées et éloignés, où il ne peut y avoir de raccordements au réseau électrique à cause de leur coût.
L'installation est facile et l'entretien est possible. Plusieurs éoliens sont installés surtout dans le sud ou les vitesses du vent sont plus élevées que celles du Nord, plus particulièrement le Sud-ouest ou les vitesses peuvent dépasser 4 m/s, comme 5 m/s dans la région de Tindouf [35]. Les turbines éoliennes qu'on peut utiliser pour le développement du sud algérien sont à petite échelle, où le coût d'installation est abordable.
L'Algérie présente un potentiel éolien considérable, ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux et le Sahara.
La première expérience de pompage d'eau avec un éolien en Afrique a été effectuée à Adrar qui se trouve dans un couloir de vent de 6 m/s au ksar sidiaissa, pour l'irrigation de 50 Hec [36].

FIG. 5.3 – Système hybride pour le pompage de l'eau - Bou-Ismail - Tipaza

5.2.3 L'énergie géothermique en Algérie

L'Algérie dispose de nappes et de sources d'eau chaude dont les températures s'échelonnent entre 20°C et 98°C [35].
Au Nord il existe environ 200 sources thermales, dont la température varie de 22°C

à 90°C, et au bassin sédimentaire du bas Sahara compte d'énormes réserves d'eau chaudes varie de 50 °C à 56 °C. Il convient de signaler l'existence de source à hautes températures pouvant atteindre 118°C à Ain Ouelmen et 119°C à Biskra [35].
On voit donc que le potentiel géothermique existant dans notre pays est très fort, on se propose donc de l'exploiter et de le valoriser. Au sud algérien, il existe plusieurs sources à des profondeurs variant de 80 mètres dans la région d'El Meni'a à 1500m à Touggourt, présentant une température de 40 à 60°C, ce qui donne de grandes possibilités pour le chauffage des serres. Et à Hammam Meskoutine (W Guelma), la température s'échelonne entre 45°C et 98 °C où une installation assure le chauffage de serre [35].

FIG. 5.4 – Chauffage des serres par énergie géothermique - W. Touggourt

5.2.4 L'énergie hydraulique en Algérie

L'Algérie étant un pays semi-aride, on évalue les ressources utiles et renouvelables en eau de l'ordre de 25 milliards de m^3. Actuellement 103 sites de barrages ont été recensés, plus de 48 barrages sont en exploitation et 300MW d'énergie est exploité actuellement [35], [36]. D'autres projets ont été lancés ces dernières années sur la cote algérienne pour le dessalement de l'eau de mer et production électrique, comme le projet porte sur une centrale électrique d'une puissance de 300 MW couplée à une unité de dessalement d'eau de mer, de 90.000 m^3/jour en Alger [36].

5.2.5 L'énergie de la biomasse en Algérie

L'énergie de la biomasse, ou bioénergie, est l'énergie qui est extraite des matières organiques non fossiles comme le bois, la paille, les huiles, les déchets végétaux des secteurs forestie, ordures ménagères, etc., cette énergie reste la principale source d'énergie dans beaucoup de pays en voie de développement.
Pour notre pays, très peu d'intérêt a été apporté à cette énergie malgré les ressources importantes et les applications réussis qui ont réalisées à l'Institut National Agronomique d'El Harrach et au Centre de Développement des Energies Renouvelables â travers la mise en place de deux installations expérimentales à Béchar et à Ben Aknoun pour l'étude de la production de biogaz à partir les bouses de vaches [35].

5.3 Déchets solides en Algérie

5.3.1 Introduction

La réalité algérienne est marquée par un accroissement des flux de déchets conjugués à une poussée démographique et une saturation des infrastructures urbaines d'élimination des déchets.
L'augmentation de déchets solides est non seulement liée à l'accroissement démographique mais beaucoup d'autres facteurs, déterminent aussi les quantités et la composition des ces déchets comme l'éducation, le niveau de vie, la structure urbaine, l'infrastructure de recyclage, le système de collecte, le développement industriel, économique et social, les conditions climatiques, etc.

5.3.2 Evaluation des déchets en Algérie

On peut estimer la production quotidienne et annuelle de déchets à partir du taux moyen de déchets produits par personne par jour.
Un Algérien produit quotidiennement en moyenne 0,5 à 0,7/kg de déchets solides par jour mais dans les grandes villes comme Alger, un citoyen génère environ 0,9 à 1,2/kg de déchets par jour [37].
Cette production des déchets solides doit faire face aujourd'hui l'Algérie à une augmentation de la quantité de ces déchets qui ne cesse de s'accentuer avec un tonnage est supérieur à 8.5 million tons en 2002 [37].

5.3.3 Différents types de déchets solides en Algérie

Les déchets solides en Algérie ont connu un développement remarqué tant dans sa diversité que dans sa capacité, comme, les ordures ménagères, les déchets industriels et de commerces, banals ou spéciaux, des activités de soins, etc.

Déchets ménagers

Les ménages rejettent chaque jour des tonnes de déchets, appelés urbains, domestiques ou encore ordures ménagères. Reflets de la consommation courante, il s'agit de nourriture ou de produits de la vie quotidienne, d'emballages divers, de textiles et d'objets encombrants. A cela s'ajoutent les déchets dits assimilables aux ordures ménagères provenant des industries, des hôpitaux, etc.
En Algérie les déchets solides sont essentiellement composés par ces ordures ménagères avec un tonnage est supérieur á 5.2 million tons/an, ces derniers sont indiquées dans le tableau 5.2 [38].

On remarque que les quantités de déchets ménagers produites pour Alger sont composées essentiellement de matières organiques (épluchures, restes d'aliments) plus

TAB. 5.2 – Production des déchets ménagers

Types de déchets	Quantité en %
Matières organiques	73,74
Métaux	1,9
Papier	17,4
Plastique	2,5
Verre	0,96
Divers	12,5

TAB. 5.3 – Quantité de déchet produite par secteur en Algérie

Secteur d'activité industrielle	Tonne / an
Ind. sidérurgiques, métallurgiques, mécaniques, électriques	955.700
Déchets des mines et carrières	212.000
Déchets résultants de la production d'énergie (hydrocarbures)	49.700
Cuirs et chaussures	12.300
Textiles, bonneterie, confection	4.400
Chimie, caoutchouc, plastiques	3.200
Bois, papier, imprimerie	2.700
Industries alimentaires, tabac, allumettes	2.100

de 70%, qui sont une source importante pour l'énergie renouvelable, par contre, la papier et le plastique connaît une augmentation sensible.

Déchets industriels

Il existe en Algérie plusieurs entreprises industrielles génirant des déchets polluantes comme l'industrie de base mécanique, sidérurgie, métallurgie, centrales de production d'électricité, industrie agro-alimentaire, industrie textile et cuirs, unités de fabricants de ciments, de plâtre et de chaux, industrie de gaz liquéfié, raffineries de pétrole, industrie de la transformation du bois, industrie chimique et pharmaceutique, etc. Ces entreprises représentaient l'essentiel des entreprises polluantes sur le territoire national, et les quantités de déchets produites par ces secteurs sont indiquées dans le tableau 5.3 [38].

Actuellement, la production de déchets solides industriels en Algérie étaient évaluées à 352.627 tonnes/an [39]. Elles sont produites essentiellement dans la Wilaya d'Alger, tels que la raffinerie d'Arzew 66 .000 t/an, la zone industrielle d'Es-Senia à Oran, par exemple, produit à elle seule 10000 t/an, le complexe électrolyse de zinc de Ghazaouet 18500 t/an de déchets générés, le complexe mercuriel ENOF de AZZABA, situé dans la wilaya de skikda détient 01 million de tonnes de déchets de mercure, qui ne sont que des exemples parmi tant d'autres à Bejaïa, Tlemcen. Asmidal et Sider à Annaba,

etc. [39], [38].
Ces déchets sont généralement stockés sur les lieux de production sans tenir compte des normes et règles environnementales nationales ou internationales. D'après Chérif Rahmani ministre de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, l'Algérie stockerait plus de 2.000.000 de tonnes de déchets industriels [39], qu'ils représentent un danger réel pour l'environnement et la santé publique.
Certains déchets industriels peuvent être une source intéressante de valorisation. Les autres doivent être détruits soit par incinération s'ils sont combustibles, soit par mise en décharge suivant les techniques appropriées. Pour certains déchets toxiques, des traitements préalables seront parfois nécessaires.

Déchets inertes

Selon les estimations effectuées par une étude du CNERIB (Centre National d'Etude et de Recherche Intégrée en Bâtiment), l'Algérie produirait plus 2,5 millions de tonnes de déchets inertes ; dont près de 12% d'acier et 40% de béton, déversés dans des dépotoirs sauvages et des zones de gravats couvrant des dizaines d'hectares de terres agricoles [38],.
Ils proviennent le plus souvent des chantiers de construction ou encore de la transformation des combustibles et de l'énergie. Il s'agit :

- Des déblais et gravats : c'est-à-dire les terres et les éléments extraits par fouille du sous- sol et les déchets provenant de la démolition des bâtiments ;
- Les cendres et les mâchefers refroidis ;
- Les boues pelle tables non toxiques, en provenance de stations d'épuration et les matières de vidange d'origine domestiques.

Les déchets inertes de la métallurgie, les déblais et gravats, les cendres et les mâchefers peuvent être utilisés comme matériaux de couverture.

Déchets spéciaux

Les déchets spéciaux sont définis comme étant "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 ". Ces déchets spéciaux sont considérés comme dangereux quand "par leurs constituants ou par les caractéristiques des matières nocives quils contiennent, ils sont susceptibles de nuire à la santé publique et/ou à l'environnement ".

Les déchets spéciaux peuvent être répartis en déchets spéciaux dispersés et déchets d'activité de soins.

TAB. 5.4 – Quantités des déchets spéciaux dispersés en Algérie

Déchets	Quantité en tonnes/ an
Déchets d'origine minérale	55.000
Boues minérales	18.000
Résidus de pétrochimie et de cokéfaction	58.000
Boues polluées au zinc	25.000
Solvants organiques, résidus de peinture	4.000
Boues métalliques et électrolytiques	2.000
Résidus de fabrication	2.500

A - Déchets spéciaux dispersés : Les déchets dangereux constituent une menace sérieuse pour l'environnement et la santé publique en contaminant les eaux superficielles et souterraines particulièrement lorsque les déchets sont stockés dans des conditions précaires.
En Algérie les déchets dangereux estimés à plus de 360.000 tonnes par an [38], ce sont les déchets qui sont situés au niveau le plus élevé des échelles de toxicité tels que, les produits pharmaceutiques périmés, les déchets issus du processus de fabrication de médicaments, des laboratoires, de l'administration et commerce, les déchets d'amiante, les pesticides périmés, les boues de pétrole qui proviennent non seulement de l'industrie, mais aussi de certaines activités urbaines et agricoles, les piles qui contiennent des métaux lourds, les résidus de peintures et de désinfectants, les acides, les huiles usées, les tubes fluorescents, etc.
Cette quantité globale montre dans le tableau 5.4.

Ces déchets doivent être séparés à la source, c'est-à-dire dans les ménages, institutions et établissements et collectés de façon sélective.
Plusieurs sites contaminés par ces déchets dangereux ont été recensés à travers notre pays. La moitié de ces sites est concentrée dans la région du Centre, le reste est partagé entre les régions est-sud-est et ouest-sud-ouest. La wilaya de Laghouat se classe en tête de liste des wilayas les plus atteintes et la plus touchée elle est suivie de Mostaganem, Chlef, Tizi Ouzou, Alger, Sidi Bel Abbs, Mascara, Tipaza et Aïn Témouchent [39].

B - Déchets d'activité de soins : Ils correspondent à tous les déchets issus des activités de diagnostic, de suivi et de traitement préventif ou curatif, dans les domaines de la médecine humaine et vétérinaire. La quantité totale de déchets produits par les établissements hospitaliers en Algérie s'élève à environ 125.000 tonnes/an [39], elles sont rejetés par les hôpitaux, les cabinets médicaux, les laboratoires d'analyses ou par les particuliers qui se soignent ou suivent des traitements à domicile. Ce sont des pansements souillés, des aiguilles d'injection, des flacons aux contenus divers, des médicaments périmés et autres déchets médicaux, ainsi que les déchets issus de la production pharmaceutique.

TAB. 5.5 – Quantité de déchet produite par secteur en Algérie

Types de déchets hospitaliers	Quantités en Tonnes/An	Quantités en %
Déchets hospitaliers ordinaires	67.000	70
Déchets hospitaliers infectieux	22.000	24
Déchets hospitaliers toxiques	29.000	4,8
Déchets hospitaliers spciaux	7.000	1,2

La composition moyenne des déchets hospitaliers se répartissent comme dans le tableau 5.5.

Ces différents déchets hospitaliers sont des vecteurs de maladies et d'épidémies. Ils sont classés dangereux à cause de leur composition et de leur nuisance, leur traitement requiert des procédures spécifiques depuis le ramassage jusqu'à l'incinération au niveau des hôpitaux.

D'aprèt les enquêtes réalisées à Oran et à Alger (ANPE-1992), on a estimé que les matières organiques représentent plus des 2/3 de la masse totale des déchets.

5.3.4 Problèmes de déchets solides en Algérie

L'Algérie vit une intensification de pollutions et une prolifération des déchets urbains et industriels, et ce malgré l'adoption de Loi 83 - 03 du 5 février 1983 relative à la Protection de l 'Environnement par la lutte contre toute forme de pollution et nuisance et amélioration du cadre et de qualité de vie.
A cette croissance et cette évolution des déchets et avec l'absence d'une politique rigoureuse d'élimination des déchets, ainsi qu'en l'absence d'installations de traitement des déchets solides, absence de collecteurs et de transporteur, près de 3000 décharges sauvages sont dénombrées sur le territoire algérien.

FIG. 5.5 – Décharge à ciel ouvert en Algérie

La précarité de cette situation présente des risques pour l'environnement et pour la santé publique par [37] :

- Un dépôt anarchique des déchets ;
- Un dégagement d'odeurs, de fumées désagréables et des gaz à effet de serre ;
- Une pollution des eaux de surfaces et souterraines ;

- Une pollution des sols ;
- Une prolifération d'insectes, de rongeurs et d'animaux errants ;
- Une propagation des maladies et des épidémies ;
- Polluant, ainsi, l'atmosphère, l'eau potable et les eaux de rivières et marines ;
- Centaines d'hectares agricoles sont ainsi contaminés et rendus stériles de manière parfois irréversible ;
- L'autre aspect du problème des décharges sauvages défigure les paysages et l'environnement urbainet surtout dans les régions touristiques comme Tlemcen, où les terres complètement ravagées par les déchets de plastiques et d'autres ordures mal récupérés. Surpris, lors de notre passage à Ghazaouet par Nédroma, le même décor se dessine sur le fond des vallées.

Nous irons donc vers une détérioration irréversible de l'environnement où la vie des humains, des animaux et des plantes est menacée.

Les décharges en Algérie

On cite deux grandes décharges publiques qui sont considérées comme le réceptacle collectant presque tous les déchets solides d'Alger, qui sont les décharges de Ouled Fayet et de Oued Smar.

Les riverains qui habitent à presque 1 km de ces décharges publiques et qui utilisent les eaux des puits boivent une eau hautement polluée et très dangereuse pour leurs santés et les agriculteurs arrosent leurs terres avec une eau suspecte. Le lixiviat de la décharge se retrouvent également dans les eaux du puits d'un agriculteur situé à 200m de la décharge et donc, les nappes souterraines sont contaminées, comme l'illustre la figure-5.6- pour la décharge des déchets solides de Ouled Fayet.

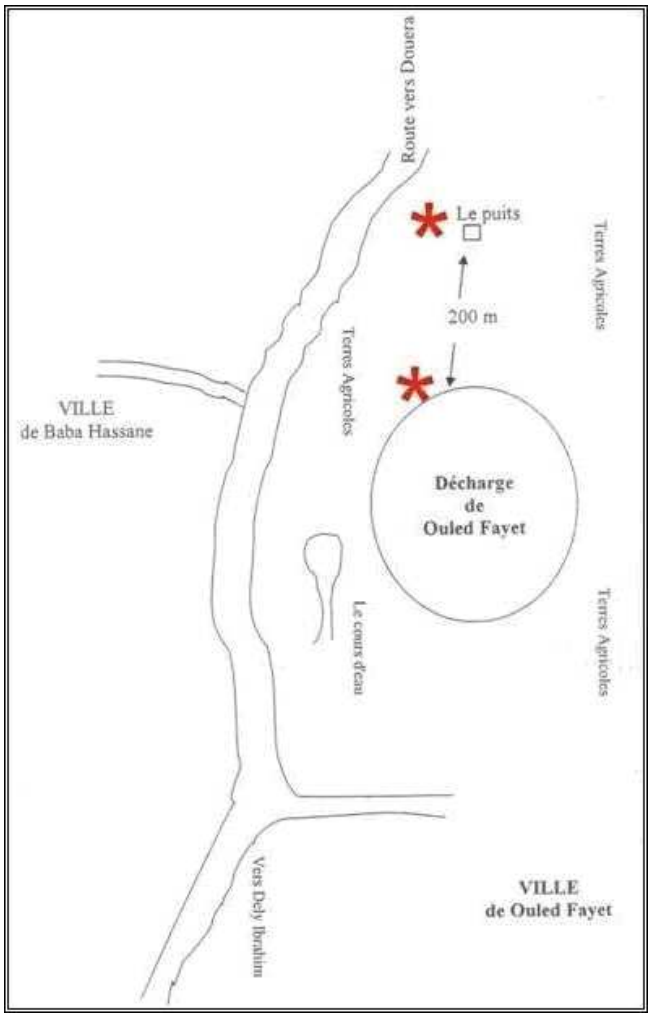

FIG. 5.6 – Décharge de Ouled Fayet

Ainsi, un grand nombre de sites sont contaminés par les déchets industriels faute d'une politique rigoureuse de stockage. Oued el Hamiz, Oued Elharrach, Oued essoumam.etc, sont des lieux favorables pour certains industriels qui rejettent leurs déchets toxiques sans se soucier des conséquences. Les habitants de cette région ont remarqué qu'un type de poisson, le bar, flottait sur le rivage et certaines composées chimiques dangereuses se retrouvent en pourcentage élevé à la fois dans les puits.

5.3.5 Gestion des déchets solides en Algérie

En dépit des gros problèmes de pollution de déchets solides dans notre pays, le gouvernement Algérien a élaboré une stratégie d'action qui s'articule autour de plusieurs axes permettant la prévention de pollution liée aux déchets solides, en plus de conserver des sources d'énergie non renouvelable par l'utilisation des gaz d'enfouissement et de la méthanisation pour produire de l'énergie.

Le traitement des déchets est une nécessité pour les raisons suivantes :

- Engagements de l'Algérie à la Convention Cadre sur les Changements Climatiques (CCCC) qui recommande de réduire les émissions des gaz à effet de serre dûx aux activités humaines et en particulier la production des déchets ;
- La protection de la santé à cause des diverses nuisances liées aux déchets ;
- La lutte contre la dégradation du sol et des ressources en eau par les déchets ;
- La maîtrise de la gestion des déchets qui représentent un grand gisement d'économie à travers le recyclage et la valorisation ;
- La création d'emplois dans la filière "déchets" ;
- Transformer une partie des déchets en compost représente une solution pour l'enrichissement des sols agricoles qui sont pauvres en matières organiques ;
- Récupérer le méthane produit par les déchets enfouis et de le brûler et l'utiliser comme une énergie renouvelable.

La gestion des déchets solides en Algérie rencontre de grandes difficultés, la lenteur administrative, le manque de contrôle, l'absence d'information, le non respect de la réglementation en vigueur et la mauvaise exploitation des décharges communales.

5.4 Gestion de déchets solides de la ville de Batna

5.4.1 Etude monographique de la ville de Batna

Historique

Batna fut fondée en 1844 sur un terrain marécageux à partir du bivouac du colonel Buttafoco. Ce lieu était connu sous le nom de " Batna (05) ". Elle est ancrée dans la région des Aurès, à la jonction del'Atlas tellien et de l'Atlas saharian avec une supercie de 12192 km^2.

FIG. 5.7 – Localisation de la wilaya de Batna

5.4.2 Analyse quantitative et qualitative des déchets générés au niveau de la ville de Batna

Tri manuel des déchets

L'analyse de la composition des déchets de la ville de Batna a été effectuée le moi de mai 2002 dans le cadre de l'étude mené par le BET NEE en collaboration avec les services de l'APC et l'Inspection de l'Environnement [40].
Pour la réalisation de l'échantillon, un camion a été réservé pour collecter un échantillon représentatif. Ce dernier à collecter de chaque quartier un peu de déchets, pour avoir un échantillon qui caractérise réellement les déchets de la ville de Batna. Un échantillon de 200 kg a été extrait des déchets collectés, ensuite procédé au tri manuel et à la pesée de chaque composant de déchet. Les résultats du tri manuel effectué au niveau de la décharge sont illustrés dans le tableau 5.6 [40].

TAB. 5.6 – Les types des déchets produits pour la ville de Batna

Matières	KG	%
Matière organique	155	77,5
Papiers-carton	10	5
Plastique	8	4
Métaux	13	6,5
Textiles	6	3
Verre	2	1
Bois	4	2
Autre (pierres,...)	2	1
Total	200	100

Interprétation des résultats du tri effectué

- **Matières organiques :** Nous constatons que la matière organique prédomine toujours par rapport aux autres matières rencontrées dans les déchets urbains. Elle représente 77% des déchets triés. Ce fort pourcentage est du principalement à l'habitude culinaire des habitants qui se base sur les légumes frais ;

- **Papiers et cartons :** le pourcentage en papiers et cartons (5%) est moins élevé que celui enregistré dans les autres villes. Toutefois, la part de ce composant s'explique par le comportement de la consommation des ménages d'une part et l'existence d'une unité régionale de récupération, la GIPEC ;

- **Matières plastiques :** la part de matières plastiques comparativement aux autres années elle est élevée, cela s'explique par introduction du plastique dans les produits d'emballage, mais comparativement aux autres villes, il reste faible cela s'explique par l'existence d'une unité de recyclage (privé) de Barika qui récupere tous les plastiques ;

- **Verre :** La part du verre est faible par rapport aux autres composantes de déchets, cela s'explique par la diminution d'utilisation du verre pour les ustensiles de cuisines et aussi comme emballage pour certains produit (limonade, lait, huile, etc.) ;

- **Bois :** la part de déchets de bois reste faible pratiquement dans la composition des déchets de la ville. Le bois est faiblement représenté dans l'échantillon trié. La part observée (2%) concerne les restes de meubles et caisses jetés par les ménages Il faut noter les matières nobles telles que le bois se fait rare au niveau de la composition des déchets ;

- **Métaux :** La part des métaux est élevée par rapport à celle enregistrée dans

TAB. 5.7 – Quantité des déchets produite par la population de la ville de Batna

Commune	Batna
Population (2001)	263 615
Quntité générée (T/J)	146
Taux de collecte	70%
Quntité générée (Kg/Hab/J)	0,54
Quntité collectée (T/J)	110,5

la majorité des villes. Les métaux considérés regroupent essentiellement les emballages métalliques alimentaires.

Estimation des quantités de déchets générés par habitant

Pour déterminer la quantité de déchets générés par habitant, nous avons pris en considération des points essentiels, qui sont, la quantité totale de déchets collectés, et en Algérie les pratiques de consommation étant identiques pour la majorité des villes algériennes, nous considérons donc que les déchets dans notre zone d'étude auront une évolution similaire à ceux d'Alger : c'est-à-dire une croissance annuelle de 2.5%. En fonction de la capacité des camions affectés à la collecte des déchets solides au niveau de la ville, et des rotations effectuées par chaque véhicule à la décharge, nous avons estimé la quantité de déchets générée par la ville et par habitant et aussi selon l'évolution de la quantité de déchets dans le temps, Tableau 5.7 [40].

Les déchets collectés par les véhicules de l'APC concernent a la fois les déchets ménagers, les déchets d'abattoir, les déchets d'hôpitaux, les déchets commerciaux et les balayures des voies publiques.

Inventaire des déchets commerciaux

Les déchets commerciaux sont :
- Les papiers, plastiques et des cartons provenant des commerces (emballages de marchandises) ;
- Les déchets organiques qui constitués essentiellement de légumes avariés provenant du marché et des différents lieux de restauration et des hôtels.

Inventaires des déchets spéciaux

La gestion des déchets spéciaux dans la commune de Batna connaît plusieurs défaillances qui peuvent avoir des répercussions néfastes sur la santé publique. Cette situation est appelée à être changée selon les dispositions de la nouvelle loi.

a)- Déchets des produits chimiques périmés : Des quantités importantes de produits chimiques périmés sont stockées au niveau de plusieurs sites à travers la wilaya (produits chimiques, pesticide, peinture, acides et base, etc.). Certains sont hautement toxiques nécessitant une prise en charge immédiate.
Le cadastre général des déchets dangereux en cours de réalisation et initié dans le cadre du projet contrôle de la pollution industrielle, permettra de recenser les sources de pollution, les stocks disponibles et la méthode d'élimination appropriée.

b)- Les huiles Askarel : Conformément à la circulaire inter-ministrielle de la 04/12/1985 relative au recensement des appareils électriques à ASKAREL, des visites ont été effectuées à travers la wilaya par l'inspection de l'environnement afin de recenser tous les secteurs détenteurs des équipements à ASKAREL et de voir l'état de ses derniers.
A travers la zone d'étude, il est constaté un nombre important de transformateur à base d'huile polychlorobypheinte. Ces derniers ont été commercialisés en Algérie sous différents noms (pyralène, clophène, apirolio, accolor, etc.). Il a été recensé à travers le territoire de la Wilaya environ 52 appareils électriques utilisant les huiles Askarels, ces appareils nécessitent une attention particuliere quant à leur stockage et leur entretien. Cependant, il reste toujours la non déclaration d'existence de transformateurs par certains acquéreurs.

c)- Déchets de l'abattoir communal : Les déchets issus de l'abattoir communal (environ 0.3 T/j) sont évacués actuellement au même titre que les déchets ménagers à la décharge actuelle après désinfection.
Cependant, le sang et les eaux de lavage sont évacués dans les réseaux d'assainissement constituant une atteinte à l'environnement et au cadre de vie des habitants.

Inventaires des déchets typiques issus du fonctionnement d'un hôpital

Les déchets hospitaliers regroupent tous les déchets produits dans les hôpitaux, les polycliniques, centres de santé, salles de soins et maternité. Ces déchets caractérisés par une très grande diversité, nous distinguons :

a) : Déchets ordinaires : Les déchets sans risques assimilables aux ordures ménagers. Ils comprennent surtout des déchets provenant des services de restauration et chambres et des services administratifs.

b)- Déchets infectieux ou septiques : Les déchets infectieux sont les seringues, les aiguilles, les lames de bistouris, les scalpels brisés et tout autre déchets piquant ou coupant. On peut citer aussi les gants, les pansements souillés, les masques, les blouses, le coton imbibé de sang, les déchets de chambres de malades isolés. Ce sont également tous les déchets contenant de fortes concentrations de microbes pathogenes, tel que les cultures microbiennes et les milieux biologiques. Les déchets de

blocs opératoires qui regroupent tous les déchets pathologiques et biopsidiques, ainsi que tout déchet taché de sang.

d)- Déchets toxiques : Ce sont les déchets chimiques et pharmaceutiques qui comprennent les résidus de produits pharmaceutiques et chimiques dans leurs emballages internes, ainsi que les médicaments périmés et les petites quantités de produits périmés avec leurs emballages internes.

Inventaire des déchets industriels

Batna constitue un pôle industriel important relativement à la région. Ce secteur industriel se caractérise par une croissance et une large diversification des branches industrielles. Cette croissance a été rendue possible grâce à l'action conjuguée de moyens structurants tel que la création de la zone industrielle, zone d'activités, disponibilité d'énergie, main d'œuvre, eau, matières première, infrastructure de transport (réseau routier, ferroviaire). Ce qui a généré des effets insoutenable.

Ces quantités de déchets sont en rapide croissances diluées dans l'environnement. Il résulte de cette situation la présence de dépôts et des décharges sauvages un peu partout dans les villes.

5.4.3 Situation de collecte, transport et de traitement des déchets générés par les activités humaines

Institution responsable de la gestion des déchets

L'état actuel de la gestion des déchets solides est du essentiellement à l'absence de stratégie tant au niveau national qu'au niveau local. Actuellement, la gestion des déchets solides de la zone d'étude est assurée par l'APC.
Le parc communal de l'APC de Batna dans ses attributions, la collecte, l'évacuation, le traitement des solides (ordures ménagères, carcasses, déchets encombrants, ferrailles,carton et papiers), il assure également les travaux de balayage, lavage, arrosage et enlèvement des détritus de toutes sortes jonchant les espaces publics (rues, trottoirs, places, carrefours), c'est à lui qu'il incombe également d'évacuer les boues et autres immondices obstruant les caniveaux ainsi que la bonne tenue des lieux de dépôt provisoires ou définitifs (décharge).

Système de collecte sélective des déchets valorisables et les moyens d'information

En Algérie, comme il y a quelques années dans les pays industrialisés, la collecte se fait de manière non sélective. Au niveau des foyers, on retrouve pêle-mêle dans le

sachet noire, dans le bidon multi-usage ou dans les conteneurs de volume variable, aussi bien les restes de la nourriture, les médicaments périmés, les doses métalliques que du papier/carton.
De nos jours, une gestion écologique des déchets avec retombée économique nécessite la mise en place d'un mode de collecte sélective des déchets.
Faisant appel à la séparation des déchets au niveau des ménages (acte volontaire du citoyen) et des principaux générateurs, la collecte sélectives nécessite la mis en place des moyens de collectes spécifiques pour des types de déchets bien déterminés. Elle permet de la récupération plus facile de produits ayant une certaine valeur et améliore les performances du compostage en séparant les éléments non fermentescibles gênants ou nuisibles.
Il s'agira de mettre à la disposition des usagers des conteneurs distincts placés à proximité des habitations (conteneurs pour verre, plastique, emballage,...), d'organiser le service d'enlèvement, et de mettre en place un service de tri et des entreprises de récupération, de recyclage ou de valorisation.
Sans l'existence de centres de recyclage et de valorisation, la collecte sélective n'est pas avantageuse.
Après la collecte sélective, de nombreux composant des déchets peuvent être réemployés pour la production de nouveaux produits. Cela permet de créer des circuits fermés de matériaux. Ces composants sont notamment les suivants : verre, papier et cartons, métaux usagés, aluminium, plastique, textiles, tubes lumineux, véhicules usagés, ...

Au cours des dernières décennies, de nombreux procédés de recyclage ont été mis au point pour chacun des matériaux cités ci-dessus. La mise en pratique de ces procédés a donné les résultas suivant :

- Economie de matières premières ;
- Réduction de la consommation d'énergie nécessaire à la production de nouveaux produits ;
- Diminution de la quantité de déchets à mettre en décharge ;
- Création de nouveaux secteurs d'économie offrant des emplois.

Sur la base d'un tonnage quotidien arrivant à la décharge de 146 T/j pour la ville de Batna, les quantités de déchets pouvant être revalorisées sont données dans le tableau.5.8 [40].

Les quantités de composants de déchets pouvant être récupérées pour une éventuelle transformation variables en fonction des matériaux.
Les quantités importantes sont observées pour le plastique, le papier/ carton et les métaux alors que le verre semble peu intéressant.
Il s'agit de produits résultant de la consommation quotidienne des ménages et des activités commerciales.
La part de matière organique constitue la quantité dominante générée par les ménages.
Les matières organiques soigneusement triées permettront aux ménages de fabriquer

TAB. 5.8 – Quantités des déchets pouvant être revalorisées de la ville de Batna

Composants	%	T/j	T/an	Récupération (T/an)
Mat. Org.	77,5	113,15	28287,5	7072
Papier Carton	5	7,3	1825	456
Plastique	4	5,84	1460	365
Métaux	6,5	9,49	2372,5	593
Verre	1	1,46	365	91

un compost domestique. Ce dernier trouvera son utilisation, comme fertilisant, au niveau des pratiques de jardinage et plantes ornementales.

Les déchets sont transportés vers la décharge (centre d'enfouissement technique). Il faut noter que la mise en décharge est le seul traitement préconisé au niveau de la commune de Batna. La commune de Batna ne dispose pas d'installation d'incinération, ni d'installation de compostage, ni même une déchetterie par contre elle compte un incinération de faible capacité au niveau de l'hôpital et une unité de récupération la GIPEC (papier, carton), cette unité collecte sur toute la région de l'Est.

5.4.4 Etude du site pressenti a recevoir la décharge contrôlée de la ville de Batna

Il est obligatoire de gérer les déchets dans les conditions respectueuses de l'environnement, la loi n°01-19 du 27 Ramadhan 1422 correspondant au 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et l'élimination des déchets à pour objet de fixer les modalités de gestion, de contrôle et de traitement des déchets. Dans cette perspective de réforme les autorités de Batna, veulent créer un centre d'enfouissement technique qui répond aux mieux aux impératifs d'hygiène et protection de l'environnement [41].

L'implantation d'un centre d'enfouissement technique en un lieu donné nécessite des conditions précises et limitatives aux propriétés du terrain, au respect de l'environnement et surtout en conformité avec la législation Algérienne en vigueur.
La difficulté majeure pour l'implantation d'un centre d'enfouissement technique, réside dans la rareté des sites potentiels. La recherche de sites pressentis pour un centre d'enfouissement technique pour la commune de Batna, a été effectué en présence des différents services de la Wilaya, environnement, agriculture, urbanisme, hydraulique, etc. Ces différents services ont prospecté ensemble aux alentour de la ville de Batna, six sites ont été retenu. Parmi ces six sites, un seul sera retenu sous réserve d'une étude d'impact.

Site de centre d'enfouissement technique

Le site choisi pour recevoir un centre d'enfouissement technique pour les déchets de la commune Batna, est localisé dans la commune de Batna et plus exactement au Sud-Ouest de la commune [41]. Le site est localisé au bas piedmont du djebel Ichali, il est pratiquement emmuré par le Djebel.

- **Commune** : Oued Chaâba ;
- **Lieu dit** : El-Biar à proximité des carrières ;
- **Superficie** : 22 hectares ;
- **Distance par rapport à la ville de Batna** : Situé au Sud-Ouest à 9 Km ;
- **Capacité du site** : importante ;
- **Accessible** : Terrain accessible par la route (RN°3) qui mène vers Ain-Touta ;
- **Topographie** : Terrain plat ;
- **Géologie** : Terrains caillouteux à tendance argileuse ;
- **Hydrologie** : Pas d'Oued à proximité du site, àl'exception de Chaabet ;
- **Milieu naturel** : Le site de la décharge est situé sur des terrains inculte à proximité d'un jeune reboisement.

Ce site de potentialités favorables d'aménagement de centre d'enfouissement technique de déchets durer au moins 20 ans.
Le volumes total des déchets sur la période de 20 ans est estimé à 102984,93 m^3, il est nettement inférieur au volume de la décharge qui lui est de 1250000 m^3. Donc le site choisi répond au besoins locaux pour une durée de 20 ans et plus [41].

FIG. 5.8 – Centre d'enfouissement technique de Batna

Le site de centre d'enfoulissement technique (El-Biar) est choisi pour ses nombreux avantages [41] :

- Le site a un sol approprié (sol marneux) ;
- La situation du site est favorable par rapport aux sources de production de déchets, la ville est à 6 Km ;
- Le site est parfaitement isolé des habitations puisque les premières habitations se trouvent à une distance supérieure à 500m, à vol d'oiseau ;
- Le site est jugé favorable par rapport aux vents car il se trouve protégé par Djebel Ichali, les vents dominants sont de direction Sud-Ouest ;
- Il se trouve à des distances réglementaires par rapport aux cours d'eaux ;
- L'accessibilité au site est aisée, il est à proximité d'un chemin vicinal qui est relié à la route nationale N°3 ;
- Une voie goudronnée en bon état, la RN qui relie Batna à Biskra ;
- Sur le plan faunistique et floristique le site se situe sur des terrains nus, la faible faune et flore qui y vite ne relèvent d'aucun intérêt botanique ni scientifiques ;
- En outre ce site répond aux besoins locaux et même régionaux pour une longue durée de vie.

Ces avantages offrent une bonne garantie pour l'aménagement du centre d'enfouissement technique, mais il est impératif de prendre des mesures pour remédier les impacts liés à l'implantation du centre d'enfouissement technique.

Impact sur les eaux

Le risque de pollution des eaux est un élément fondamental à prendre en considération lors de l'implantation et l'exploitation d'une décharge contrôlée. Ce risque de contamination peut atteindre les eaux de surface ainsi que les eaux souterraines.
Le risque de contamination réside lors du lessivage. Le lessivage des déchets présents dans la décharge par les eaux météoriques entraîne la formation d'un volume d'eaux contaminées, appelées lixiviats.
On cas d'insuffisance ou défaillance des dispositifs d'étanchéité-drainage mis en place sur le fond et les flancs de la décharge, les lixiviats migrent à travers le sol et les polluants contenus dans ceux-ci peuvent ainsi, en fonction des caractéristiques géologiques des terrains sous-jacents se retrouver à plus ou moins brève échéance dans les nappes aquifères et delà conduire à une contamination ou bien ces lixiviats vont ruisseler en dehors de la décharge et contaminé les eaux de surfaces.

Impact sur l'atmosphère

La fermentation des ordures ménagères en décharge entraîne la production de différents gaz de toutes sortes ; méthane, gaz carbonique sulfure d'hydrogène et d'autres mercaptans, qui provoquent une pollution atmosphérique assez gênante. Cette production de biogaz est estimée à 200 m^3 par tonne de déchets sur une période

de décomposition de 20 ans.
La toxicité de ces gaz n'est pas seule en cause, il faut aussi noter les odeurs nauséabondes qui en découlent.
La fermentation de la matière organique peut se dérouler en phase aérobie (présence d'oxygène) ; et en phase d'anaérobie (absence d'oxygène). Dans le premier cas, le dégagement du méthane est réduit à environ 10 à 15% du biogaz, alors que dans le deuxième cas, la formation du méthane est assez importante. Elle est évaluée à environ 60%.

Composition moyenne du biogaz

Nous avons vu précédemment, que la procédure de fermentation anaérobie s'accompagne d'un dégagement d'un mélange gazeux auquel, en raison de son origine, le nom de biogaz a été donné ; il contient [41] :

- Méthane (CH_4) : 40 à 60% en volume ;
- Gaz carbonique (CO_2) : 35 à 45 % en volume ;
- Azote (N_2) : 0 à 3% en volume ;
- Sulfure d'hydrogène (H_2S) : 0 à 1% en volume ;
- Hydrogène (H_2) : 0 à 1% en volume ;
- Oxygène (O_2) : 0 à 1% en volume ;
- Pouvoir calorifique inférieur (PCI) : 4,5 à 6,8 kWh/m^3.

Or, le méthane est un gaz à effet de serre 21 fois plus nocif que le gaz carbonique. C'est pourquoi, il faut imposer désormais aux exploitants de décharges de capter le biogaz par des puits et de rechercher des solutions de valorisation, ou à défaut le processus de combustion par torchère. C'est le moyen qu'il préconise pour la décharge de Batna. Il faut noter que les moyens de puits de captage et la torchère se complètent.

Chapitre 6

Application à la combustion du biogaz

6.1 Introduction

Le procédé de la combustion est largement utilisés actuellement pour répondre aux besoins énergétiques indispensables au monde. Il est utilisé pour convertir une grande quantité de biomasse, des déchets, du biogaz,... en éléments simples du type CO_2, H_2O et en chaleur, cette chaleur de combustion dégagée par l'oxydation du combustible, si elle est récupérée, produit de la vapeur qui peut être utilisée comme vecteur de chaleur ou pour alimenter une turbine pour faire de l'électricité. La chaleur récupérée peut se faire aussi par production mixte de chaleur et d'électricité (cogénération).

Ce chapitre est consacré à l'analyse des systèmes subissant de telles réactions chimiques de combustion, sur base de thermodynamique. On se bornera à considérer des situations d'équilibre, et par conséquent, on n'abordera pas les phénomènes cinétiques.

6.2 Réaction de combustion

La combustion peut être définie comme une réaction chimique ou la matière combustible se transforme pour former, avec l'oxygène de l'air, du dioxyde de carbone et de l'eau. Cette réaction est exothermique, c'est-à-dire qu'elle se produit avec un dégagement de chaleur.
La réaction de combustion peut s'écrite alors, sous forme d'une équation où apparaissent les réactifs à gauche, que l'on sépare en combustible, qui est l'agent réducteur, et comburant, qui est le corps contenant l'agent oxydant et les produits à droite, que l'on sépare en chaleur, dioxyde de carbone et de l'eau, qui selon les conditions de pression et de tempèrature, pourra être sous forme liquide ou vapeur.

$$\text{Fuel} + O_2 \rightarrow \text{Dioxyde de carbone } (CO_2) + \text{Eau } (H_2O) + \text{PCI (chaleur)} \qquad (1)$$

Dans la plupart des cas la combustion s'effectue dans de l'air, il y a lieu de considérer que ce dernier contient 21% en volume ou 23% en poids d'oxygène, le reste étant pratiquement de l'azote qui n'intervient pas dans la combustion et devrait être rejeté comme tel dans les fumées.

La réaction de combustion (1) avec l'air devient donc :

$$\text{Fuel} + \text{Air}\ (O_2 + 3.76\ N_2) \rightarrow CO_2 + H_2O + 3.76\ N_2 + \text{PCI} \tag{2}$$

La réaction de combustion est dite complète si les gaz brûlés ne comprennent, outre les éléments inertes, que des produits complètement oxydés (dioxyde de carbone et l'eau). Mais il convient de noter que les procédés de combustion ne sont jamais parfaits ou complets. En réalité, plusieurs produits intermédiaires sont formés au cours d'une combustion réelle. Ils s'avèrent néanmoins importants en pratique, en particulier pour les problèmes de pollution.
Lorsque l'air est l'oxydant, l'zote peut s'oxyder lorsqu'il y a un excès d'oxygène et nécessairement produire des émissions des oxydes d'azote NO, NO_2, N_2O,... rassemblés sous la dénomination NO_x qui sont en partie responsables des pluies acides. Aussi, lorsque l'air fourni est inférieur à l'air théorique, la combustion est incomplète. Si le manque d'air est faible, on observe la formation de monoxyde de carbone (CO). Le CO est un gaz très dangereux. Une teneur de 0,2 % de CO dans l'air entraîne la mort en moins d'une demi-heure. Pour des manques d'air plus importants, il peut subsister des hydrocarbures imbrûlés, ou du carbone sous forme de graphite.

Après l'estimation des produits résultants, l'équation de la réaction des hydrocarbures avec l'air s'écrit sous forme [42] :

$$a_1\ \text{Fuel1} + a_2\ \text{Fuel2} + a_3\ \text{Fuel3} + a_4\ \text{Fuel4} + bO_2 + cN_2 \rightarrow N_P[A(H_2) + B(H_2O) + C(CO_2) + D(N_2) + E(O) + F(O_2) + G(O_3) + H(H) + P(OH) + Q(CO) + R(C) + S(CH_4) + T(NO) + V(NO_2) + W(NH_3) + X(HNO_3) + Y(HCN) + Z(N) \tag{3}$$

Où :
A, B, C, D, E, etc. sont les fractions molaires des produits.
N_P, est le nombre de mole totale du produit.
a_1, a_2, a_3, a_4, b, c, sont les nombres de mole de combustible et le comburant.

Un des paramètres importants, caractérisant une réaction de combustion, est sa chaleur de réaction qui est nécessaire au calcul de la température maximale (température adiabatique de flamme ou de combustion, TAF) et à celui de la composition des produits à cette température. Ces calculs s'effectuent sur la base des principes de la thermodynamique.

L'enthalpie de combustion (chaleur de réaction) est la différence d'enthalpie entre les produits et les réactifs.

$$\Delta H^0(reaction) = \sum n_p {H^0}_p - \sum n_r {H^0}_r \tag{6.1}$$

L'enthalpie de produits et réactifs dans des conditions de pression et température peut se calculer par :

$$H_{P,T} = {H^0}_f - {H^0}_{PT/298} \tag{6.2}$$

Où :
${H^0}_f$, c'est l'enthalpie de formation dans l'état standard, elle est généralement tabulée pour de nombreux composés.
${H^0}_{PT/298}$ peut être calculée par le polynôme :

$${H^0}_{PT/298} = a_{i,0} + a_{i,1}T + a_{i,2}T^2 \tag{6.3}$$

a_{i0}, a_{i1}, a_{i2}, sont des constantes donnée dans les tableaux B.2 et B.3 de l'Annexe -B- pour chaque espèce i et la température entre [300-3000K] [42].

Alors :

$$\begin{aligned} H_r = a_1(H_{f,298K} + \Delta H_{T/298}) + a_2(H_{f,298K} + \Delta H_{T/298}) + a_3(H_{f,298K} + \Delta H_{T/298}) + \\ + a_4(H_{f,298K} + \Delta H_{T/298}) + b(H_{f,298K} + \Delta H_{T/298}) + c(H_{f,298K} + \Delta H_{T/298}) \end{aligned} \tag{6.4}$$

$$\begin{aligned} H_p = N_P[A(H_{f,A} + \Delta H_{T/298}) + B(H_{f,B} + \Delta H_{T/298}) + C(H_{f,C} + \Delta H_{T/298}) + \\ + D(H_{f,D} + \Delta H_{T/298}) + E(H_{f,E} + \Delta H_{T/298}) + F(H_{f,F} + \Delta H_{T/298}) + \\ + G(H_{f,G} + \Delta H_{T/298}) + H(H_{f,H} + \Delta H_{T/298}) + P(H_{f,P} + \Delta H_{T/298}) + \\ + Q(H_{f,Q} + \Delta H_{T/298}) + R(H_{f,R} + \Delta H_{T/298}) + S(H_{f,S} + \Delta H_{T/298}) + \\ + U(H_{f,U} + \Delta H_{T/298}) + V(H_{f,V} + \Delta H_{T/298}) + W(H_{f,W} + \Delta H_{T/298}) + \\ + X(H_{f,X} + \Delta H_{T/298}) + Y(H_{f,Y} + \Delta H_{T/298}) + Z(H_{f,Z} + \Delta H_{T/298})] \end{aligned} \tag{6.5}$$

Pour calculer les concentrations des produits de l'équation (3), il faut avoir un système de dix huit équations puisque on a dix huit espèces. Ce système contient les équations suivantes :

- 14 constantes d'équilibre ;
- Trois équations de conservation de masse ;
- Une équation pour la condition de concentration.

Constante déquilibre

La constante d'équilibre K, est une valeur mathématique, relative aux concentrations des réactifs et des produits d'un système à l'équilibre.
Lorsqu'une rèaction est équilibrée cela signifie que la vitesse de la réaction dans le sens réactifs donnent produits est égale à la vitesse de la réaction dans le sens produits donnent réactifs et la constante d'équilibre est égale au produit des concentrations des résultants (dont les coefficients deviennent exposants) divisé par le produit des concentrations des réactifs (dont les coefficients deviennent exposants).
La température peut faire varier la constante d'équilibre à partir du polynôme d'équation suivant :

$$\begin{aligned} log_{10}K =& A_1 + A_2(T-1600)10^3 + A_3(T-1600)(T-2000)10^6 + \\ &+ A_4(T-1600)(T-2000)(T-2400)10^9 + \\ &+ A_5(T-1600)(T-2000)(T-2400)(T-2800)10^{12} + \\ &+ A_6(T-1600)(T-2000)(T-2400)(T-2800)(T-3200)10^{15} + \\ &+ A_7(T-1600)(T-2000)(T-2400)(T-2800)(T-3200)(T-3600)10^{18} \end{aligned} \tag{6.6}$$

Les valeurs des coefficients A_1 - A_7 sont exprimées dans le tableau B.1 (Annexe B) [42]. Ce tableau contient un mécanisme de 14 équation à l'équilibre valable pour la formation de CO_2, CO, O_2, H_2O, H_2, OH, H, O, N_2, NO, NO_2, O_3, HNO_3, HCN, CH_4, C, NH_3 et N pour calculer Les constantes d'équilibre K_1 à K_{14}.

Conservation de masse

Les équations de la conservation de la masse sont :

$$RCO(2C+Q+B+3X+3G+2F+E+P+2V+U) = C+Q+R+S+Y \tag{6.7}$$

$$RHO(2C+Q+B+3X+3G+2F+E+P+2V+U) = 2A+2B+H+P+4S+3W+X+Y \tag{6.8}$$

$$RNO(2C+Q+B+3X+3G+2F+E+P+2V+U) = 2D+U+V+W+X+Y+Z \tag{6.9}$$

$$\begin{aligned} ATOMC + ATOMH + \frac{ATOMO}{\phi} + \frac{ATOMN}{\phi} = Np[&(E+H+R+Z) + 2(A+ \\ &+D+F+P+Q+U) + 3(B+C+G+V+Y) + 4W + 5(S+X)] \end{aligned} \tag{6.10}$$

L'équation (6.10) represente la conservation du nombre d'atome total des produits et réactifs.

Condition de consentration

La somme des fractions molaires à l'équilibre égale à 1.

$$A+B+C+D+F+G+O+H+P+Q+R+S+U+V+W+X+Y+Z=1 \quad (6.11)$$

Dans les réactions de combustion, il est nécessaire de définir, en plus des variables d'état classiques, des variables caractérisant la composition du milieu (quelques paramètres utilisés dans les études de combustion pour caractériser le mélange de réactifs).

Rapport air/carburant (AFR)

C'est le rapport entre la masse de comburant m_a et la masse de carburant m_f (le rapport air-combustible) présent lors de la combustion noté encore AFR (Air/Fuel Ratio).

$$AFR = \frac{m_a}{m_f} \quad (6.12)$$

Quand tout le combustible est combiné avec tout l'oxygène, le mélange est équilibré et le AFR s'appelle le AFR stoechiométrique (AFR_{stoich}) de mélange. Pour une valeur inférieure, c'est-à-dire plus basse que la valeur à la stoechiométrie, il y a une insuffisance en oxygène.

Rapport carburant/air (FAR)

C'est l'inverse de l'AFR (1/AFR), dans la majorité des cas, il est nettement inférieure à l'unité.

Rapport d'équivalence λ

c'est le rapport de la quantité d'air réellement utilisée à celle théoriquement nécessaire.

$$\lambda = \frac{air_{utilise}}{air_{stoick}} \quad (6.13)$$

Il ya une relation directe entre lambda λ et AFR, pour calculer lambda on a :

$$\lambda = \frac{AFR}{AFR_{stoick}} \quad (6.14)$$

Si lambda λ égal à 1 correspond à un mélange stoechiométrique, tandis que, inférieur de 1 et superieur à 1 désignent respectivement des mélanges riche et pauvre en carburant.

La richesse ϕ

Il est défini comme :

$$\phi = \frac{FAR}{FAR_{stoick}} \tag{6.15}$$

Il convient de noter que le rapport d'équivalence est liée à λ comme suit,

$$\phi = \frac{1}{\lambda} \tag{6.16}$$

Si la richesse du mélange est égale à 1, on dit que le mélange est stoechiométrique par contre si la richesse est inférieure à 1, le mélange est pauvre en combustible alors que s'il est supérieur à 1, le mélange est dit riche en combustible.

Ces équations sont résolues simultanément pour déterminer la température d'équilibre et la composition des produits, nous allons utiliser à cet effet un programme de calcul qui nous permet de voir l'effet de la variation de température d'une part et d'autre part l'effet de la stoichiomtérie sur la composition des produits.

6.3 Présentation du programme de calcul

Pour une étude plus détaillé, on a réalisé un programme de calcul qui contient :
- Programme principale ;
- Subroutine calculant les constantes d'équilibres ;
- Subroutine d'enthalpie.

La structure générale du programme est présentée par les organigrammes dans les figures ci-dessous :

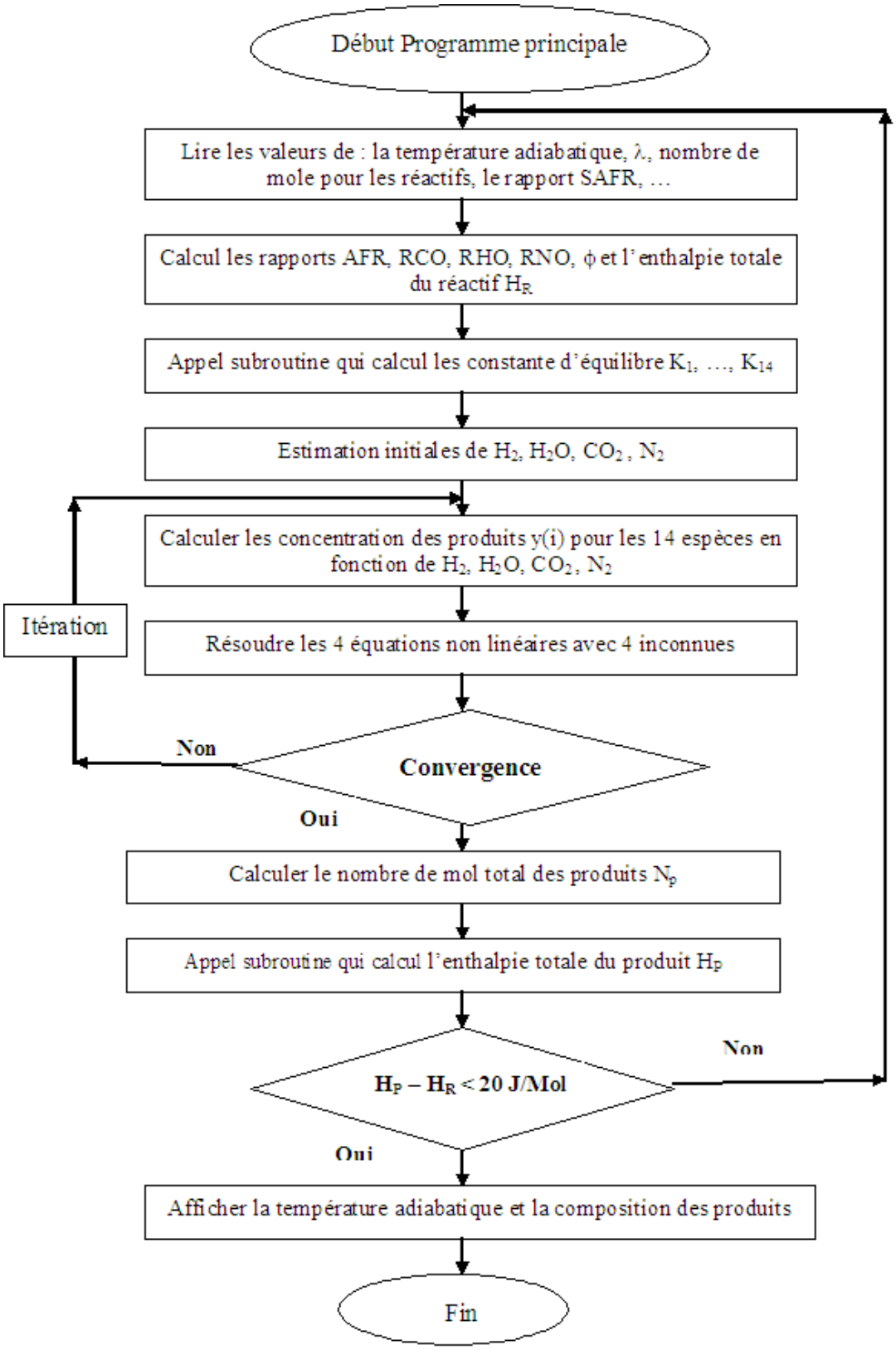

FIG. 6.1 – Organigramme du programme principal

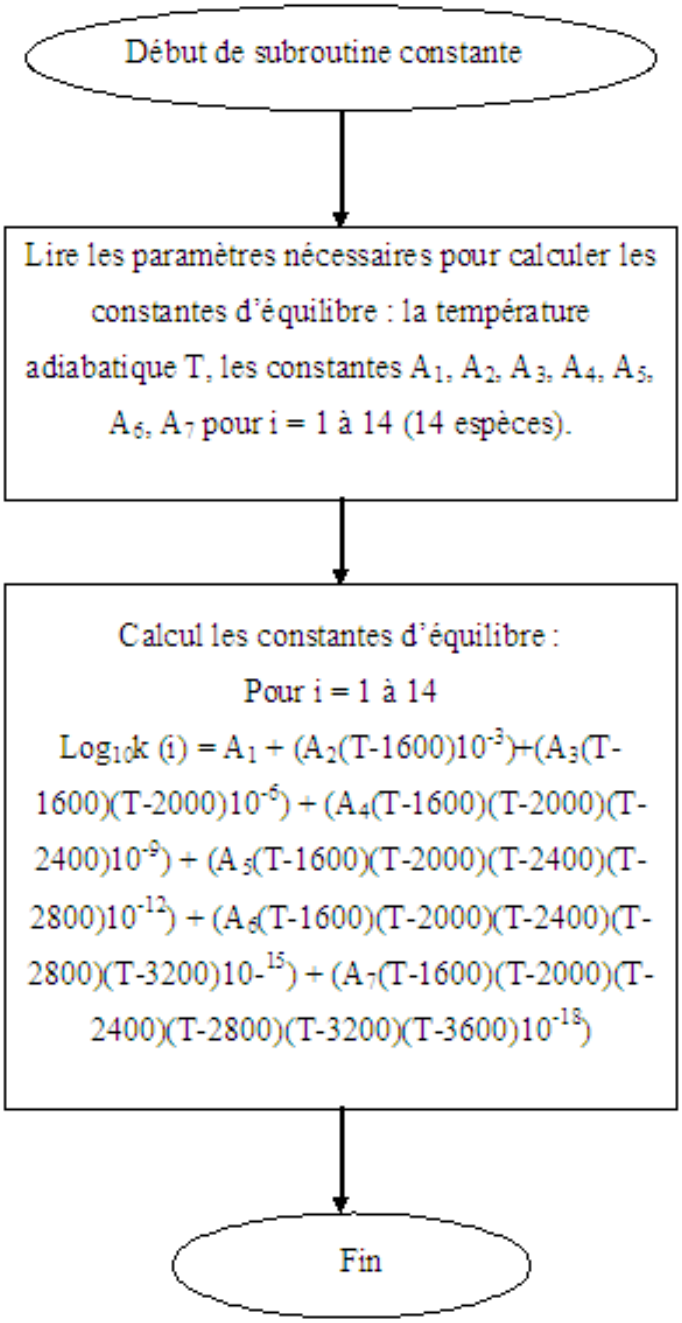

FIG. 6.2 – Organigramme de la subroutine calculant les constantes d'équilibres

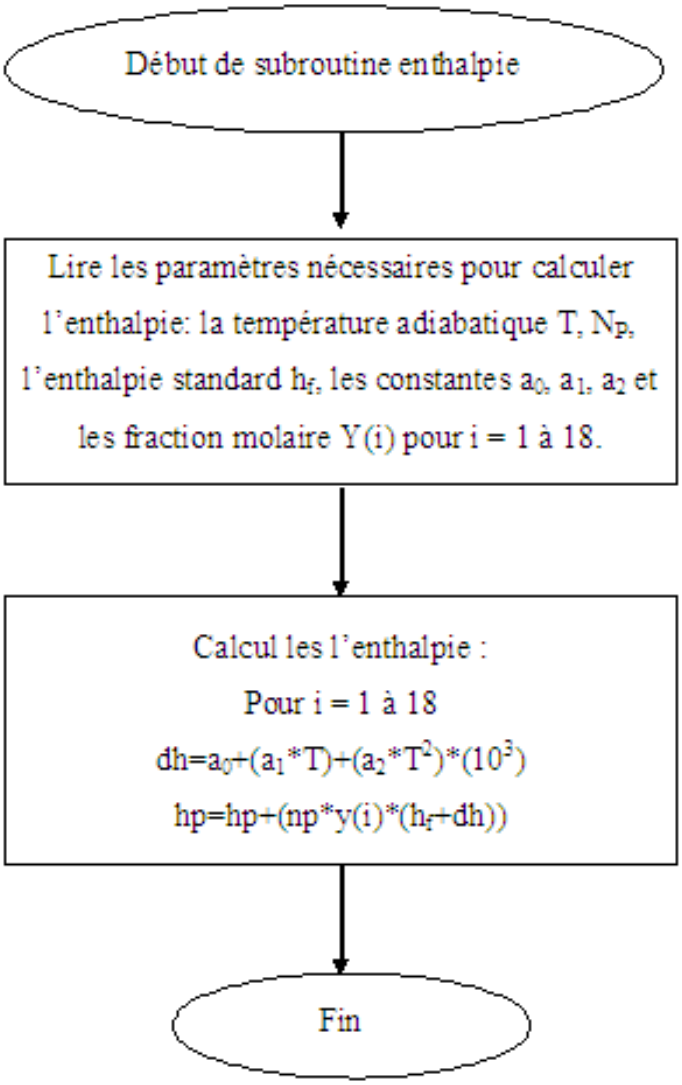

FIG. 6.3 – Organigramme de la subroutine d'enthalpie

L'organigramme de la Figure 6.1 explique le déroulement du calcul qui est structuré comme suit :

- Introduction des données (la température, les propriétés des réactifs) qui permet de décrire le problème ;
- Procédure de calcul qui permet le calcul à partir des subroutines de la figure 6.2 et 6.3) ;
- Visualisation des résultats par :
  1. Extraction d'information significative (Température, concentrations, ...) ;
  2. Présentation synthétique des informations numériques sous formes graphique pour faciliter leur interprétation (courbes des concentrations en fonction de température et de stoichiomtérie).

6.4 Validation

Pour valider notre travail qui concerne la combustion du méthane (réaction -4- ci-dessous), on a comparé nos résultats avec ceux de HABIK et El-MAHALLAWY [42], pour T=2176.213 K et λ=1.

$$0.243\ CH_4 + b\ (O_2 + 3.76N_2) \rightarrow N_P[(A(H_2) + B(H_2O) + C(CO_2) + D(N_2) + E(O) + F(O_2) + G(O_3) + H(H) + P(OH) + Q(CO) + R(C) + S(CH_4) + T(NO) + V(NO_2) + W(NH_3) + X(HNO_3) + Y(HCN) + Z(N) \quad (4)$$

Tous les résultats numériques obtenus au cours des simulations ont été récapitulés dans le tableau 6.1.

TAB. 6.1 – Validation des résultats

Produits	Résultats de HABIK	Nos résultats
H_2	0.1774E-01	0.1780E-01
H_2O	0.1648E+00	0.16489E+00
CO_2	0.7905E-01	0.79206E-01
N_2	0.6923E+00	0.69246E+00
O	0.2067E-04	0.2100E-04
O_2	0.8210E-04	0.8317E-04
O_3	0.7905E-13	0.7985E-13
H	0.6462E-03	0.6537E-03
OH	0.8064E-03	0.81323E-03
CO	0.4360E-03	0.4383E-03
C	0.3128E-15	0.31558E-15
CH_4	0.2366E-13	0.2311E-13
N	0.0000E+00	0.7771E-10
NO	0.2306E-03	0.2321E-03
NO_2	0.5619E-08	0.5638E-08
NH_3	0.3144E-07	0.31001E-07
HNO_3	0.1144E-14	0.1135E-14
HCN	0000E+00	0.4195E-11

En comparant les résultats obtenus par notre programme et ceux obtenus par HABIK et El-MAHALLAWY [42], concernant la combustion de CH_4, nous pouvons conclure qu'ils sont en bonne concordance, notamment dans les concentrations des polluants.

6.5 Combustion du biogaz

Le biogaz est un gaz combustible, il est produit de façon naturelle lorsqu'il est produit par une décharge ou bien artificiellement lorsqu'il est réalisée dans des digesteurs. Ces gaz se forment quelques mois après le stockage des déchets organiques (les déjections animales, la fraction organique des ordures ménagères, les boues de stations d'épuration, ...) et la production se poursuit sur plusieurs dizaines d'année en absence d'oxygène (anaérobie) et par une communauté microbienne complexe.
La composition du biogaz est similaire à celle des gaz naturels bruts. C'est un mélange de méthane (45-65%), de gaz carbonique (35-55%), d'azote et d'autres gaz (de sulfure d'hydrogène, ...) sous forme de traces (2%). Selon la nature des déchets traités et les variations climatiques, la composition du biogaz peut différer en proportion.
Aujourd'hui, le biogaz a été principalement développé comme un outil d'énergie renouvelable après la combustion.

Le biogaz utilisé dans ces calculs est estimé avoir les proportions :(50% CO2, et 50% CH4).
Les concentrations des produits de la combustion y compris bien entendu les polluants sont calculés à l'équilibre chimique.

$$0.5\ CO_2 + 0.5\ CH_4 + a(O_2 + 3.76\ N_2) \rightarrow N_P[(A(H_2) + B(H_2O) + C(CO_2) + D(N_2) + E(O) + F(O_2) + G(O_3) + H(H) + P(OH) + Q(CO) + R(C) + S(CH_4) + T(NO) + V(NO_2) + W(NH_3) + X(HNO_3) + Y(HCN) + Z(N) \quad (5)$$

La composition de biogaz diminue la température adiabatique de fin de combustion, et pour appliquer la même température que HABIK et El-MAHALLAWY, on suppose l'hypothèse de biogaz est préchauffer à cause de la non disponibilité des constantes à baisse température..

Résultats et discussions

Après avoir validé notre programme avec les résultats de HABIK et El-MAHALLAWY [42], où le combustible n'était que du méthane (CH_4) pure, voir tableau 6.1. Le code est maintenant prêt pour être utilisé pour la combustion du biogaz qui n'est en fait que du méthane (CH_4) dilué à 50% avec le dioxyde du carbone (CO_2).
Le biogaz, vue sa composition chimique, se comporte en combustion exactement comme le méthane, vue que la partie combustible est le CH_4, mais la présence de CO_2 en grande concentration diminue le pouvoir calorifique et peut contribuer à la dissociation de CO_2 à haute température.
Dans les pages qui suivent, les résultats générés par le code, pour le cas du biogaz sont présentés.
Les effets de la température adiabatique (T_{ad}) et la stoechiométrie (λ) sur les différentes émissions sont présentés.

On reviendra à la discussion des allures des différentes émissions à la fin de ce chapitre.

A- Effet de la température adiabatique de flamme (TAF) sur les différentes émissions

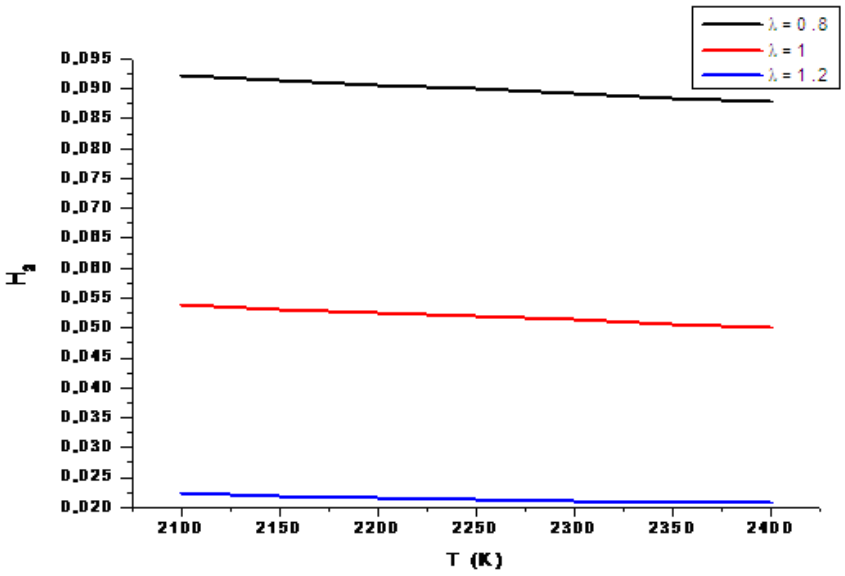

FIG. 6.4 – Variation de H_2 en fonction de la température (TAF)

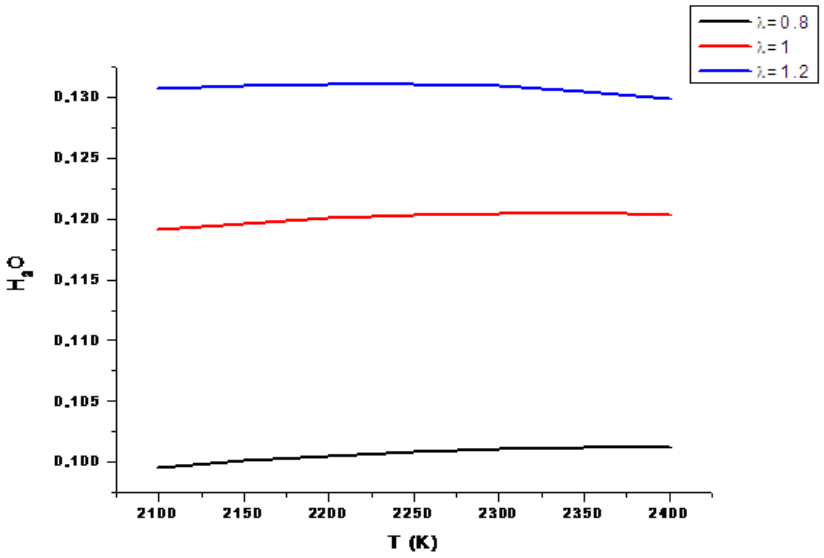

FIG. 6.5 – Variation de H_2O en fonction de la température (TAF)

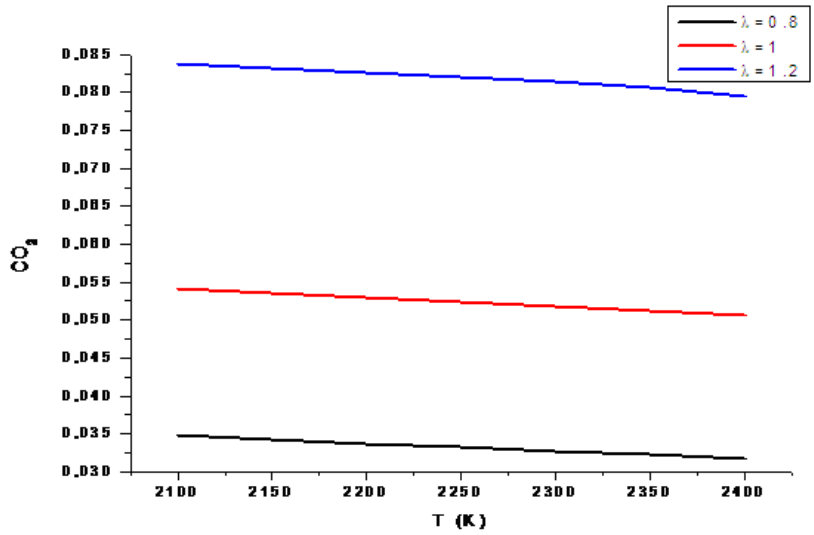

FIG. 6.6 – Variation de CO_2 en fonction de la température (TAF)

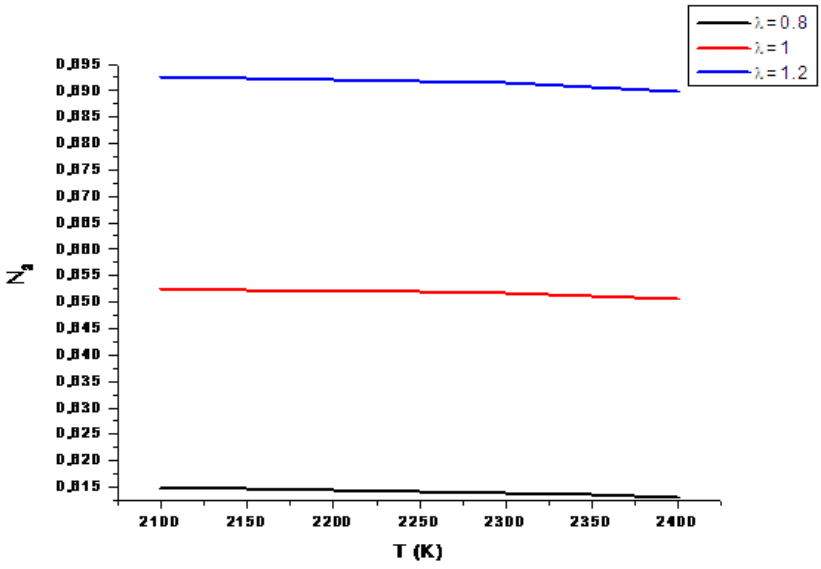

FIG. 6.7 – Variation de N_2 en fonction de la température (TAF)

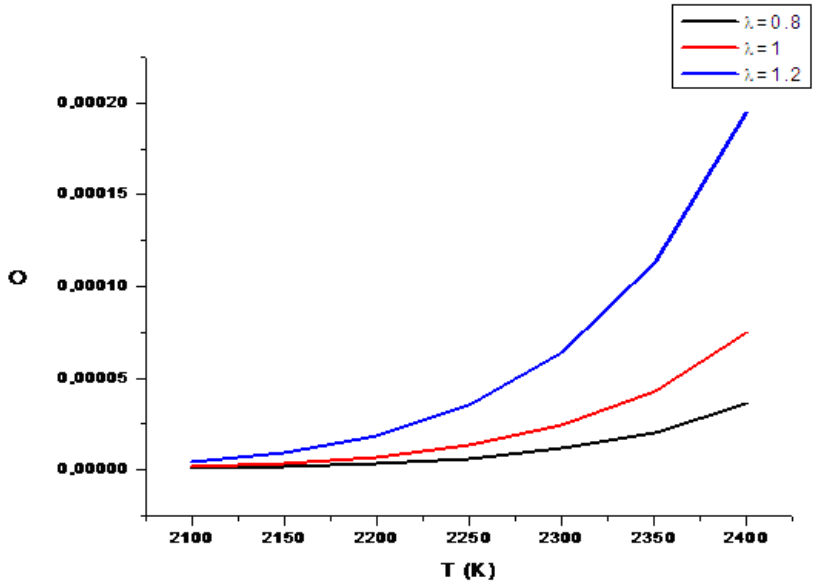

FIG. 6.8 – Variation de O en fonction de la température (TAF)

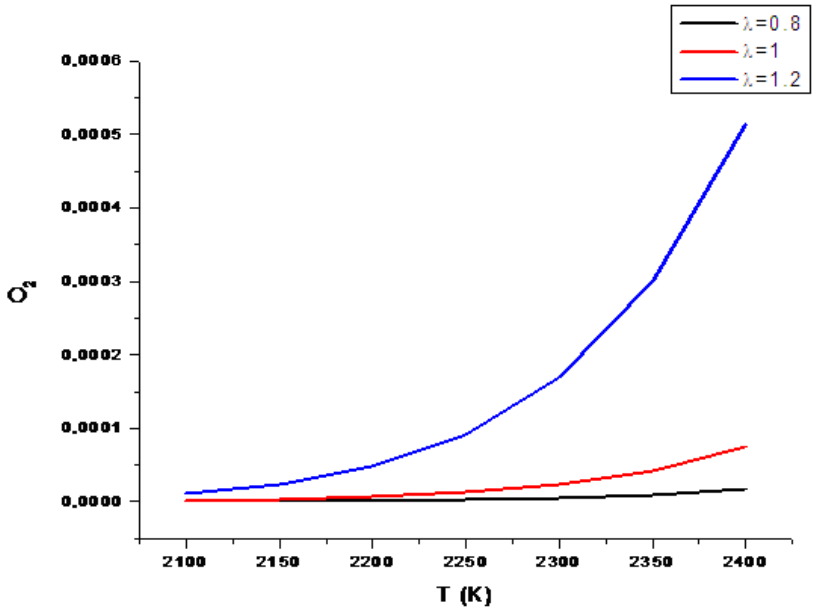

FIG. 6.9 – Variation de O_2 en fonction de la température (TAF)

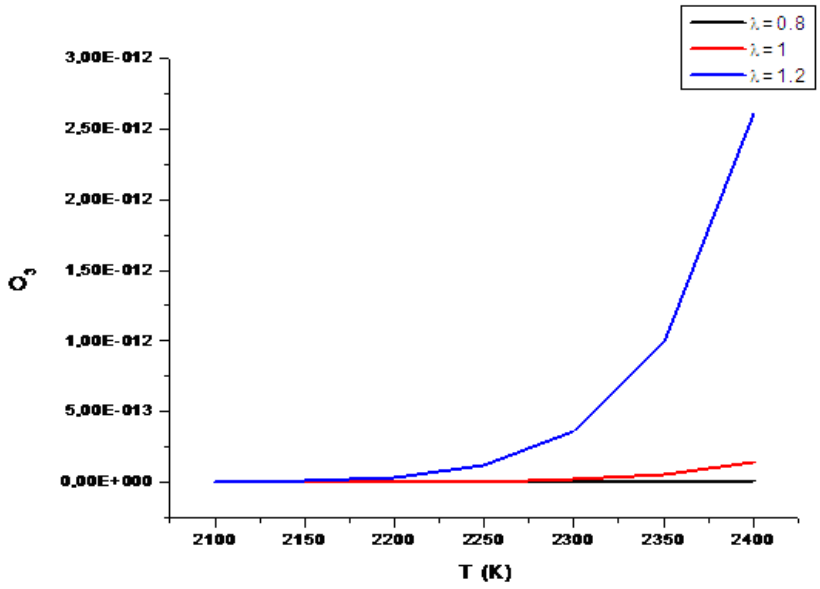

FIG. 6.10 – Variation de O_3 en fonction de la température (TAF)

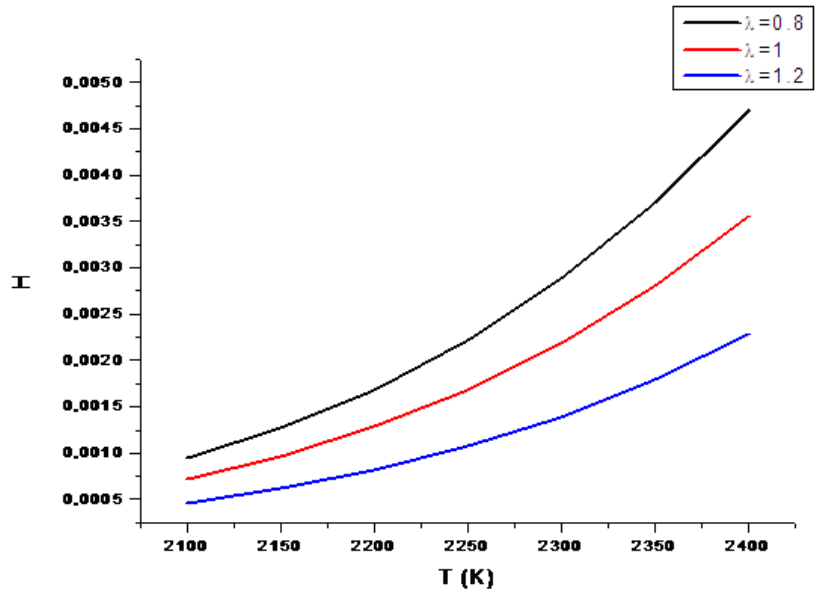

FIG. 6.11 – Variation de H en fonction de la température (TAF)

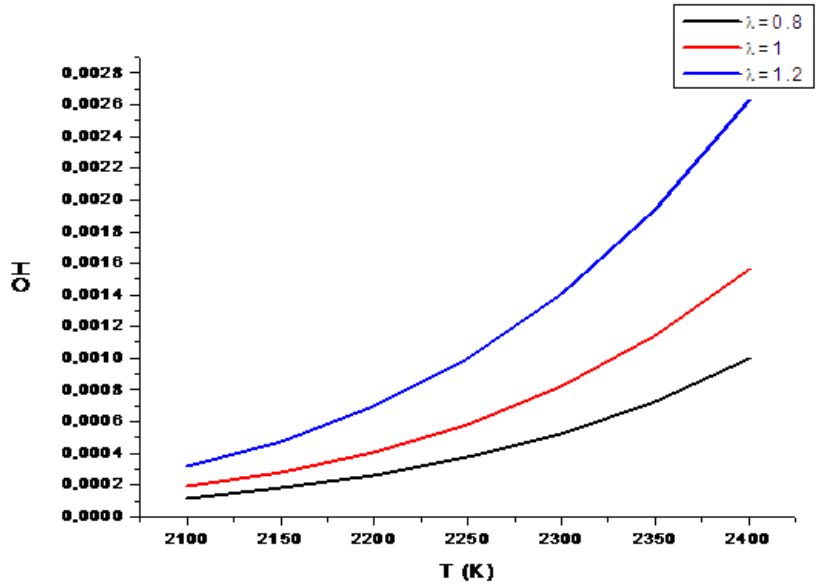

FIG. 6.12 – Variation de OH en fonction de la température (TAF)

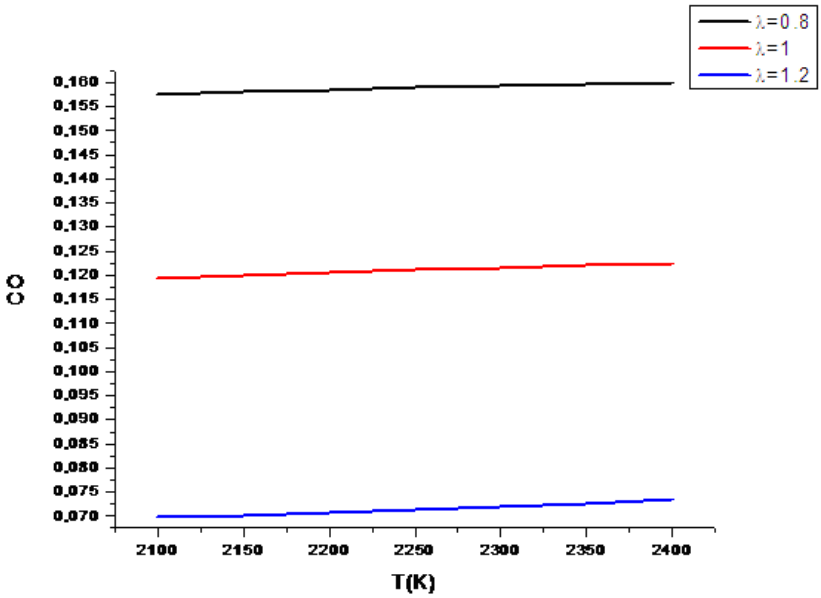

FIG. 6.13 – Variation de CO en fonction de la température (TAF)

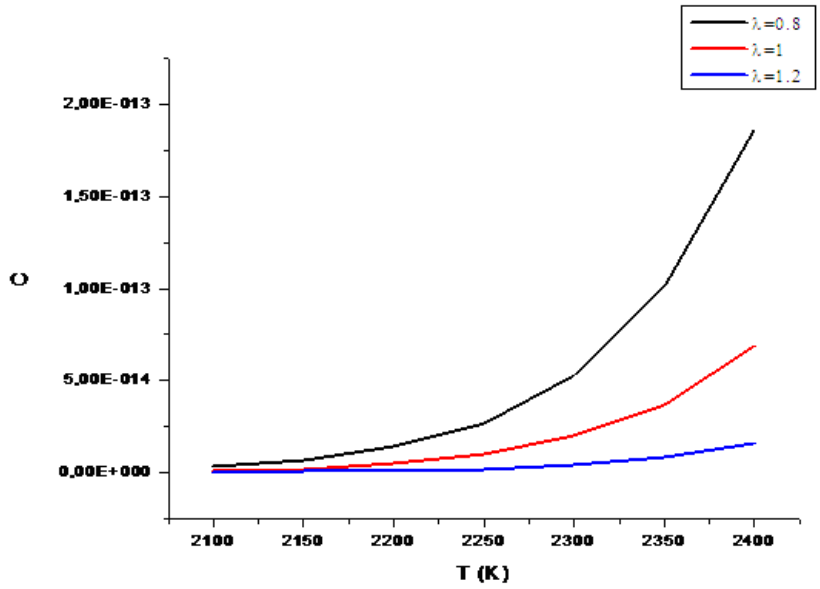

FIG. 6.14 – Variation de C en fonction de la température (TAF)

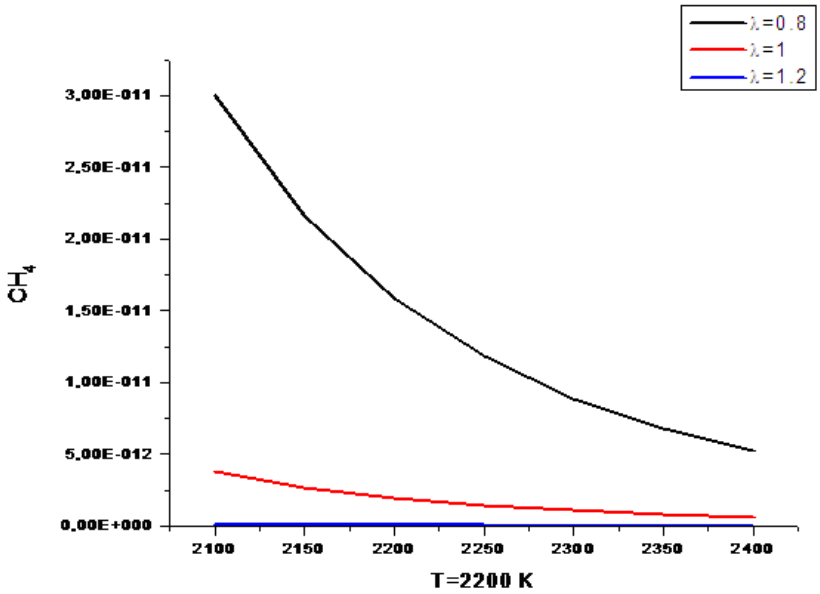

FIG. 6.15 – Variation de CH_4 en fonction de la température (TAF)

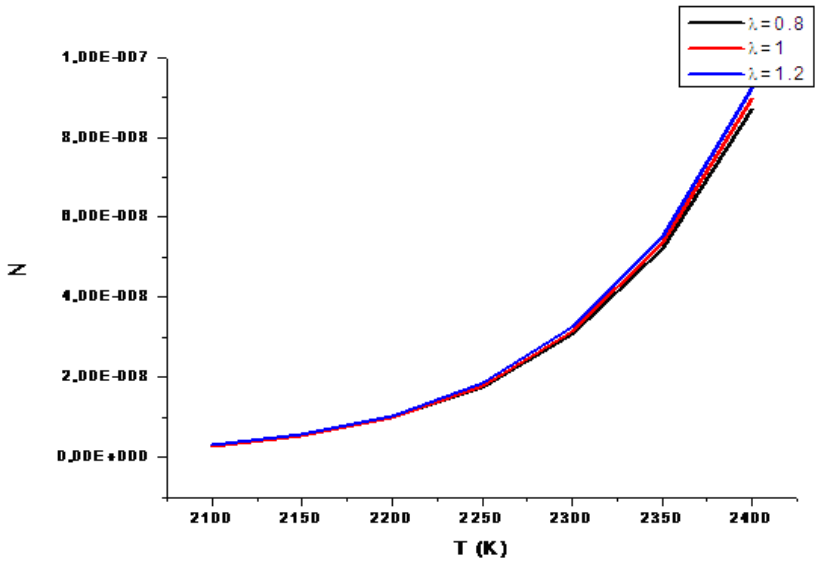

FIG. 6.16 – Variation de N en fonction de la température (TAF)

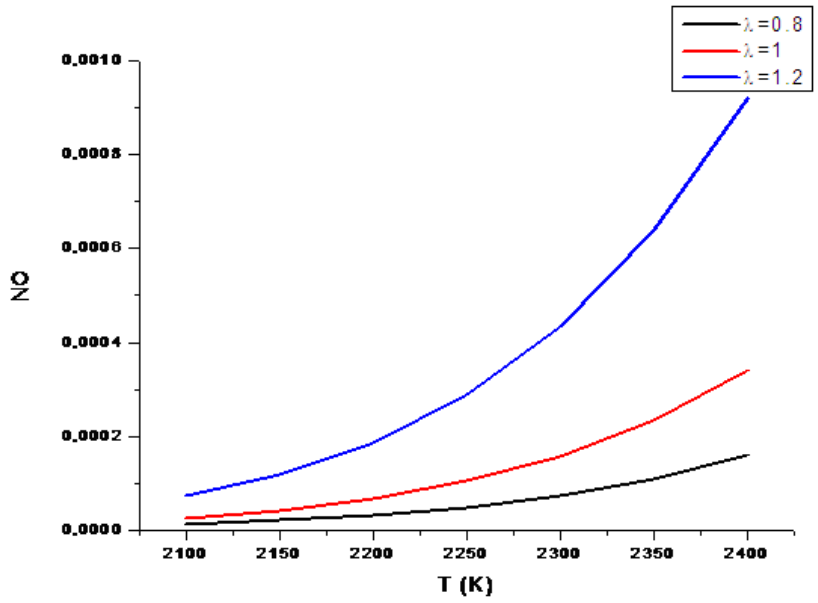

FIG. 6.17 – Variation de NO en fonction de la température (TAF)

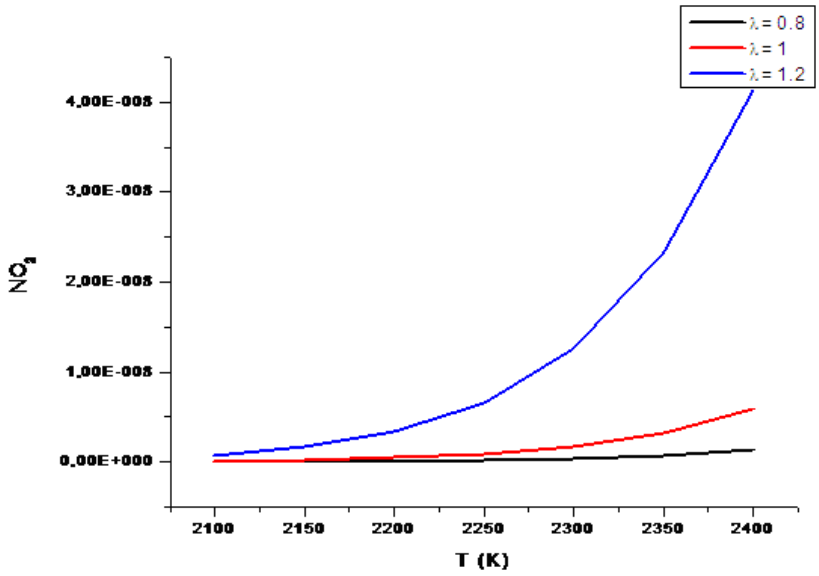

FIG. 6.18 – Variation de NO_2 en fonction de la température (TAF)

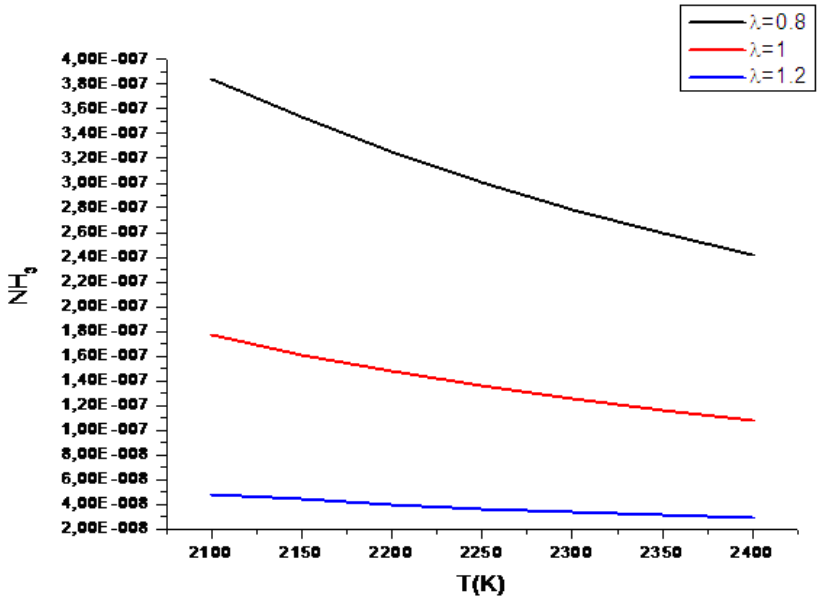

FIG. 6.19 – Variation de NH_3 en fonction de la température (TAF)

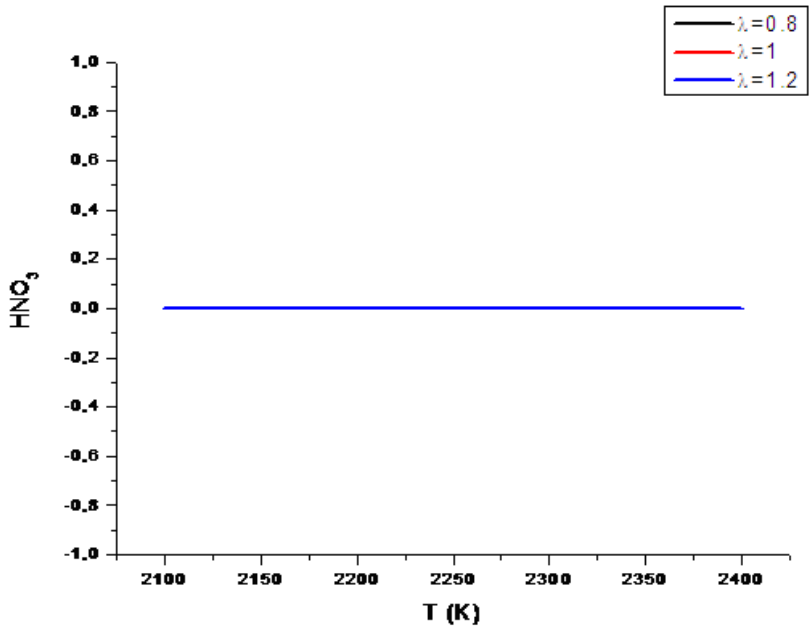

FIG. 6.20 – Variation de HNO_3 en fonction de la température (TAF)

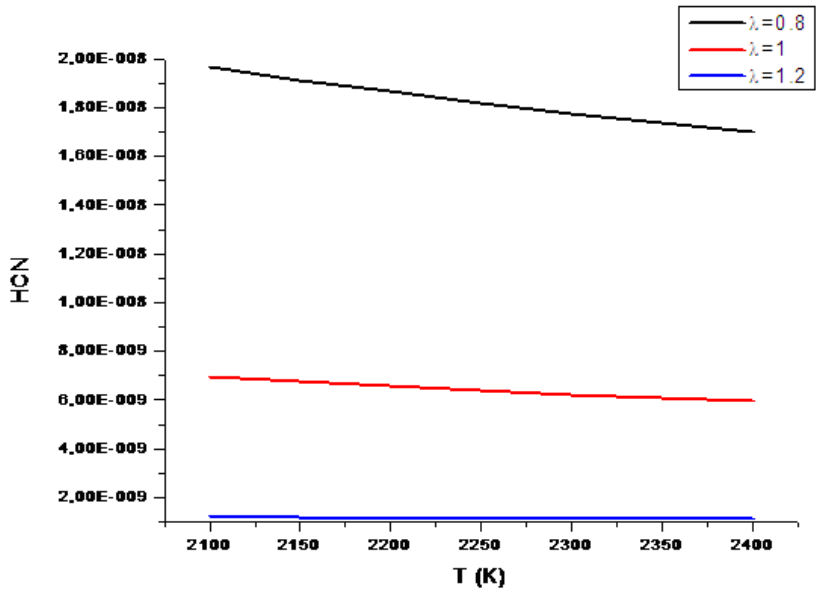

FIG. 6.21 – Variation de HCN en fonction de la température (TAF)

Les figures précidentes contiennent l'allure de quelques polluants présentant une grande importance en combustion en fonction de la température adiabatique de flamme (TAF) et du rapport d'équivalence, qui est un paramètre reflétant le rapport air-combustible, ou la richesse et la pauvreté du mélange.

B- Effet du rapport d'équivalence λ sur les émissions

Les figures ci-dessous présentent la variation des produits de combustion de biogaz en fonction de rapport d'équivalence λ pour une valeur fixe de température, T=2100K.

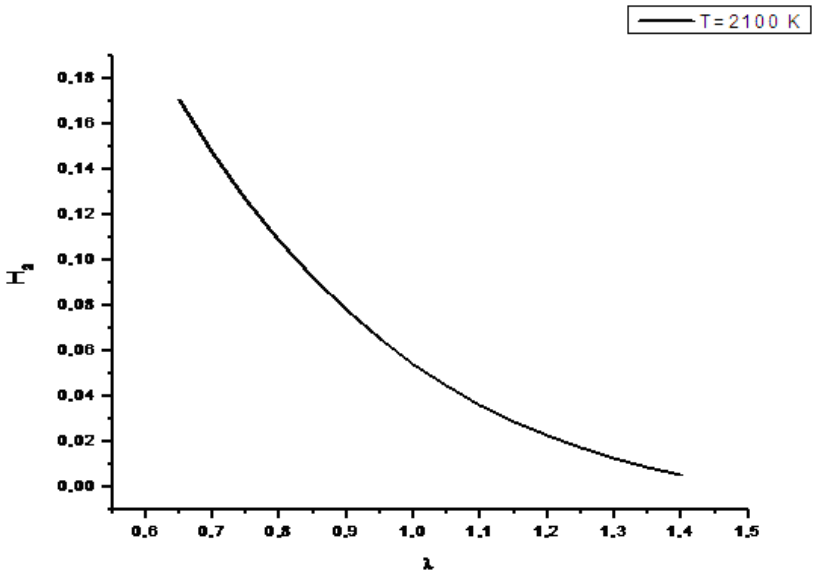

FIG. 6.22 – Variation de H_2 en fonction de λ

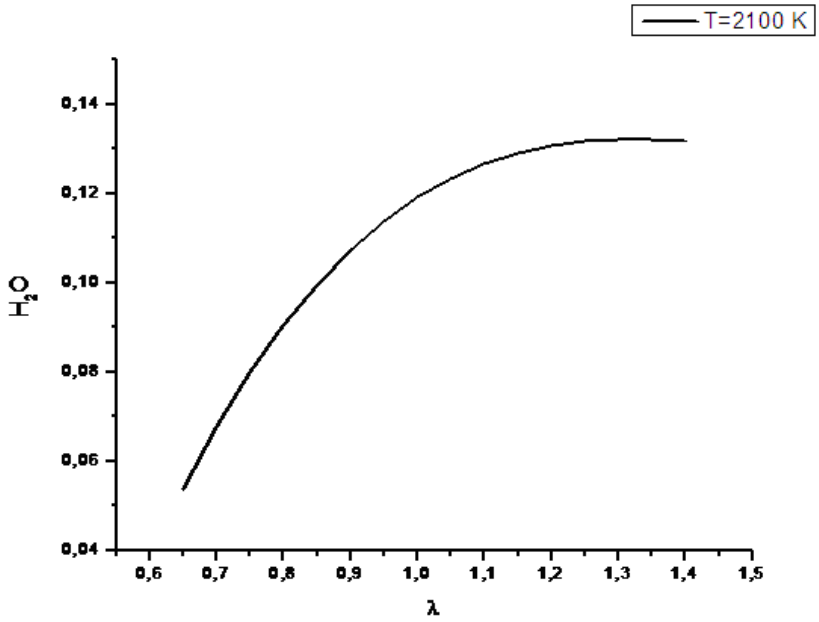

FIG. 6.23 – Variation de H_2O en fonction de λ

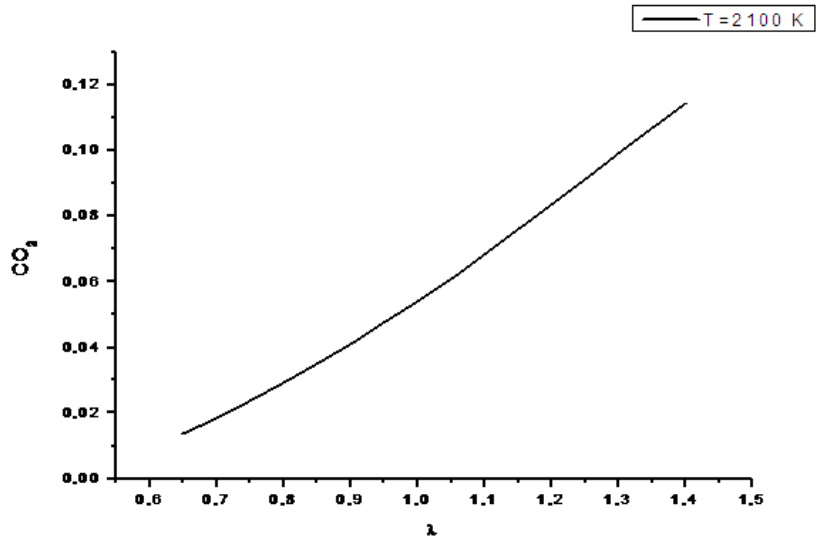

FIG. 6.24 – Variation de CO_2 en fonction de λ

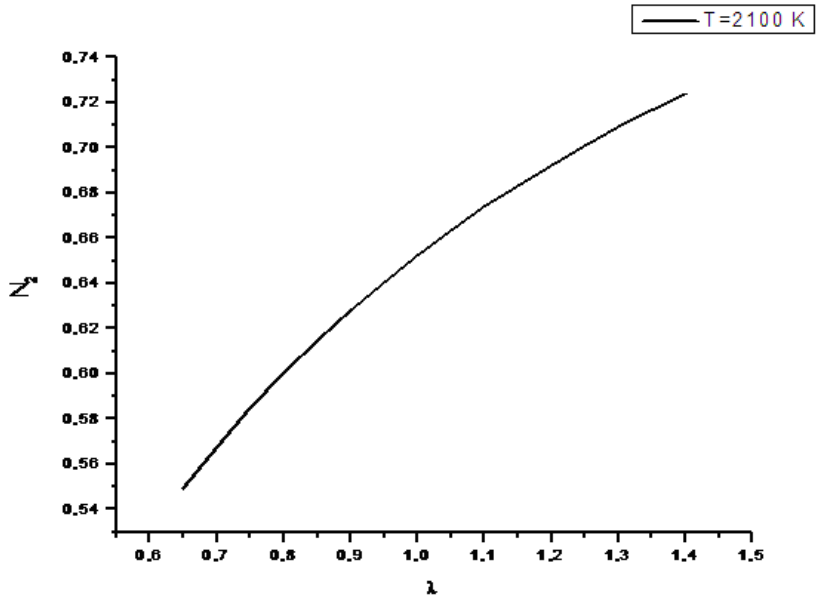

FIG. 6.25 – Variation de N_2 en fonction de λ

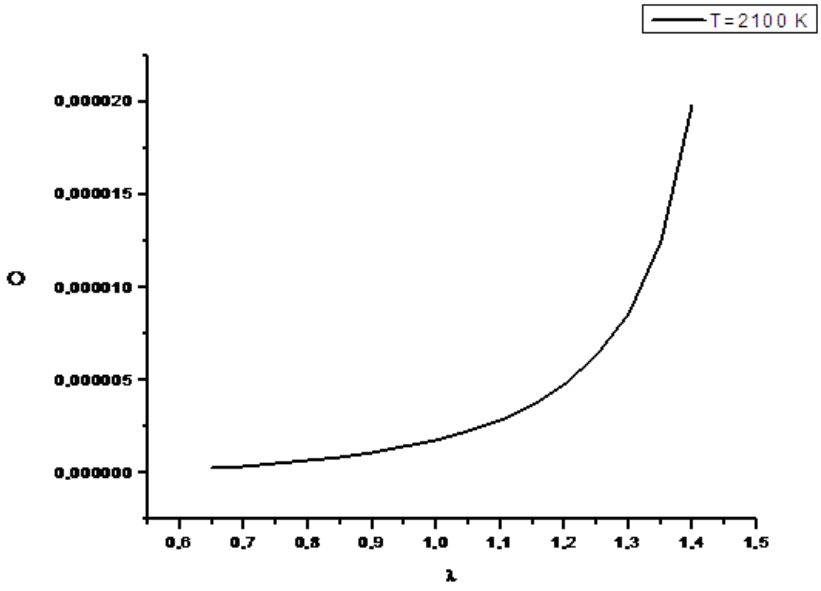

FIG. 6.26 – Variation de O en fonction de λ

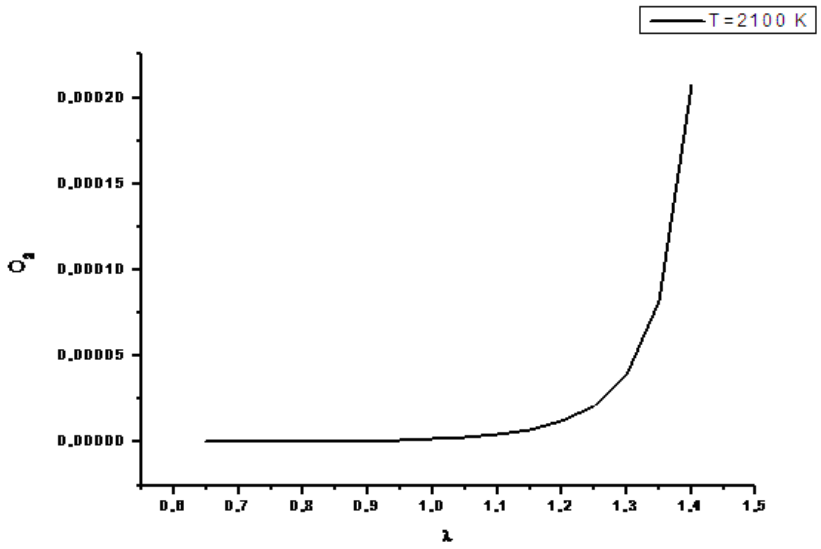

FIG. 6.27 – Variation de O_2 en fonction de λ

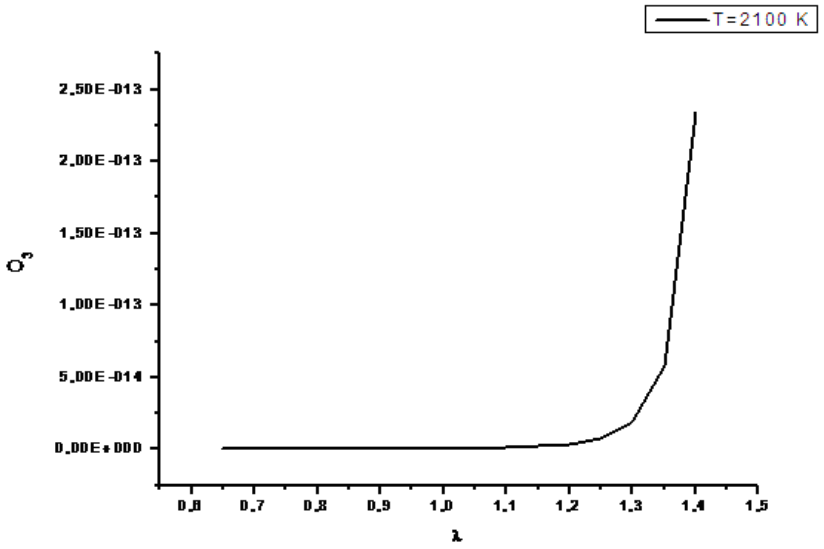

FIG. 6.28 – Variation de O_3 en fonction de λ

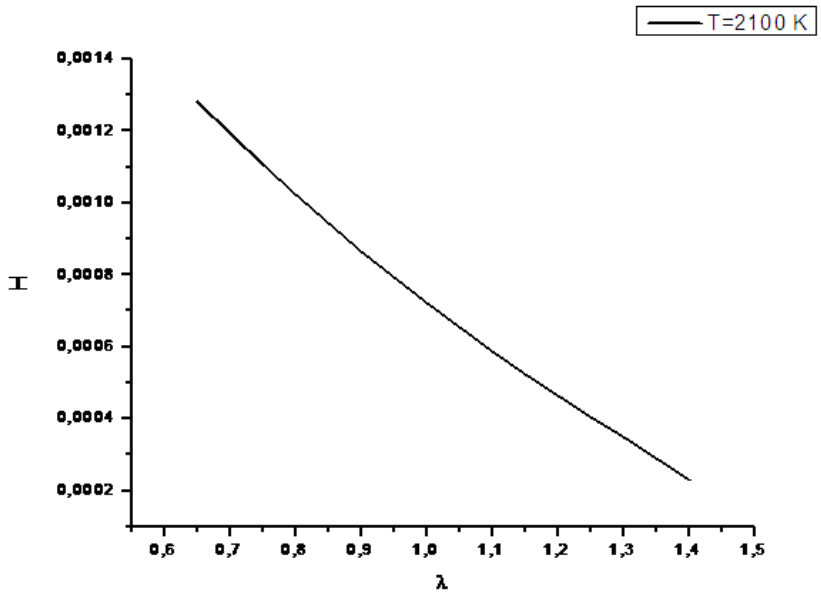

FIG. 6.29 – Variation de H en fonction de λ

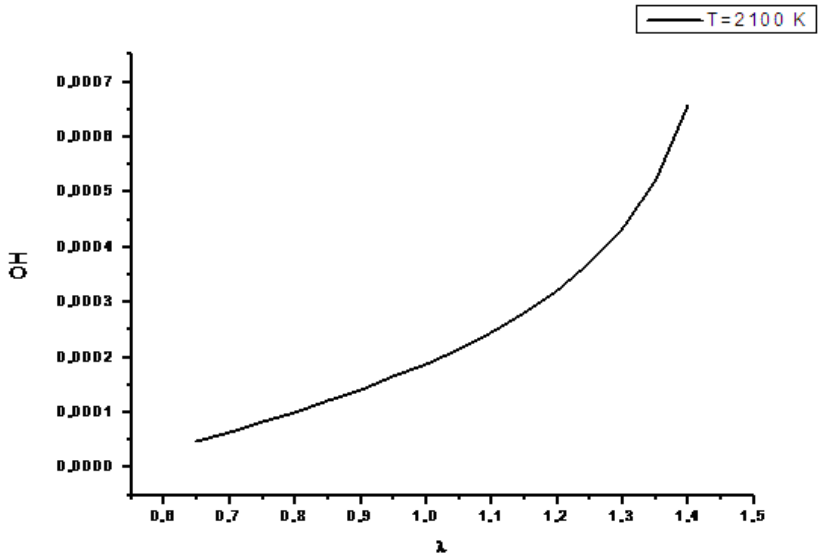

FIG. 6.30 – Variation de OH en fonction de λ

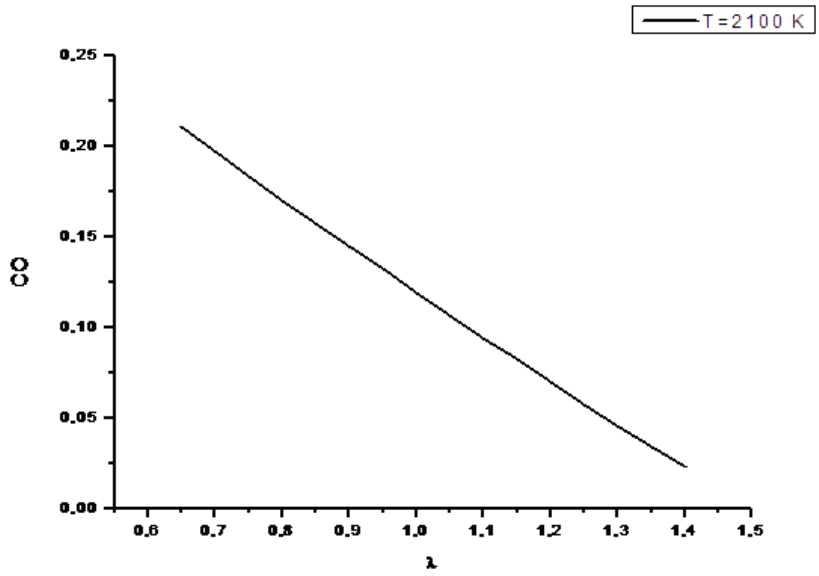

FIG. 6.31 – Variation de CO en fonction de λ

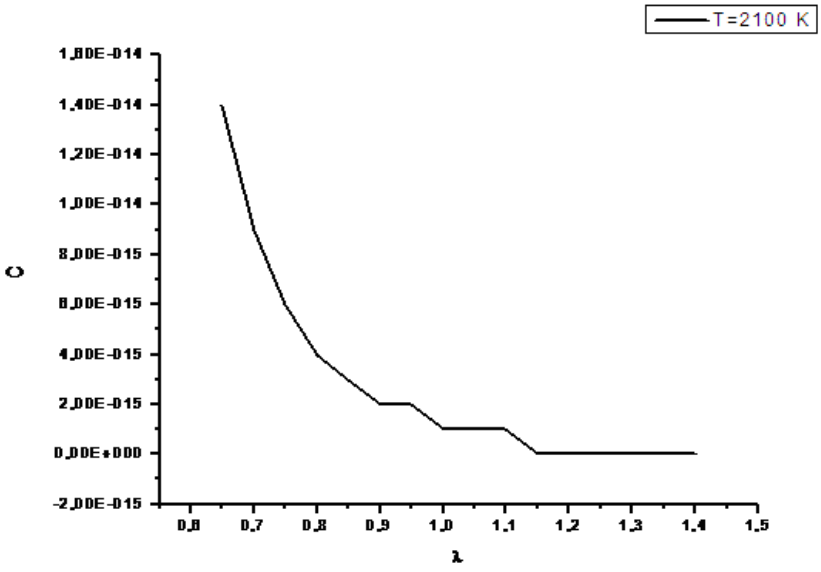

FIG. 6.32 – Variation de C en fonction de λ

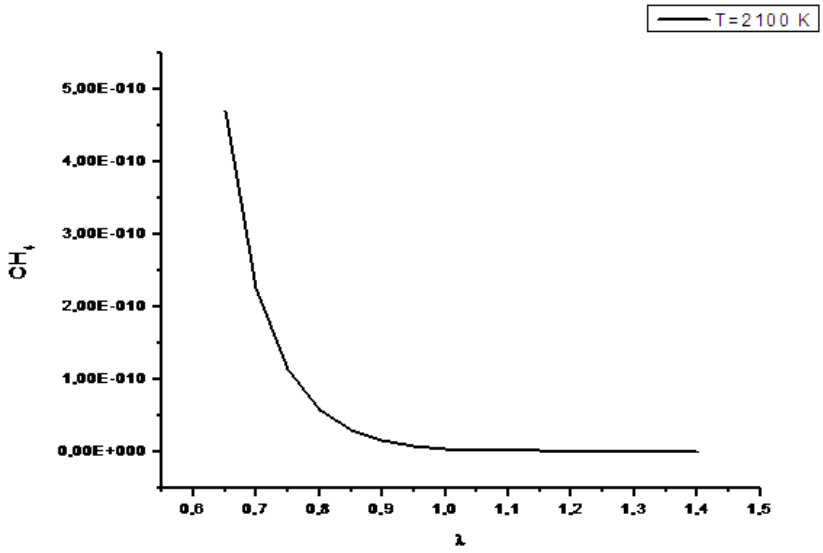

FIG. 6.33 – Variation de CH_4 en fonction de λ

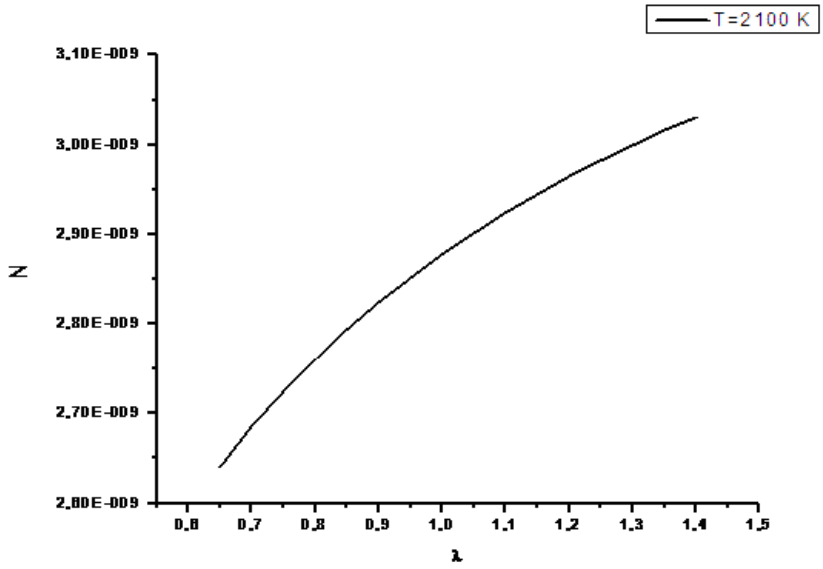

FIG. 6.34 – Variation de N en fonction de λ

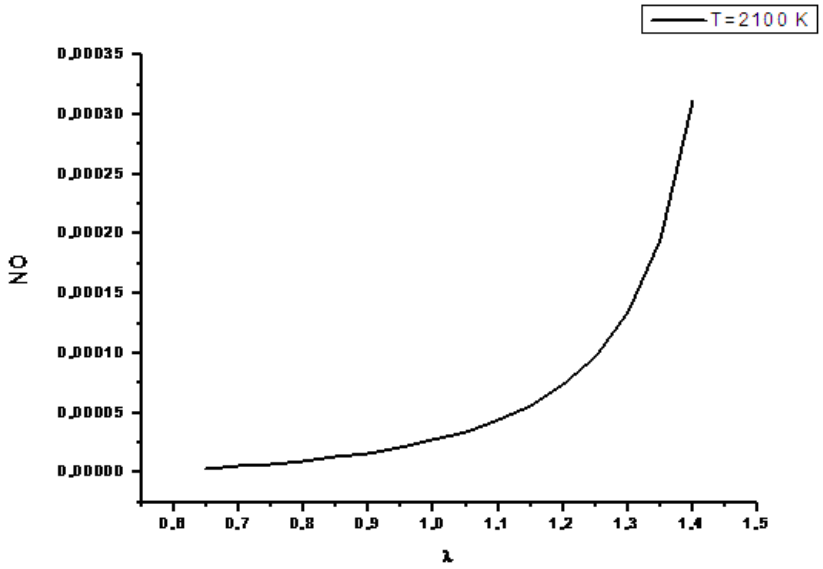

FIG. 6.35 – Variation de NO en fonction de λ

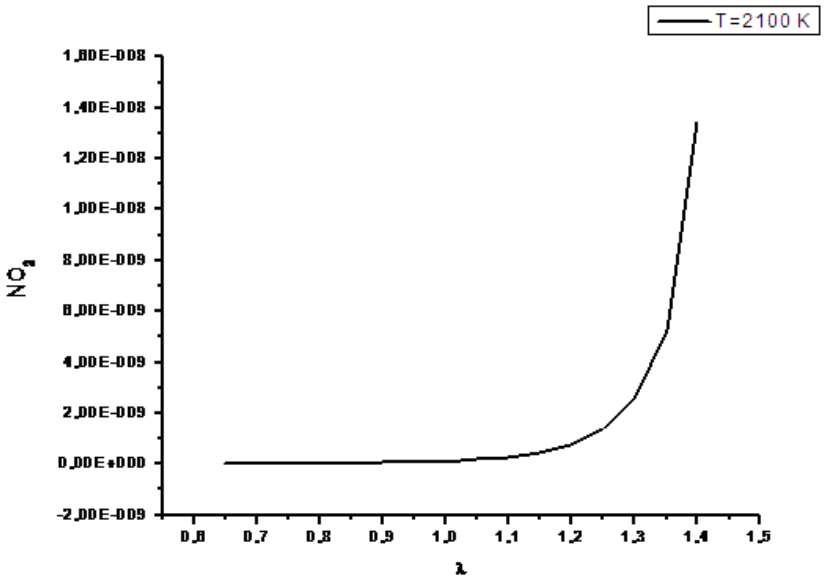

FIG. 6.36 – Variation de NO_2 en fonction de λ

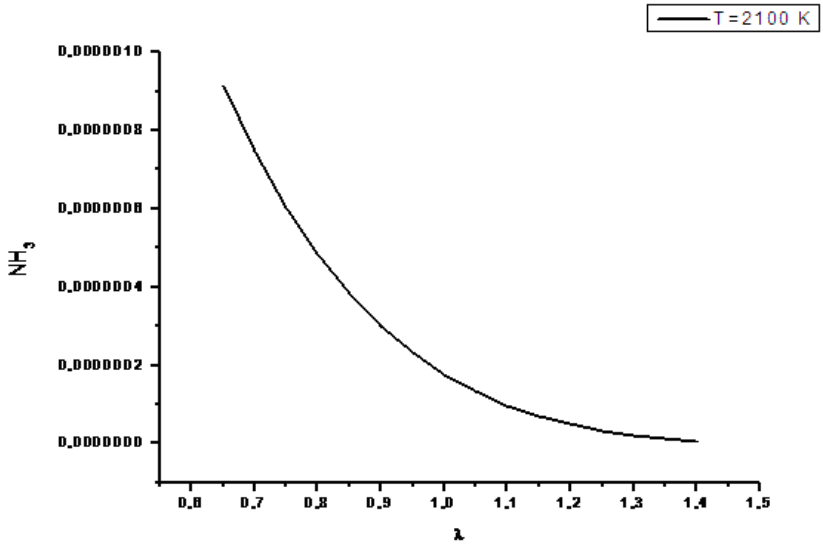

FIG. 6.37 – Variation de NH_3 en fonction de λ

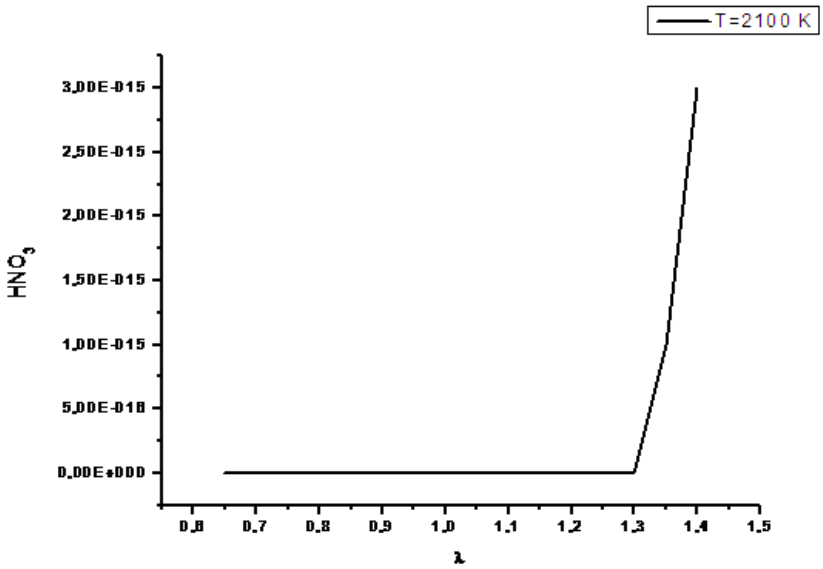

FIG. 6.38 – Variation de HNO_3 en fonction de λ

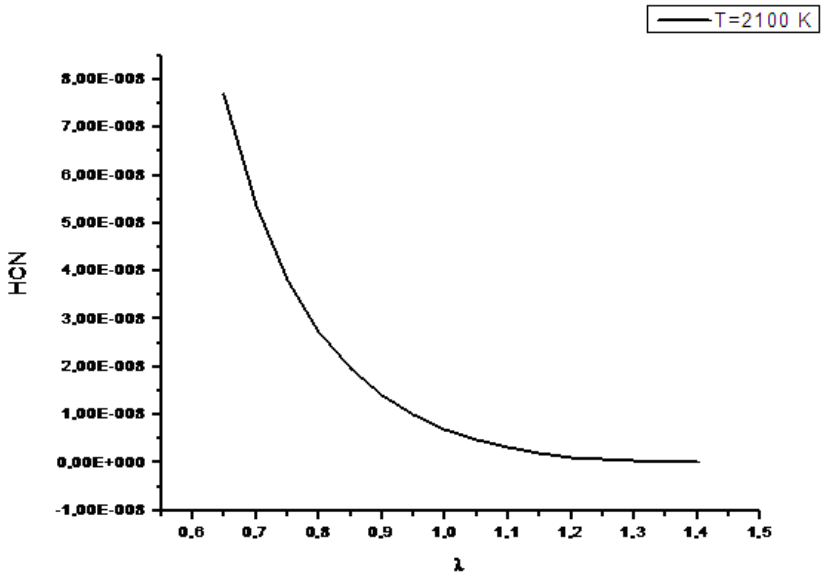

FIG. 6.39 – Variation de HCN en fonction de λ

Les deux figures 6.40 et 6.41 ci-dessous assurés la condition de convergence.

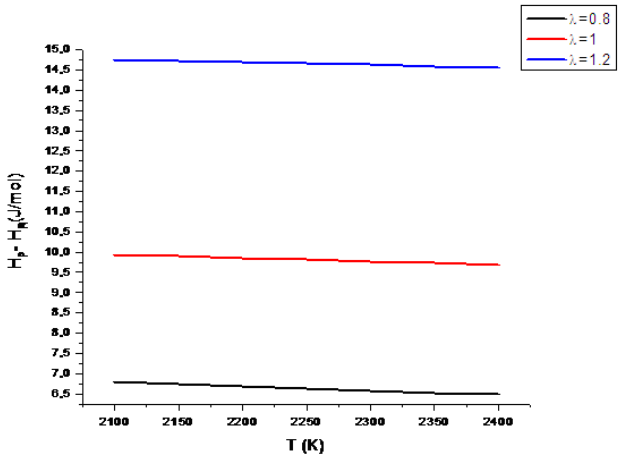

FIG. 6.40 – Variation de l'enthalpie en fonction de la température adiabatique (TAF)

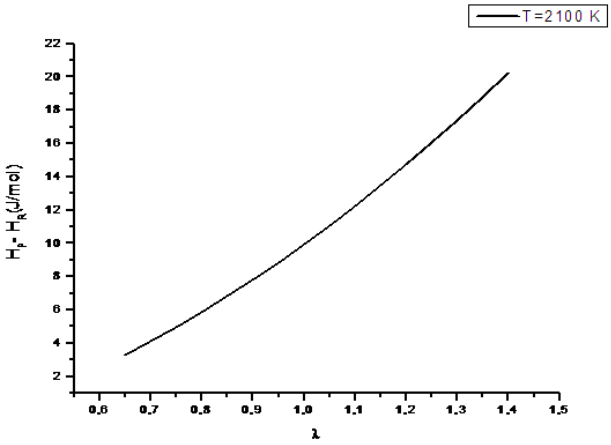

FIG. 6.41 – Variation dd l'enthalpie en fonction de λ

Discussion

Aprés avoir présenté les résultats du programme de calcul concernant la combustion du biogaz (50% CO_2, 50% CH_4), on va analyser et discuter les résultats obtenus. Le but de cette discussion est de savoir en premier lieu l'evolution des différentes émissions en fonction de la TAF et de λ et en deuxième lieu, essayer de trouver le régime optimal, où la combustion du biogaz génère le minimum possible d'émissions nocives.
Dans cette études, on va donner plus d'importance aux émissions de CO, NO_x, NH_3 et HCN.

A- Effet de la température adiabatique de flamme (TAF) sur les émissions

- L'augmentation de la température entraînera une augmentation du taux de formation de CO (monoxyde du carbone), Figure (6.13), et aussi une diminution du CO_2, Figure (6.6), ce qui peut être expliqué par le phénomène de dissociation du CO_2 à haute température.
  Donc la présence d'une grande quantité du CO_2 dans le biogaz ; en fait la moitié est CO_2, dilue le biogaz et si la température de combustion est élevée, de l'ordre de 2000°C, le CO_2 du biogaz peut être une source de CO, ce qui nécessite un autre stage de "burnout".

- Les figures (6.17, 6.18) montrent que l'augmentation de la température accroît la production de NO et NO_2. Chose logique vue que le NO_X thermique est fonction de la température. Ce NO_X a comme source l'azote de l'air convertie en NO_X à hautes températures.

- L'élévation de la température de combustion diminue la production de NH_3 et HCN, comme il est montré dans les figures (6.19, 6.21), et cela est en ligne avec l'augmentation des émissions des NO_X quand la température de combustion augmente, car NH_3 et HCN sont les deux précurseurs principaux du fuels-NO_X. Ce fuel-NO_X s'ajoute au NO_X thermique.

- Dans les figures (6.15), (6.33), on voit que le méthane diminue avec l'augmentation de la température, mais la concentration du méthane est négligeable et non significatif.

B- Effet du rapport d'équivalence λ sur les émissions

- Les figures (6.23), (6.24), montrent une nette augmentation du H_2O et CO_2 lorsque le rapport d'équivalence λ est augmenté. Cela explique le "burnout" du CO et du H_2, ce qui est en ligne avec l'allure de H_2 et CO, figure (6.22) et

figure (6.31).

- Les NO_X augmentent en augmentant λ, cela explique la conversion de NH_3 et HCN en fuel-NO_X en plus du No_X thermique qui a comme source du N_2 de l'air de combustion.

- Dans la figure (6.35), on voit que la courbe s'est applatie vers λ=0.7, ce qui signifie que l'évolution s'approche d'un minimum qui représente un grand intérêt pour l'optimisation du système de combustion.

Chapitre 7

Conclusions et perspectives

Durant ce travail, nous avons abordé l'étude des déchets solides et les différentes techniques de traitement surtout la valorisation énergétique de ces déchets.
En conclusion, nous pouvons dire que les déchets doivent être regardé non seulement comme nuisance, mais aussi comme une source importante d'énergie renouvelable, notament le biogaz.

Les conclusions tirées de cette étude sont présentées pour le cas général du traitement des déchets solides et pour le cas d'étude ; combustion de biogaz.

Général

- Les déchets solides peuvent présenter une ressource énergétique verte très importante. La substitution partielle des énergies fossiles par des énergies renouvelables prolongera la durée de disponibilité de ces énergies et conserve l'environnement ;
- La sauvegarde de l'environnement est une chose vitale pour le bien être de l'homme et la santé publique. Les déchets solides posent un grand problème environnemental ce qui fait que leur traitement et plus qu'une nécessité ;
- Puisque les déchets solides doivent être traités pour sauvegarder l'environnement, pourquoi donc ne pas les valoriser comme source énergétique.

Cas d'étude : Combustion du biogaz

- Le programme de calcul présente des résultats en ligne avec les travaux antérieurs ;
- La combustion du biogaz si non optimisé pose un nouveau problème environnemental, le problème des émissions nocives, NO_x, CO_2, CO, ... ;
- Notre programme de calcul présente un bon moyen d'optimisation de la combustion afin de diminuer les émissions nocives, notamment par l'optimisation de la température et du rapport d'équivalence λ.

Comme ce domaine d'étude est très important est très vaste, cette étude peut être complétée par d'autres études tenant compte du :

- Développement du mécanisme chimique pour la combustion de biogaz ;
- Filtration ;
- Optimisation ;
- Introduction de nouveaux problèmes.

En fin, le domaine des énergies renouvelables est un domaine très porteur, un domaine qui a tous l'avenir devant lui avec l'augmentation des prix et la diminution des réserves des énergies fossiles.
Le biogaz est un vecteur renouvelable ayant son poids parmi les autres vecteurs.
Beaucoup de travaux de recherches sont nécessaires avant de déclarer " prêt " pour substituer les énergies fossiles. Mais cela faudra être un stimulus de recherche qui nous motivera à s'engager dans ce domaine d'intérêt stratégique et sur le marché et sur la sécurité énergétique.

Bibliographie

[1] A. G. Mouthon. L'incinération des déchets ménagers. *Société Française de Santé Publique -SFSP-*, 1999.

[2] J. Taine et B. Tamain. Lénergie au xxi^{e}siècle. *Mission Scientifique Technique et Pédagogique -MSTP-*, 2004.

[3] A. Mirecki. Etude comparative de chaînes de conversion dénergie dédiées à une éolienne de petite puissance, thèse doctorat, institut national polytechnique de toulouse, 2005.

[4] J. Megy. Energies, climat et ordres de grandeur. *Union Régionale des Ingénieurs et Scientifiques Provence, Ecole des Mines de Paris*, 2004.

[5] M. Tourment. La place des énergies renouvelables en nord-pas de calais. *Conseil Economique et Social Régional*, 2006.

[6] M. Bill Etherington. Les systèmes énergétiques et l'environnement. *Commission de l'Environnement, de l'Agriculture et des Questions Territoriales*, 2005.

[7] D. Berry. Renewable energy as a natural gas price hedge :the case of wind. *Energy Policy*, 33 :799–807, 2003.

[8] S.A. Abbasi et Naseema Abbasi. The likely adverse environmental impacts of renewable energy sources. *Applied Energy*, 65 :121–144, 2000.

[9] M. Yitai et M. Lirong. Utilization of straw in biomass energy in china. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11 :976–987, 2007.

[10] F. Orecchinia et E. Boccib. Biomass to hydrogen for the realization of closed cycles of energy resources. *Energy*, 32 :1006–1011, 2006.

[11] D. L. Klass. Energy from biomasse and wastes. *Resources and Conservation*, 11 :157–239, 1985.

[12] H. Prévot. La récupération de l'énergie issue du traitement des déchets. *Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie*, 2000.

[13] J.M. Ballester. Traitement et valorisation des déchets solides. 1992.

[14] M. Gérard. Recyclage et valorisation des déchets ménagers. volume 415, pages 86–99, 1999.

[15] M. Andre et S. Hubert. Gestion des déchets solides hospitaliers. *Technologies Biomédicales Hospitalières*, 1997.

[16] S. Fenwei et H. Gang. Urban solid waste management in chongqing : Challenges and opportunities. *Waste Management*, 26 :1052–1062, 2006.

[17] S. O. Aloueimine. *Méthodologie de caractérisation des déchets ménagers à Mauritanie*. Thèse doctorat, Ecole Doctorale Science, Technologie, Santé, Université de Nouakchott, Mauritanie, 2005.

[18] Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. *Le tri des déchets recyclables*. ADEME, 2000.

[19] M.J. Mazzarino et F. Laos. Improving the quality of municipal organic waste compost. *Bioresource Technology*, 98 :1067–1076, 2007.

[20] D. Huang et H. Liu. Composting of lead-contaminated solid waste with inocula of white-rot fungus. *Bioresource Technology*, 98 :320–326, 2007.

[21] S.C. Hernandez. *Stratégie de commande intégrée intelligent de procèdes de traitement des eaux usées par la digestion anaérobie*. Thèse doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2005.

[22] D.L. Wise et R.G. Kispert. A reviw of bioconversion systems for energy recovery from municipal solid waste. *Resources and Conservation*, 6 :117–136, 1981.

[23] *Etude Biogaz de décharg*. Energie Développement Environnement -Eden-, 2000.

[24] P. Pinel-Raffaitin. *Suivi des métaux et métalloïdes dans les effluents de centres de stockage de déchets : spéciation et devenir des composés de l'arsenic et de l'étain dans les lixiviats et les biogaz*. Thèse doctorat, Ecole Doctorale des Sciences Exactes et de leurs Applications, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2006.

[25] M. Moletta. *Caractérisation de la diversité microbienne aéroportée des biogaz*. Thèse doctorat, Ecole Doctorale des Sciences des Procédés Biologiques et Industriels, Université Montpellier, 2005.

[26] M. John et L. Robert. Renewable methane from anaerobic digestion of biomass. *Renewable Energy*, 22 :1–8, 2001.

[27] M. Cloonan. *Energy From Waste, Study of an Anaerobic Digestion*. Thèse doctorat, Mechanical Engineering Unit, University of Strathclyde in Glasgow, 2003.

[28] C. Vandecasteele et T. V. Gerven. Integrated municipal solid waste treatment using a grate furnace incinerator. *Waste Management*, 41 :139–150, 2002.

[29] Office Wallon des Déchets. *Analyse des Plans Stratégiques des Intercommunales et de la Gestion des Déchets Ménagers et Assimilés et des DIB en Région Wallonne*. Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, 2001.

[30] W.T. Tsaia et Y.H. Chou. Renewable and sustainable energy reviews. *Geotextiles and Geomembranes*, 10 :491–502, 2006.

[31] A. Lpez-Delgado et C. Pena. Quality of ferrous scrap from msw incinerators. *Resources, Conservation and Recycling*, 40 :39–51, 2003.

[32] N. Dixona et V.Jones. Engineering properties of municipal solid waste. *Geotextiles and Geomembranes*, 23 :205–233, 2005.

[33] H. Willumsen. Landfill gaz. *Resources, Conservation and Recycling*, 4 :121–133, 1990.

[34] C. Khelil. *International Conference for Renewable Energies*. Ministre de l'Energie et des Mines, Algérie, 2004.

[35] S. Brahimi. *Situation des énergies renouvelables en Algérie*. Conférence sur la maîtrise de l'énergie et de l'environnent dans un contexte d'économie de marché, 2001.

[36] A. Slimani et M.S. Boucherit S. Bentouba. *Les énergies renouvelables dans le cadre d'un développement durable en Algérie*. 8eSéminaire International sur la Physique Energétique, 2006.

[37] M. Tabet-Aoul. Types de traitement des déchets solides urbains, évaluation des coûts et impacts sur l'environnement. *Energ. Ren. Production et Valorisation - Biomasse*, pages 97–102, 2001.

[38] Z. Bouchikhi. *Gestion des déchets solides urbains dans le gouvernorat du grand Alger*. Thèse ingénieur , Université Aboubekr Belkaïd Tlemcen, 2004.

[39] M. Rebah. Les déchets qui nous menacent. *La Dépêche -Journal Algérien-*, 2006.

[40] *Plan Directeur de Gestion des Déchets Solides Urbains de la ville de Batna, y compris l'étude pour l'éradication des décharges sauvages, l'aménagement et l'équipement*. Mission 01 : Elaboration du Plan Directeur de Gestion des Déchets Solides Urbains générés par les activités de la Ville de Batna, 2002.

[41] *Plan Directeur de Gestion des Déchets Solides Urbains de la ville de Batna, y compris l'étude pour l'éradication des décharges sauvages, l'aménagement et l'équipement*. Mission 02 : Etude d'Aménagement et l'Equipement d'une Décharge Contrôlée, 2002.

[42] S. Habik et F. El-Mahallawy. Fundamentals and technology of combustion. 2002.

Annexe A

Description du procédé de compostage

Le compostage est un processus biochimique de décomposition de la matière organique par le biais de micro-organismes en une matière nutritive, nommée **le compost**. La description de cette technique sera bien détaillée ci-dessous par l'expérience que j'ai fais dans le jardin de ma maison durant le 15 juillet jusqu'à le 01 nouvembre 2007.

L'expérience de compostage d'ordures ménagères se fait dans un contenant pour le compostage (Figure A.1) ; d'où la nécessité des règles de base pour fabriquer un bon compost, comme :

- Alterner les matières humides ou vertes avec des matières sèches ou brunes ;
- Garder le tas humide et arroser d'eau au besoin ;
- Laisser pénétrer l'air dans le tas des matériaux.

FIG. A.1 – Récipient à compost

La fraction organique composable contient des matières sèches et des matières humides.

Les matières sèches, les brunes riches en carbone constituées de :

- Feuilles mortes ;
- Les papiers journal.

Les matières humides, vertes, riches en azote constituées de :

- Résidus de fruits est légumes ;
- Résidus alimentaires ;
- Résidus de jardinage de plantes.

FIG. A.2 – Matières de compostage

Ce procédé comprend les phases suivantes :

FIG. A.3 – Résidus alimentaires et de jardinage

FIG. A.4 – La phase psychrophile de la fermentation

FIG. A.5 – La phase mésophile de la fermentation

FIG. A.6 – La phase thermophile de la fermentation

FIG. A.7 – La maturation du compost frais

FIG. A.8 – Produit fini

FIG. A.9 – Le composte prêt à être utilisé comme des engrais organiques

Annexe B

Canstantes thermochimiques

Equilibrium Constant	Chemical reaction equations	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7
K_1	$CO_2 \leftrightarrow CO + 0.5\ O_2$	-4.7060	4.5548	-1.9275	0.6914	-0.2143	0.0568	-0.0118
K_2	$CO \leftrightarrow C + 0.5\ O_2$	-23.3871	13.5989	-5.6463	2.0147	-0.6290	0.1745	-0.0436
K_3	$CH_4 \leftrightarrow C + 2\ H_2$	-12.3506	13.1975	-5.5245	1.9729	-0.6151	0.1704	-0.0425
K_4	$HCN \leftrightarrow C + 0.5\ H_2 + 0.5\ N_2$	-12.6282	9.5942	-4.0164	1.4348	-0.4479	0.1243	-0.0310
K_5	$H_2O \leftrightarrow H_2 + 0.5\ O_2$	-5.1798	4.0998	-1.6966	0.6008	-0.1828	0.0461	-0.0081
K_6	$H_2O \leftrightarrow OH + 0.5\ H_2$	-5.6771	4.7100	-1.9572	0.6958	-0.2168	0.0510	-0.0143
K_7	$0.5\ H_2 \leftrightarrow H$	-4.2669	3.6898	-1.5150	0.5328	-0.1618	0.0418	-0.0086
K_8	$0.5\ O_2 \leftrightarrow O$	-4.8419	4.1600	-1.7225	0.6135	-0.1940	0.0570	-0.0163
K_9	$1.5\ O_2 \leftrightarrow O_3$	-8.23556	2.3730	-0.9800	0.3462	-0.1077	0.0299	-0.0075
K_{10}	$0.5\ N_2 \leftrightarrow N$	-12.1749	7.8225	-3.2406	1.1510	-0.3568	0.0984	-0.0249
K_{11}	$0.5\ N_2 + 0.5\ O_2 \leftrightarrow NO$	-2.2991	1.4798	-0.6119	0.2102	-0.0593	0.0126	-0.0015
K_{12}	$NO_2 \leftrightarrow NO + 0.5\ O_2$	2.0772	0.9404	-0.3968	0.1434	-0.0450	0.0125	-0.0031
K_{13}	$NH_3 \leftrightarrow 0.5\ N_2 + 1.5\ H_2$	4.3247	0.9087	-0.3926	0.1381	-0.0427	0.0119	-0.0030
K_{14}	$2HNO_3 + NO \leftrightarrow 3\ NO_2 + H_2O$	7.6818	0.5958	-0.2475	0.1101	-0.0781	0.0699	-0.0526

TAB. B.1 – Coefficients de la constante d'équilibre

Species	Coeff.	300-600 K	600-900	900-1200	1200-1500	1500-1800	1800-2100	2100-2400	2400-2700
H	a_0	2.11933873E+08	2.11933873E+08	2.11933873E+08	2.11933873E+08	2.11933873E+08	2.11933873E+08	2.11933871E+08	2.11933872E+08
	a_1	2.08000224E+04	2.08000224E+04	2.08000225E+04	2.08000224E+04	2.08000226E+04	2.08000227E+04	2.08000244E+04	2.08000232E+04
	a_2	-1.07043074E-08	-4.98788916E-09	-5.72290161E-08	-1.72964546E-08	-6.11339370E-08	-8.13525529E-08	-4.52247051E-07	-1.67942431E-07
O	a_0	2.42638975E+08	2.43042532E+08	2.43241578E+08	2.43227682E+08	2.43213925E+08	2.43348149E+08	2.43601094E+08	2.43846189E+08
	a_1	2.31310159E+04	2.15508268E+04	2.10477105E+04	2.10681323E+04	2.10897414E+04	2.09369786E+04	2.06884077E+04	2.04775093E+04
	a_2	-1.93684289E+00	-3.75253889E-01	-5.66083371E-02	-6.37997525E-02	-7.21882151E-02	-2.86869838E-02	3.24258031E-02	7.78187142E-02
CO	a_0	-1.19074843E+08	-1.18784517E+08	-1.19138797E+08	-1.20255497E+08	-1.21746805E+08	-1.23125148E+08	-1.24118150E+08	-1.24751652E+08
	a_1	2.77530876E+04	2.65619161E+04	2.73678854E+04	2.93294241E+04	3.14161320E+04	3.30152737E+04	3.39983842E+04	3.45443364E+04
	a_2	2.11143296E+00	3.33810419E+00	2.87920477E+00	2.01580193E+00	1.28476416E+00	8.20473767E-01	5.76971344E-01	4.59281270E-01
O_2	a_0	-8.41215785E+06	-8.45191397E+06	-9.63044323E+06	-1.09722721E+07	-1.15398444E+07	-1.14482726E+07	-1.14681833E+07	-1.20684285E+07
	a_1	2.70290625E+04	2.69771916E+04	2.97883655E+04	3.21891516E+04	3.30048877E+04	3.29036661E+04	3.29180044E+04	3.34283795E+04
	a_2	4.00216465E+00	4.24434114E+00	2.56092717E+00	1.48471317E+00	1.19140109E+00	1.21933357E+00	1.21709190E+00	1.10854860E+00
H_2	a_0	-8.29812911E+06	-8.68524335E+06	-7.94540381E+06	-7.05749859E+06	-7.12951482E+06	-8.19971133E+06	-9.52860058E+06	-1.05588885E+07
	a_1	2.71593329E+04	2.88539296E+04	2.71123210E+04	2.55149733E+04	2.55890349E+04	2.68165432E+04	2.81274067E+04	2.90145623E+04
	a_2	2.34388734E+00	5.04608356E-01	1.53326050E+00	2.25307859E+00	2.23644865E+00	1.88412604E+00	1.56062042E+00	1.36953764E+00
OH	a_0	3.03517944E+07	3.11850844E+07	3.18048979E+07	3.18406947E+07	3.12927076E+07	3.03158361E+07	2.90596928E+07	2.76408912E+07
	a_1	3.12403759E+04	2.80205033E+04	2.64802483E+04	2.63937908E+04	2.71499551E+04	2.82747281E+04	2.95100187E+04	3.07267458E+04
	a_2	-1.96353115E+00	1.17885458E+00	2.13902202E+00	2.18758760E+00	1.92637871E+00	1.60228142E+00	1.29835829E+00	1.03735187E+00
CO_2	a_0	-4.03230243E+08	-4.05503928E+08	-4.08483718E+08	-4.11512707E+08	-4.14259995E+08	-4.16581324E+08	-4.18433637E+08	-4.19875521E+08
	a_1	2.60922057E+04	3.47353524E+04	4.19632451E+04	4.73511746E+04	5.12084346E+04	5.39008809E+04	5.57311040E+04	5.69714547E+04
	a_2	1.88716353E+01	1.05681278E+01	6.16578109E+00	3.76410765E+00	2.40818341E+00	1.62667211E+00	1.17424187E+00	9.07346009E-01
N_2	a_0	-8.48870665E+06	-8.15039752E+06	-8.30119827E+06	-9.20740461E+06	-1.06561537E+07	-1.21905497E+07	-1.34149000E+07	-1.41919358E+07
	a_1	2.79875657E+04	2.66386780E+04	2.69570647E+04	2.85411443E+04	3.05633675E+04	3.23406182E+04	3.35518151E+04	3.42222002E+04
	a_2	1.65394210E+00	3.00876631E+00	2.84321096E+00	2.14938166E+00	1.44265519E+00	9.27500442E-01	6.27739960E-01	4.83069796E-01
H_2O	a_0	-2.51670196E+08	-2.51073876E+08	-2.50905014E+08	-2.51786159E+08	-2.53868761E+08	-2.56869912E+08	-2.60294536E+08	-2.63681212E+08
	a_1	3.13663182E+04	2.90462528E+04	2.85809153E+04	3.01026482E+04	3.29951226E+04	3.64564086E+04	3.98289095E+04	4.27371502E+04
	a_2	3.74585290E+00	6.02445106E+00	6.34115735E+00	5.68290412E+00	4.67710215E+00	3.67808667E+00	2.84717548E+00	2.22247437E+00
HO_2	a_0	1.12693261E+07	1.06339344E+07	8.99965379E+06	6.49250293E+06	3.67631905E+06	1.17217261E+06	-6.99570234E+05	-2.07767848E+06
	a_1	2.93162152E+04	3.16375730E+04	3.55427676E+04	3.99743820E+04	4.39203425E+04	4.68255942E+04	4.86770492E+04	4.98621896E+04
	a_2	1.04649014E+01	8.32313467E+00	5.97991214E+00	4.01690032E+00	2.63260532E+00	1.78911102E+00	1.33093322E+00	1.07599009E+00
HCO	a_0	-2.16828479E+07	-2.17668051E+07	-2.35607937E+07	-2.64637350E+07	-2.94186195E+07	-3.20038732E+07	-3.44016103E+07	-3.67743036E+07
	a_1	2.93231500E+04	2.93939824E+04	3.36464775E+04	3.87855362E+04	4.29321831E+04	4.59280302E+04	4.82910807E+04	5.03279170E+04
	a_2	9.01416145E+00	9.18065505E+00	6.65015451E+00	4.37034172E+00	2.91342403E+00	2.04462380E+00	1.46197040E+00	1.02459349E+00

TAB. B.2 – Valeurs des constantes d'enthalpie

Species	Coeff.	300-600 K	600-900	900-1200	1200-1500	1500-1800	1800-2100	2100-2400	2400-2700
	a_0	-1.24898978E+08	-1.25060916E+08	-1.29573300E+08	-1.36254087E+08	-1.42196257E+08	-1.46823372E+08	-1.51280427E+08	-1.56193074E+08
CH_2O	a_1	2.41764875E+04	2.41138024E+04	3.48283320E+04	4.66833149E+04	5.50421026E+04	6.04080126E+04	6.47949598E+04	6.90090701E+04
	a_2	1.92934297E+01	1.99950387E+01	1.36082123E+01	8.33670535E+00	5.39288193E+00	3.83561956E+00	2.75531734E+00	1.85108337E+00
	a_0	1.35608947E+08	1.35228966E+08	1.33206257E+08	1.29376074E+08	1.24353532E+08	1.18957692E+08	1.13791058E+08	1.09122277E+08
CH_3	a_1	2.94845375E+04	3.07534777E+04	3.55448267E+04	4.22929825E+04	4.93120598E+04	5.55538783E+04	6.06493445E+04	6.46606558E+04
	a_2	1.56346271E+01	1.45805220E+01	1.17310971E+01	8.75169455E+00	6.29569964E+00	4.48874414E+00	3.23149165E+00	2.36939828E+00
	a_0	-8.34851175E+07	-8.30734671E+07	-8.81345945E+07	-9.67536133E+07	-1.05577650E+08	-1.13464787E+08	-1.21167906E+08	-1.29085110E+08
CH_4	a_1	2.14177977E+04	1.90162267E+04	3.09681012E+04	4.62223373E+04	5.86041078E+04	6.77390632E+04	7.53260754E+04	8.2121428E+04
	a_2	2.44354806E+01	2.75331914E+01	2.04488870E+01	1.36835058E+01	9.33359331E+00	6.68582711E+00	4.81625862E+00	3.35731985E+00
	a_0	-1.45756190E+08	-1.46391590E+08	-1.48025870E+08	-1.50533020E+08	-1.53349200E+08	-1.55853350E+08	-1.57095480E+08	-1.57233200E+08
H_2O_2	a_1	2.93162152E+04	3.16375730E+04	3.55427676E+04	3.99743820E+04	4.39203425E+04	4.68255942E+04	4.86770492E+04	4.98621896E+04
	a_2	1.04649014E+01	8.32313467E+00	5.97991214E+00	4.01690032E+00	2.63260532E+00	1.78911102E+00	1.33093322E+00	1.07599009E+00
	a_0	4.37016000E+07	3.94582860E+07	3.23238000E+07	2.20911430E+07	1.13062860E+07	6.63657140E+06	-6.20085710E+06	-1.24880000E+07
C_2H_4	a_1	1.54488570E+04	3.07260000E+04	4.80078570E+04	6.61271430E+04	8.09342860E+04	8.67414290E+04	9.94528570E+04	1.04815710E+05
	a_2	4.67714290E+01	3.38157140E+01	2.27785710E+01	1.47857140E+01	9.71428570E+00	7.92857140E+00	4.78571430E+00	3.64285710E+00
	a_0	9.89740000E+07	9.59411430E+07	8.72300000E+07	7.77014290E+07	6.67354290E+07	5.40985710E+07	4.19860000E+07	2.92180000E+07
C_2H_5	a_1	2.38457140E+04	3.40900000E+04	5.49614290E+04	7.17314290E+04	8.69714290E+04	1.01451430E+05	1.13370000E+05	1.24345710E+05
	a_2	4.71428570E+01	3.86428570E+01	2.62142860E+01	1.88571430E+01	1.35714290E+01	9.42857140E+00	6.50000000E+00	4.14285710E+00
	a_0	-9.60484000E+07	-9.95071430E+07	-1.08725860E+08	-1.18998220E+08	-1.33986740E+08	-1.50643400E+08	-1.68548570E+08	-1.85072000E+08
C_2H_6	a_1	2.13365710E+04	3.35870000E+04	5.57274430E+04	7.35932000E+04	9.43848570E+04	1.13527000E+05	1.31068570E+05	1.45154290E+05
	a_2	5.65142860E+01	4.58071430E+01	3.25864290E+01	2.48400800E+01	1.76428570E+01	1.21500000E+01	7.85714290E+00	4.85714290E+00
	a_0	3.84896421E+08	3.83036791E+08	3.81129439E+08	3.79950662E+08	3.79263321E+08	3.78896830E+08	3.78515911E+08	3.78058590E+08
CH_2	a_1	3.01201000E+04	2.95639000E+04	3.09097500E+04	3.54633000E+04	3.90823000E+04	4.26014000E+04	4.58851000E+04	4.87320000E+04
	a_2	7.51000000E+00	8.05000000E+00	7.26500000E+00	5.26500000E+00	4.01500000E+00	3.00800000E+00	2.20500000E+00	1.59900000E+00
	a_0	2.84345000E+08	2.80870000E+08	2.80834500E+08	2.73723500E+08	2.72253000E+08	2.72100000E+08	2.72100000E+08	2.72100000E+08
C_2H_3	a_1	3.66243000E+04	4.17522000E+04	4.63257000E+04	3.66567000E+04	-2.86170000E+04	-2.07394000E+05	-5.70102000E+05	-1.20334400E+06
	a_2	2.32900000E+01	1.86100000E+01	1.58285000E+01	1.98930000E+01	4.21400000E+01	9.29300000E+01	1.81080000E+02	3.15475000E+02
	a_0	2.26724643E+08	2.25595052E+08	2.24016929E+08	2.22436505E+08	2.20978940E+08	2.20179414E+08	2.19628536E+08	2.19528536E+08
C_2H_2	a_1	1.40515000E+04	2.11246000E+04	2.31062000E+04	2.80460000E+04	2.94349000E+04	3.19462000E+04	3.41880000E+04	3.60815000E+04
	a_2	1.35500000E+01	6.85000000E+00	5.66600000E+00	3.50000000E+00	3.03600000E+00	2.31700000E+00	1.76950000E+00	1.36600000E+00

TAB. B.3 – Suite des valeurs des constantes d'enthalpie

Annexe C

Programme de calcul

```
         ! ****************************** !
        !!      PROGRAMME PRINCIPALE      !!
         ! ****************************** !

implicit real (a-h,k-z)
INTEGER ITMAX,ii

PARAMETER (ii=4)
real lmda
COMMON /lire/T,lmda
COMMON /lire1/rco,rho,rno,phi
REAL X(4), XGUESS(4),k(100),y(18),y_l(18,100),y_t(18,100),dh(100,100)

character spec(18)
EXTERNAL FCN, NEQNF, UMACH

open(1,file='dh_lmda.dat')
open(3,file='dh_t.dat')
open(4,file='concen_lmda.dat')
open(5,file='concen_t.dat')
open(6,file='kkkk_t.dat')

data spec/'CH4','N2','O2','H2','H2O','CO2','O'
,'O3','H','OH','CO','C','NO','NO2', 'NH3','HNO3','HCN','N'/

data XGUESS/0.1, 0.1, 0.1,0.1/

ERRREL = 0.0001 ;  ITMAX = 600 ;ispec=18 ; i_reac=14

!*************************************************************************!

il=1 ; jl=1 ;  dlmda=0.1 ; dt=100  ;

n_fuel1=0.243 n_fuel2=0 n_fuel3=0 n_fuel4=0.083

m_fuel1=16     !ch4
```

```
m_fuel2=0
m_fuel3=0
m_fuel4=12     !c

n_fuel=(n_fuel1*m_fuel1)+(n_fuel2*m_fuel2)+(n_fuel3*m_fuel3)+(n_fuel4*m_fuel4)

m_air=32+(3.76*28)

safr=13.692 !safr=(2*(m_air))/(n_fuel)

        t=2076.213
        do j=1,jl,1
        t=t+dt
        lmda=0.9
        do i=1,il,1
        lmda=lmda+dlmda
        afr=safr*lmda
        n_o2=n_fuel*afr/(lmda*(m_air))
        n_n2=n_o2*3.76

        at_c=n_fuel1+n_fuel4
        at_h=4*n_fuel1
        at_o=(n_o2*2*lmda)
        at_n=at_o*3.76

        rco=at_c/at_o
        rho=at_h/at_o
        rno=at_n/at_o

        phi=1/lmda

        write(*,*)'lmda,T,n_o2,safr,afr,rco,rho,rno='
        write(*,*)lmda,T,n_o2,safr,afr,rco,rho,rno

!*****************************************************************************!

n_CH4=0.243
n_C=0.083
hf_ch4=-74.9e3
hf_o2=0  hf_n2=0
hf_C=0

dh_ch4=((-1.21167906*(1e8))+((7.53260754*(1e4))*T)+(4.81625862*(T**2)))*(1e3)
dh_o2=((-1.14681833*(1e7))+((3.29180044*(1e4))*T)+(1.21709190*(T*2)))*(1e3)
dh_n2=((-1.34149000*(1e7))+((3.35518151*(1e4))*T)+((6.27739960*(1e-1))*(T**2)))*(1e3)
dh_co2=((-4.18433637*(1.e8))+((5.57311040*(1.e4))*T)+((1.17424187)*(T**2)))*(1e3)

hr_ch4=(N_ch4*(hf_ch4+dh_ch4))
hr_c=(N_c*(hf_c+dh_c))
hr_o2=(N_o2*(hf_o2+dh_o2))
hr_n2=(N_n2*(hf_n2+dh_n2))
```

```
hr=(hr_ch4+hr_c+hr_o2+hr_n2)

hr_cal=(hr/4.18)

!*****************************************************************************!

CALL NEQNF (FCN, ERRREL, ii, ITMAX, XGUESS, X, FNORM)

call relation(x,k,fh2,fh2o,fco2,fn2,fo,fo2,fo3,fh,foh,fco,fc,fch4,
fno,fno2,fnh3,fhno3,fhcn,fn)

        np=((at_c+at_h+(at_o/phi)+(at_n/phi))/((fo+fh+fc+fn)+(2*(x(1)+x(4)+
        fO2+foh+fco+fno))+(3*(x(2)+x(3)+fo3+fno2+fhcn))+(4*fnh3)+(5*(fch4+fhno3))))

        y(1) = X(1) ;y(2) =X(2)  ;y(3) =X(3)  ; y(4) =X(4)
        y(5) =fO    ;y(6) =fO2   ;y(7) =fO3   ; y(8) =fH
        y(9) =foh   ;y(10)=fCO   ;y(11)=fC    ; y(12)=fch4
        y(13)=fN    ;y(14)=fNO   ;y(15)=fNO2  ; y(16)=fNH3
        y(17)=fHNO3 ;y(18)= fHCN

!*****************************************************************************!

        hpc=hp(ispec,spec,T,np,Y)
        hp_cal=(hpc/4.18)
        dh(i,j)=(hpc-hr)

!*****************************************************************************!

     end do

write(5,2)t,(y(ij),ij=1,18),np
write(4,21)lmda,(y(ij),ij=1,18),np
write(6,55)t,(k(jj),jj=1,14)
write(*,55)t,k(14) !,jj=1,14)

end do

lmda=0.9
  do i=1,il,1
lmda=lmda+dlmda
write(1,2)lmda,(dh(i,j),j=1,jl,1)
  end do

t=2076.213
  do j=1,jl,1
t=t+dt
write(3,2)t,(dh(i,j),i=1,il,1)
  end do

2 format(100f20.15)
```

```
21 format(100f20.15)
55 format(100e35.20)

end


!*************************************************************************!

         ! ********************************* !
        !!  SUBROUTINE CONSTANTE D'EQUILIBRE  !!
         ! ********************************* !

real function k_const(T,A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7)

real T,A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,p

p=A1+(A2*(T-1600)*(1.e-3))+(A3*(T-1600)*(T-2000)*(1.e-6)) +&
      (A4*(T-1600)*(T-2000)*(T-2400)*(1.e-9)) +&
      (A5*(T-1600)*(T-2000)*(T-2400)*(T-2800)*(1.e-12)) +&
      (A6*(T-1600)*(T-2000)*(T-2400)*(T-2800)*(T-3200)*(1.e-15)) +&
      (A7*(T-1600)*(T-2000)*(T-2400)*(T-2800)*(T-3200)*(T-3600)*(1.e-18))
k_const=10**p return end

subroutine a_const(i,t,A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7)

real A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7


  if(i==1)then
A1=-4.7060 ; A2=4.5548 ; A3=-1.9275 ; A4=0.6914 ; A5=-0.2143 ;
A6=0.0568 ; A7=-0.0118
  end if

  if(i==2)then
A1=-23.3871 ; A2=13.5989 ; A3=-5.6463 ; A4=2.0147 ; A5=-0.6290 ;
A6=0.1745 ; A7=-0.0436
  end if

  if(i==3)then
A1=-12.3506 ; A2=13.1975 ; A3=-5.5245 ; A4=1.9729 ; A5=-0.6151 ;
A6=0.1704  ; A7=-0.0425
  end if

  if(i==4)then
A1=-12.6282 ; A2=9.5942 ; A3=-4.0164 ; A4=1.4348 ; A5=-0.4479 ;
A6=0.1243 ; A7=-0.0310
  end if

  if(i==5)then
A1=-5.1798 ; A2=4.0998 ; A3=-1.6966 ; A4=0.6008 ; A5=-0.1828 ;
A6=0.0461 ; A7=-0.0081
```

```
  end if

  if(i==6)then
A1=-5.6771 ; A2=4.7100 ; A3=-1.9572 ; A4=0.6958 ; A5=-0.2168 ;
A6=0.0510 ; A7=-0.0143
  end if

  if(i==7)then
A1=-4.2669 ; A2=3.6898 ; A3=-1.5150 ; A4=0.5328 ; A5=-0.1618 ;
A6=0.0418 ; A7=-0.0086
  end if

  if(i==8)then
A1=-4.8419 ; A2=4.1600 ; A3=-1.7225 ; A4=0.6135 ; A5=-0.1940 ;
A6=0.0570 ; A7=-0.0163
  end if

  if(i==9)then
A1=-8.23556 ; A2=2.3730 ; A3=-0.9800 ; A4=0.3462 ; A5=-0.1077 ;
A6=0.0299 ; A7=-0.0075
  end if

  if(i==10)then
A1=-12.1749 ; A2=7.8225 ; A3=-3.2406 ; A4=1.1510 ; A5=-0.3568 ;
A6=0.0984 ; A7=-0.0249
  end if

  if(i==11)then
A1=-2.2991 ; A2=1.4798 ; A3=-0.6119 ; A4=0.2102 ; A5=-0.0593 ;
A6=0.0126 ; A7=-0.0015
  end if

  if(i==12)then
A1=2.0772 ; A2=0.9404 ; A3=-0.3968 ; A4=0.1434 ; A5=-0.0450 ;
A6=0.0125 ; A7=-0.0031
  end if

  if(i==13)then
A1=4.3247 ; A2=0.9087 ; A3=-0.3926 ; A4=0.1381 ; A5=-0.0427 ;
A6=0.0119  ; A7=-0.0030
  end if

  if(i==14)then
A1=7.6818 ; A2=0.5958 ; A3=-0.2475 ; A4=0.1101 ; A5=-0.0781 ;
A6=0.0699 ; A7=-0.0526
  end if

return

end
```

```
!*************************************************************************!

         ! ************************ !
        !!  SUBROUTINE D'ENTHALPIE  !!
         ! ************************ !

real function hp(ispec,spec,T,np,Y)
real T,a0,a1,a2,dh,np,y(18)
character spec(100) hp=0.
do i=1,ispec,1
call
a_enth(spec(i),T,a0,a1,a2,hf)
dh=(a0+(a1*T)+(a2*(T*2)))*(1e3)
hp=hp+(np*y(i)*(hf+dh))
End do
return
end


subroutine a_enth(spec,T,a0,a1,a2,hf)

real T,a0,a1,a2,hf character spec


if(t>=2050.and.t<=2450)then


  if(spec=='H2')then
a0=-9.528600580*(1.e6) ; a1=2.812740670*(1.e4) ; a2=1.56062042 ;
hf=0
  end if

  if(spec=='H2O')then
a0=-2.60294536*(1.e8) ; a1=3.98289095*(1.e4) ; a2=2.84717548 ;
hf=-241.940*(1.e3)
  end if

  if(spec=='CO2')then
a0=-4.18433637*(1.e8) ; a1=5.57311040*(1.e4) ; a2=1.17424187 ;
hf=-393.68*(1.e3)
  end if

  if(spec=='N2')then
a0=-1.3414900*(1.e7) ; a1=3.35518151*(1.e4) ; a2=6.27739960*(1.e-1);
hf=0
  end if

  if(spec=='O')then
a0=2.43601094*(1.e8) ; a1=2.06884077*(1.e4) ; a2=3.2425803*(1.e-2) ;
hf=249.28*(1.e3)
  end if
```

```
  if(spec=='O2')then
a0=-1.14681833*(1.e7) ; a1=3.291800440*(1.e4) ; a2=1.21709190 ;
hf=0
  end if

  if(spec=='O3')then
a0=2.32132764*(1.e8)) ; a1=3.06884077*(1.e4) ; a2=1.2130129 ;
hf=142.12*(1.e3)
  end if

  if(spec=='H')then
a0=2.11933871*(1.e8) ; a1=2.0800024*(1.e4) ; a2=-4.5224705*(1.e-7) ;
hf=218.06*(1.e3)
  end if

  if(spec=='OH')then
a0=2.90596928*(1.e7) ; a1=2.95100187*(1.e4) ; a2=1.29835829 ;
hf=38.35*(1.e3)
  end if

  if(spec=='CO')then
a0=-1.24118150*(1.e8) ; a1=3.3998382*(1.e4) ; a2=5.7697134*(1.e-1) ;
hf=-110.58*(1.e3)
  end if

  if(spec=='C')then
a 0=-4.08413637*(1.e8) ; a1=2.57311040*(1.e4) ; a2=1.175241870 ;
hf=0
  end if

  if(spec=='CH4')then
a0=-1.21167906*(1.e8) ; a1=7.53260754*(1.e4) ; a2= 4.81625862 ;
hf=-74.9*(1.e3)
  end if

  if(spec=='N')then
a0=-1.35518151*(1.e7) ; a1=2.23678151*(1.e4) ; a2=3.27739960* ;
hf=472.96*(1.e3)
  end if

  if(spec=='NO')then
a0=-1.3414904*(1.e8) ; a1=1.0688407*(1.e4) ; a2=1.24258031*(1.e-2) ;
hf=90.32*(1.e3)
  end if

  if(spec=='NO2')then
a0=-1.34181833*(1.e7) ; a1=3.35180044*(1.e4) ; a2=3.35709190 ;
hf=33.82*(1.e3)
  end if
```

```
  if(spec=='NH3')then
a0=-1.3414912*(1.e7) ; a1=2.3551815*(1.e4) ; a2=-4.5224701*(1.e-7) ;
hf=-45.91*(1.e3)
  end if

  if(spec=='HNO3')then
a0=2.11901094*(1.e8) ; a1=3.35500244*(1.e4) ; a2=1.21876194 ;
hf=-133.71*(1.e3)
  end if

  if(spec=='HCN')then
a0=-1.34133871*(1.e8) ; a1=4.57311040*(1.e4) ; a2=-1.21709190 ;
hf=135.175*(1.e3)
  end if

end if




!*****************************************************************************!

         ! ********************************** !
        !!  SUBROUTINE D'EQUATION NON LINEAIRE  !!
         ! ********************************** !

!C User-defined subroutine

SUBROUTINE FCN (X, F, ii)

implicit real (a-h,k-z)

REAL X(4), F(4),k(100),y(18)

COMMON /lire/T,lmda
COMMON /lire1/rco,rho,rno,phi

CALL relation(x,k,fh2,fh2o,fco2,fn2,fo,fo2,fo3,fh,foh,fco,fc,
fch4,fno,fno2,fnh3,fhno3,fhcn,fn)

f(1)= x(1)+x(2)+x(3)+(x(4)**1)-(1-
(fo+fo2+fo3+fh+foh+fco+fc+fch4+fno+fno2+fnh3+fhno3+fhcn+fn))

f(2)=(rco*x(2))+(((2*RCO)-1)*x(3))-(fco+fc+fch4+fhcn-(RCO*
(+fco+(3*fhno3)+(3*fo3)+(2*fo2)+fo+foh+(2*fno2)+fno)))

f(3)=(-2*x(1))+((rho-2)*x(2))+(2.*rho*x(3))-(fh+foh+(4*fch4)+(3*fnh3)
+fhno3+fhcn-(RHO*(fco+(3*fhno3)+(3*fo3)+(2*fo2)+fo+foh+(2*fno2)+fno)))

f(4)=(rno*x(2))+(2.*rno*x(3))+(-2.*(x(4)**1))-(fno+fno2+fnh3+fhno3+fhcn
```

```
+fn-(RNO*(fco+(3*fhno3)+(3*fo3)+(2*fo2)+fo+foh+(2*fno2)+fno)))

RETURN

END


!************************************************************************!

         ! ********************* !
        !!  SUBROUTINE RELATION  !!
         ! ********************* !


subroutine relation(x,k,fh2,fh2o,fco2,fn2,fo,fo2,fo3,fh,foh,
fco,fc,fch4,fno,fno2,fnh3,fhno3,fhcn,fn)

implicit real (a-h,k-z)
real x(4),k(100),k_const
COMMON /lire/T,lmda
COMMON /lire1/rco,rho,rno,phi

      do i=1,14,1
      call a_const(i,t,A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7)
      k(i)=k_const(T,A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7)
      !write(*,*)k(i),A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7
      end do


               !fh2=x(1)
               !fH2O=x(2)
               !fCO2=x(3)
               !fN2=x(4)

               fo2 = ((k(5)*x(2))/(x(1)))**2
                fco = (k(1)*(x(3)))/sqrt(fo2)
                 fc = (k(2)*fco)/sqrt(fo2)
                  fch4 = (fc*((x(1))**2))/k(3)
                   fhcn = (fc*sqrt(x(1))*sqrt(x(3)))/k(4)
                    foh = (k(6)*x(2))/sqrt(x(1))
                     fh = k(7)*sqrt(x(1))
                     fo = k(8)*sqrt(fo2)
                    fo3 = k(9)*(fo2**1.5)
                   fn = k(10)* sqrt(x(4))
                  fno = (k(11)*(sqrt(x(4))*sqrt(fo2)))
                 fno2 = (fno*sqrt(fo2))/k(12)
                fnh3 = (sqrt(x(4))*(x(1)**1.5))/k(13)
               fhno3 = sqrt((((fno2)**3)*x(2))/(fno*k(14)))

end
```